

# ВЕСТНИК



Сибирского государственного  
аэрокосмического университета  
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 2(48)

Красноярск 2013

# ВЕСТНИК

Сибирского государственного  
аэрокосмического университета  
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 2(48)

---

## Главный редактор

доктор технических наук  
Ковалев И. В.

## Заместители главного редактора:

доктор физико-математических наук  
Логинов Ю. Ю.

доктор физико-математических наук  
Сенатов С. И.

доктор технических наук  
Мурыгин А. В.

кандидат технических наук  
Зеленков П. В. (отв. секретарь)

## Редакционная коллегия:

Аплеснин С. С.  
Головенкин Е. Н.  
Ерыгин Ю. В.  
Лаптенко В. Д.  
Ловчиков А. Н.  
Медведев А. В.  
Михеев А. Е.  
Москвичев В. В.  
Сафонов К. В.  
Смирнов Н. А.  
Сомов В. Г.

## Учредитель

Сибирский  
государственный  
аэрокосмический  
университет  
имени академика  
М. Ф. Решетнева

## К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ

«Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева» (Вестник СибГАУ) – межрегиональный научный журнал, содержащий результаты научных исследований в области естественных, технических и прикладных наук по вопросам проектирования, производства и эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники, а также экономики.

Представленные в журнал статьи публикуются после обязательного рецензирования и при оформлении их в соответствии с требованиями редакции ([www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru))

Периодичность – 4 раза в год  
Специальный выпуск – 1 раз в год

Электронная версия журнала представлена на сайте Научной электронной библиотеки (<http://www.elibrary.ru>)

и сайте журнала ([www.vestnik.sibsau.ru](http://www.vestnik.sibsau.ru))

Журнал включен в каталоги:  
русской прессы «Роспечать» (МАП) – 11399;  
объединенный «Пресса России» – 39263

## АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, проспект имени газеты  
«Красноярский рабочий», 31, П-415  
Тел./ факс (391)291-90-19  
E-mail: [vestnik@sibsau.ru](mailto:vestnik@sibsau.ru)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия, свидетельство ПИ № ФС77-22189 от 27.10.2005 г.

Журнал включен ВАК России в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»

При перепечатке или цитировании материалов из журнала «Вестник СибГАУ» ссылка обязательна

*Редакторы:* Е. Г. Некрасова, Т. Е. Ильющенко,  
О. А. Плехова, Т. А. Ермолаева, О. А. Кругликова

*Редактор английского текста* А. Г. Никитина

*Оригинал-макет и верстка* И. Д. Бочаровой

Подписано в печать 26.06.2013. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 34,2.

Уч.-изд. л. 39,2. Тираж 1000 экз. Заказ 87/185. С 118/13.

Редакционно-издательский отдел

Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.

660014, г. Красноярск,

просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

Отпечатано ООО РПБ «Амальгама».

660061, г. Красноярск, ул. Калинина, 53



РАЗДЕЛ  
1



МАТЕМАТИКА,  
МЕХАНИКА,  
ИНФОРМАТИКА



УДК 519.6

## НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ВЕТРЯНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Е. Д. Агафонов, Е. С. Мангалова, О. В. Шестернева

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: agafonov@gmx.de, e.s.mangalova@hotmail.com, kuznetcova\_o@mail.ru

*Статья посвящена решению практической задачи прогнозирования относительной мощности ветряных электрических установок в зависимости от сезонных и погодных факторов. Описаны следующие этапы решения задачи прогнозирования: выбор значимых факторов, предварительная обработка данных, построение непараметрической модели  $k$  ближайших соседей, ее проверка и интерпретация результатов. Качество построенной модели подтверждено результатами открытого международного конкурса, на котором по критерию среднеквадратической ошибки модель показала второй по точности результат. Построенная модель позволит оптимизировать работу ветряных электрических установок в зависимости от погодных условий и нагрузки в энергетической системе.*

*Ключевые слова: метод  $k$  ближайших соседей, прогнозирование, дерево регрессии.*

## A NONPARAMETRIC MODEL IN THE TASK OF PREDICTIVE MODELING OF WIND POWER PLANTS

E. D. Agafonov, E. S. Mangalova, O. V. Shesterneva

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia  
E-mail: agafonov@gmx.de, e.s.mangalova@hotmail.com, kuznetcova\_o@mail.ru

*The work is devoted to solution of the problem of predictive modeling of relative capacity of wind power plants in relation to season and weather factors. It contains step-by-step description of the following steps of modeling: factor selection, raw data pretreatment, model evaluation and optimization. Both heuristic and formal methods were combined to construct the model. The basic modeling approach here is the  $k$ -nearest neighbors method. The model has been verified with the use of test sample. The developed model allows to optimize the wind power plant operation in relation to weather factors and network load.*

*Keywords:  $k$ -nearest neighbors, forecasting, regression tree.*

Энергоэффективность и энергосбережение входят в пятерку приоритетных направлений технологического развития в России. Развивающиеся технологии использования альтернативных источников энергии способствуют рациональному использованию ресурсов и сокращению выбросов парниковых газов [1].

Одним из активно развивающихся направлений в энергетике в настоящее время являются ветряные электрические установки (ВЭУ). Россия обладает колоссальными возможностями для развития ветроэнергетики. В настоящее время на территории России экономически оправдано строительство ветряных электростанций суммарной мощностью до 250 млрд кВт/ч в год. Наиболее перспективными районами являются Дальневосточный регион, Сибирь, Крайний Север, а также территории Алтая, Нижней и Средней Волги, Каспийское побережье и Республика Карелия [2].

Эффективная эксплуатация ветряных электрических установок требует решения проблем, связанных с необходимостью оптимизации режимов их работы в рамках единой энергетической системы. В частности,

возникает необходимость прогнозировать мощность, генерируемую ветряной электрической установкой. Постановка задачи и исходные данные взяты из открытого конкурса Global Energy Forecasting Competition 2012 [3]. Для прогноза выходной мощности семи ветряных электростанций используется следующий набор факторов: метеорологический прогноз, содержащий меридиональную и зональную компоненты скорости ветра (проекции скорости на меридиан и параллель, проходящие через ВЭУ), направление ветра, скорость ветра, и соответствующая прогнозу дата. Исходные данные представляют собой выборку, состоящую из 26 197 наблюдений за четырехлетний период. Прогнозы ветра поступают два раза в сутки, каждый прогноз представляет собой данные о ветре на ближайшие двое суток. По этой причине обучающая выборка содержит многократные прогнозы различной точности. Функционирование ВЭУ сопровождается длительными промежутками отключения или работы на пониженной мощности, связанными как с регламентными работами на станциях, так и с особыми



метеорологическими условиями (например, облещением). Причины каждого конкретного отклонения режима функционирования ВЭУ от нормального неизвестны, поэтому работа с выборкой крайне затруднительна.

Мощность воздушного потока зависит не только от скорости, но и от плотности воздуха [4]. Мы не располагаем данными о параметрах, связанных с плотностью (температура, влажность и т. д.). Однако косвенно они могут быть связаны с порядковым номером дня в году (временем года) и временем суток [5].

Применим деревья регрессии [6] для принятия решения о включении факторов в модель. Построение бинарного дерева представляет собой пошаговую процедуру разбиения подмножеств обучающей выборки на две части гиперплоскостью, перпендикулярной оси выбранного фактора и проходящей через точку разбиения так, чтобы сумма дисперсий выходных значений в получаемых подмножествах была минимальна. Дерево регрессии позволяет последовательно разбивать имеющийся набор данных на подмножества с различными выборочными средними. Таким образом, разбиение по какому-либо фактору свидетельствует об изменении выборочной средней, а следовательно, о наличии некоторой зависимости выходной

величины от этого фактора. По этой причине факторы, по которым проводились разбиения, будем считать значимыми.

При построении дерева регрессии определяем следующее правило остановки: любое из полученных в результате разбиения подмножеств должно содержать не менее 500 выборочных значений. Данное правило предотвращает выбор факторов, существенных лишь для небольших подмножеств данных (менее 5 % обучающей выборки).

Дерево регрессии для ветряной станции 1 изображено на рис. 1. В узлах дерева находятся условия, в соответствии с которыми осуществляется бинарное разбиение выборки. В конечных узлах дерева указаны значения средних мощностей – выходных величин, соответствующих областей кусочно-постоянных аппроксимаций, которые представляют собой дерево. Первое разбиение было произведено по скорости ветра: для всех первого подмножества скорость ветра меньше 4,9 м/с (верхняя альтернатива), для всех точек второго – больше 4,9 м/с. Каждое из полученных подмножеств было в свою очередь разбито на два подмножества. Процесс продолжается, пока не нарушается требование к размеру минимального листа дерева.

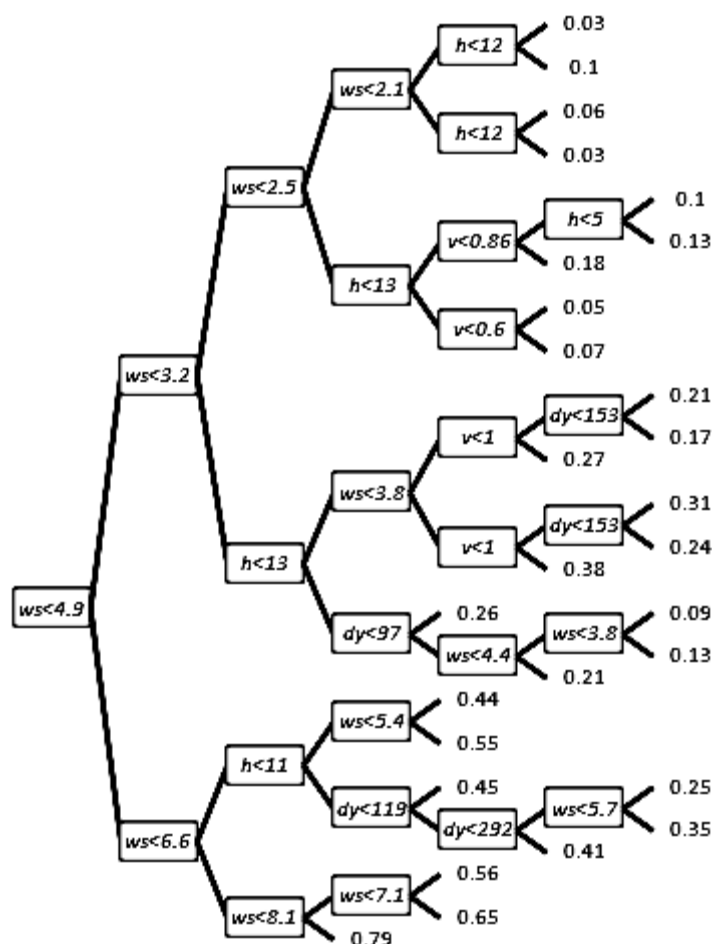


Рис. 1. Дерево регрессии для первой из семи ВЭУ:  
верхняя альтернатива – соблюдение неравенств, нижняя – нарушение;  $ws$  – скорость ветра;  $h$  – час;  
 $dy$  – порядковый номер дня в году;  $v$  – зональная компонента скорости ветра

## Значимость факторов

| Фактор                                   | ВЭУ |   |   |   |   |   |   |
|------------------------------------------|-----|---|---|---|---|---|---|
|                                          | 1   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Зональная компонента скорости ветра      | –   | + | + | + | – | + | + |
| Меридиональная компонента скорости ветра | +   | + | + | + | + | + | + |
| Направление ветра                        | –   | + | – | – | + | – | + |
| Скорость ветра                           | +   | + | + | + | + | + | + |
| Год                                      | –   | – | – | – | + | – | – |
| Месяц                                    | –   | – | – | – | – | – | – |
| День месяца                              | –   | – | – | – | – | – | – |
| Час                                      | +   | + | + | + | + | + | + |
| День в году                              | +   | + | – | – | + | + | + |

Для каждого подмножества итогового разбиения была вычислена средняя выходная мощность. Например, при условиях «скорость ветра меньше 2,1 м/с» и «порядковый номер часа в сутках меньше 12» средняя относительная мощность составляет 0,03, а при условиях «скорость ветра меньше 2,1 м/с» и «порядковый номер часа в сутках больше или равен 12» – 0,1.

В табл. знаком «+» отмечены факторы, по которым производились разбиения при построении деревьев для соответствующих ветряных установок (значимые факторы).

Факторы, значимость которых была установлена в процессе построения деревьев регрессий для пяти и более ветряных установок, были включены в модель:  $x^1$  – зональная компонента скорости ветра;  $x^2$  – меридиональная компонента скорости ветра;  $x^3$  – скорость ветра;  $x^4$  – порядковый номер часа в сутках;  $x^5$  – порядковый номер дня в году. К этому набору факторов последовательно добавлялись скорости ветра в районах соседних установок: сначала фактор  $x^6$  должен в наибольшей степени улучшать качество модели, затем фактор  $x^7$  выбирается с тем же условием.

После выбора значимых факторов необходимо провести предварительную обработку данных. Электрические генераторы характеризуются монотонно возрастающей зависимостью выходной мощности от скорости ветра. Отдельные фрагменты в обучающей выборке противоречат этому теоретическому результату. Следовательно, предполагается наличие аномалий в измерениях соответствующих величин. Другое предположение заключается в том, что данные в этих областях получены во время нештатного функционирования ВЭУ. Были замечены два типичных случая аномальных данных:

- высокая мощность при слабом ветре;
- низкая мощность при сильном ветре.

Первый случай может быть связан с ошибками в прогнозе погоды; второй – как с ошибками в прогнозах, так и с аномальным функционированием ветряной электростанции. Измерения, соответствующие перечисленным случаям, были исключены.

Прогнозируемую величину (выходную мощность ВЭУ) обозначим  $y$ , объем выборки –  $n$ . Для предска-

зания выходной мощности использован непараметрический алгоритм  $k$  ближайших соседей [7; 8]. Выбор алгоритма обусловлен следующими причинами:

- интерпретируемостью модели. Алгоритм  $k$  ближайших соседей позволяет осуществлять прогноз, основываясь на наиболее похожих ситуациях (ближайших соседях) в прошлом в соответствии с выбранным расстоянием. Прогнозирование выполняется простым или взвешенным усреднением выходных значений  $k$  ближайших соседей;

- циклическим характером некоторых факторов. Среди факторов, включенных в модель, есть циклические (час и порядковый номер дня в году). Алгоритм  $k$  ближайших соседей может работать с ними (в отличие, например, от деревьев регрессии);

- алгоритм не требует повторного обучения при поступлении новых данных.

Поиск ближайших соседей будем осуществлять в соответствии со следующими метриками:

1. Метрика в пространстве одного фактора:

$$d^j(x_p^j, x_q^j) = |x_p^j - x_q^j|, j = 1, 2, 3, 6, 7,$$

$$p = 1, 2, \dots, n, q = 1, 2, \dots, n,$$

где  $j$  – порядковые номера признаков, для которых метрика применима;  $p$  и  $q$  – порядковые номера наблюдений, упорядоченных по времени их поступления.

2. Метрика в пространстве одного циклического фактора:

- порядковый номер часа в сутках:

$$d^4(x_p^4, x_q^4) = \begin{cases} |x_p^4 - x_q^4|, & |x_p^4 - x_q^4| < 24 - |x_p^4 - x_q^4|, \\ 24 - |x_p^4 - x_q^4|, & |x_p^4 - x_q^4| \geq 24 - |x_p^4 - x_q^4|, \end{cases}$$

$$p = 1, 2, \dots, n, q = 1, 2, \dots, n;$$

- порядковый номер дня в году:

$$d^5(x_p^5, x_q^5) = \begin{cases} |x_p^5 - x_q^5|, & |x_p^5 - x_q^5| < 365 - |x_p^5 - x_q^5|, \\ 365 - |x_p^5 - x_q^5|, & |x_p^5 - x_q^5| \geq 365 - |x_p^5 - x_q^5|, \end{cases}$$

$$p = 1, 2, \dots, n, q = 1, 2, \dots, n.$$

3. Метрика в пространстве всех факторов взвешенную сумму метрик в пространстве одного фактора:

$$D(\bar{x}_p, \bar{x}_q, \bar{w}) = \sum_{j=1}^7 w^j d^j(x_p^j, x_q^j),$$

$$p = 1, 2, \dots, n, \quad q = 1, 2, \dots, n,$$

где  $w^j$  – соответствующие различным признакам веса, подлежащие оптимизации в соответствии с критерием качества, который будет рассмотрен ниже.

Модель  $k$  ближайших соседей имеет вид [7]:

$$\hat{y}(\bar{x}, \bar{w}) = \frac{\sum_{q=1}^n \varphi(\bar{x}, \bar{x}_q, \bar{w}) y_q}{\sum_{q=1}^n \varphi(\bar{x}, \bar{x}_q, \bar{w})}, \quad (1)$$

где

$$\varphi(\bar{x}, \bar{x}_q, \bar{w}) = \begin{cases} D(\bar{x}, k, \bar{w}) - D(\bar{x}, \bar{x}_q, \bar{w}), & D(\bar{x}, \bar{x}_q, \bar{w}) \leq \lambda(\bar{x}, k), \\ 0, & D(\bar{x}, \bar{x}_q, \bar{w}) > \lambda(\bar{x}, k), \end{cases}$$

здесь  $k$  – количество соседей,  $\lambda(\bar{x}, k)$  – расстояние между  $\bar{x}$  и  $k$ -м ближайшим соседом,  $y_q$  – выходная мощность ВЭУ для выборочного элемента с индексом  $q$ .

Анализ выборочных данных показал, что встречаются ситуации, когда метеорологические прогнозы слабо отличаются друг от друга в течение некоторого промежутка времени. Ближайшие по времени наблюдения, таким образом, будут являться заведомо «хорошими» соседями. Данный эффект приводит к занижению количества ближайших соседей и переобучению при оптимизации модели с использованием критерия  $Q$ -кратной кросс-проверки. Идея  $Q$ -кратной кросс-проверки состоит в выделении в обучающей выборки ( $V$ ) на  $Q$  непересекающихся подмножеств случайным

образом ( $V_l, l = 1, 2, \dots, Q, \bigcup_{l=1}^Q V_l = V, \bigcap_{l=1}^Q V_l = \emptyset$ ), по-

строении модели  $Q$  раз, при этом каждый раз одно из подмножеств не участвует в построении модели, а используется как тестовая выборка, ошибки  $Q$  моделей суммируются [9]:

$$\sum_{l=1}^Q \sum_{i \in V_l} (y_i - \hat{y}(\bar{x}_i, \bar{w}, V \setminus V_l))^2 \rightarrow \min_{\bar{w}, k}, \quad (2)$$

где

$$\hat{y}(\bar{x}_i, \bar{w}, V \setminus V_l) = \frac{\sum_{\substack{q=1 \\ \bar{x}_q \notin V_l}}^n \varphi(\bar{x}_i, \bar{x}_q, \bar{w}) y_q}{\sum_{\substack{q=1 \\ \bar{x}_q \notin V_l}}^n \varphi(\bar{x}_i, \bar{x}_q, \bar{w})}.$$

Модель, оптимизированная по критерию (2), будет демонстрировать высокое качество краткосрочного

прогнозирования (1...2 ч), однако она будет иметь большие ошибки при долгосрочных прогнозах (до  $A = 48$  ч).

При настройке параметров  $\bar{w}$  и  $k$  исключаем  $A$  ближайших по времени к проверочному множеству наблюдений из обучающей выборки. Для оптимизации параметров модели (1) был использован следующий критерий:

$$\sum_l \sum_{i \in V_l} (y_i - \hat{y}(\bar{x}_i, \bar{w}, T_l))^2 \rightarrow \min_{\bar{w}, k},$$

$V_l = ((\bar{x}_{\lambda(l)}, y_{\lambda(l)}), (\bar{x}_{\lambda(l)+1}, y_{\lambda(l)+1}), \dots, (\bar{x}_{\lambda(l)+B-1}, y_{\lambda(l)+B-1}))$ ,  $l = 1, 2, \dots, S$  – проверочные множества,  $S$  – количество проверочных множеств,  $\lambda(l) = n - S(A + B) + (A + B)(l - 1)$ ,  $k$  ближайших соседей отыскиваются из тестовых множеств:  $T_l = ((\bar{x}_q, y_q) : \forall (\bar{x}_p, y_p) \in \in V_l | q - p| > A), q = 1, 2, \dots, n, p = 1, 2, \dots, n$ .

Были использованы следующие параметры алгоритма кросс-проверки:  $B = 36; S = 155$ .

Для любого  $\bar{w}$  количество соседей  $k$  выбиралось методом полного перебора в диапазоне от 1 до 250. Оптимизация по параметрам  $\bar{w}$  выполнялось с помощью модифицированного покоординатного спуска.

С целью улучшения качества модели применялось сглаживание результатов прогнозирования по времени с использованием скользящего среднего:

$$\tilde{y}(\bar{x}_p) = \frac{\sum_{i=p-c}^c \hat{y}(\bar{x}_{p+i}, \bar{w})}{2c + 1}. \quad (3)$$

Ширина окна сглаживания  $c = 2$  была выбрана из условия минимума критерия:

$$\sum_l \sum_{i \in V_l} (y_i - \tilde{y}(\bar{x}_i))^2 \rightarrow \min_c.$$

Если известны значения мощности ветряной установки в моменты времени  $p - 2$  и  $p - 1$  ( $y_{p-2}$  и  $y_{p-1}$ ),

тогда будем использовать их вместо  $\hat{y}(\bar{x}_{p-2})$  и  $\hat{y}(\bar{x}_{p-1})$  в выражение (2). Процедура скользящего среднего приводит к уменьшению ошибок в модели, связанных с временными сдвигами прогноза погоды.

Модель (3) была проверена на тестовой выборке [2]. Среднеквадратическая ошибка приняла значение 0,1472. Так как прогнозируемая величина является нормированной, в процентном отношении ошибка составляет 14,72 %. Фрагмент сравнения выборочных значений мощности и выхода модели (3) представлен на рис. 2.

При построении модели были последовательно использованы две процедуры усреднения: вначале – в пространстве факторов, затем – по времени, что привело к сглаживанию прогноза. Тем не менее модель позволяет определить положение практически всех экстремумов функции мощности от времени, а по значению среднеквадратической ошибки предложенная модель на конкурсе [3] заняла второе место.

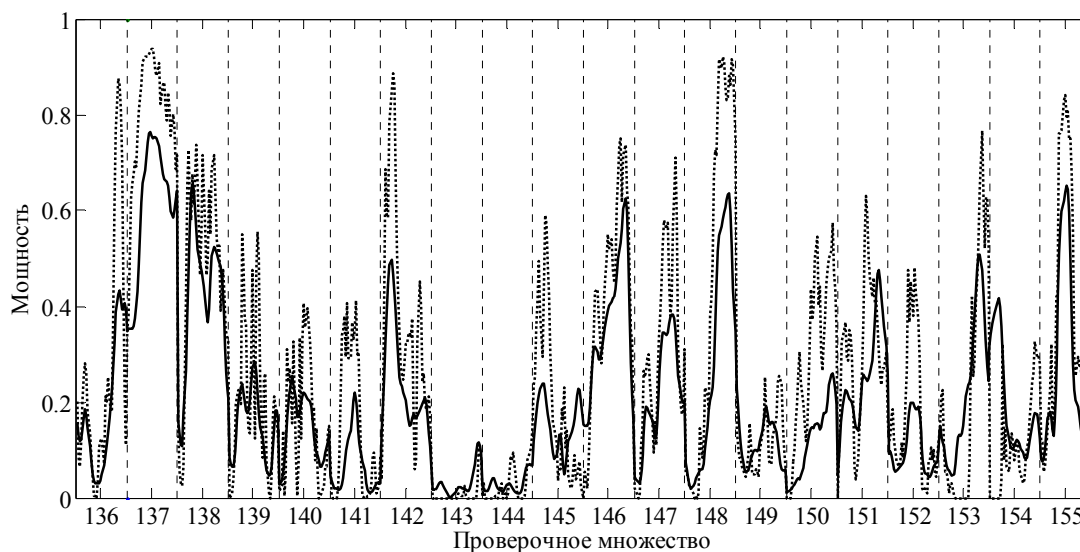


Рис. 2. Сравнение выборки (пунктирная линия) и выхода модели (сплошная линия) для последних двадцати проверочных множеств

Таким образом, построена непараметрическая модель  $k$  ближайших соседей. С использованием построенной модели решена задача прогнозирования мощности ветряных электрических установок.

С использованием полученной модели могут быть решены задачи прогнозирования выходной мощности для индивидуальных ВЭУ. Качественный прогноз производства электроэнергии ветряными станциями совместно с прогнозом суточного потребления позволяет минимизировать расходы, связанные с использованием резервных мощностей: снизить сжигание органического топлива, уменьшить общее число вынужденных дорогостоящих запусков и остановок резервных тепловых электростанций. Резервным электростанциям требуется значительное время от запуска до начала генерации энергии. Прогнозирование выходной мощности ВЭУ позволит выводить резервные электростанции на требуемые мощности в случае необходимости заранее.

#### Библиографические ссылки

1. Энергоэффективные технологии «Сименс» в России [Электронный ресурс]. URL: <http://w3.siemens.ru/energy-efficiency/energy-efficiency.html> (дата обращения: 08.02.2013).
2. РБК Исследования рынков. Совокупная мощность ветряных электростанций России составила 15,4 МВт. [Электронный ресурс]. URL: [http://marketing.rbc.ru/news\\_research/24/10/2012/562949984996362.shtml](http://marketing.rbc.ru/news_research/24/10/2012/562949984996362.shtml) (дата обращения: 08.02.2013).
3. Global Energy Forecasting Competition 2012, wind forecasting [Electronic resource]. URL: <http://www.kaggle.com/c/GEF2012-wind-forecasting> (date of visit: 08.02.2013).
4. Crogg K. Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines [Electronic resource]. URL: <https://dspace.lasrworks.org/bitstream/handle/10349/145/fulltext.pdf>. Retrieved 2013-01-11 (date of visit: 08.02.2013).

5. Global Energy Forecasting Competition 2012, Load Forecasting. Data files [Electronic resource]. URL: <http://www.kaggle.com/c/global-energy-forecasting-competition-2012-load-forecasting/data> (date of visit: 08.02.2013).

6. Classification and Regression Trees / L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, C. J. Stone. Wadsworth Inc., 1984.

7. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М.: Мир, 1993.

8. Зайцева Е. А., Бурулев Е. В., Медведев А. В. Непараметрические модели и алгоритмы принятия решений // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 6. С. 17–22.

9. Воронцов К. В. Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов // Математические вопросы кибернетики / под ред. О. Б. Лупанова. М.: Физматлит, 2004. Т. 13. С. 5–36.

#### References

1. *Energoeffektivnye tehnologii "Siemens" v Rossii* (Energy-efficient technologies "Siemens" in Russia). Available at: <http://w3.siemens.ru/energy-efficiency/energy-efficiency.html> (accessed 15 april 2013).
2. *RBK Issledovaniya rynkov. Sovokupnaya moshnost vetryanykh elektrostancii Rossii sostavila 15.4 MVt* (RBC Market Research. The aggregate capacity of wind power plants in Russia amounted to 15.4 MW.). Available at: [http://marketing.rbc.ru/news\\_research/24/10/2012/562949984996362.shtml](http://marketing.rbc.ru/news_research/24/10/2012/562949984996362.shtml) (accessed 15 april 2013).
3. Global Energy Forecasting Competition 2012, wind forecasting. Available at: <http://www.kaggle.com/c/GEF2012-wind-forecasting> (accessed 15 april 2013).
4. Crogg K. Harvesting the Wind: The Physics of Wind Turbines. Available at: <https://dspace.lasrworks.org/bitstream/handle/10349/145/fulltext.pdf>. Retrieved 2013-01-11 (accessed 15 april 2013).
5. Global Energy Forecasting Competition 2012 – Load Forecasting. Data files. Available at: <http://www.kaggle.com/>

c/global-energy-forecasting-competition-2012-load-forecasting/data (accessed 15 april 2013).

6. Breiman L., Friedman J. H., Olshen R. A., Stone C. J. Classification and Regression Trees. Wadsworth Inc, 1984.

7. Hardle V. *Prikladnaya neparametricheskaya regressiya* (Applied nonparametric regression). Moscow, 1993. 349 p.

8. Zaytceva E. A., Burulev E. B., Medvedev A.V. *Vestnik SibGAU*. 2005, no. 6, pp. 17–22.

9. Vorontsov K. V. *Matematicheskie voprosy kibernetiki*, 2004, vol. 13, pp. 5–36.

© Агафонов Е. Д., Мангалова Е. С., Шестернева О. В., 2013

УДК 658.5.011.56:002.6

## ПОДДЕРЖКА ДАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СРЕДЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

А. А. Бикчентаев

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Россия, 662972, Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: ayrat715@iss-reshetnev.ru

*Рассматривается задача поддержки данных технологических процессов, необходимых для автоматизированных систем, входящих в состав интегрированной информационной среды предприятия. Подчеркивается, что суть данной задачи заключается в переориентации процесса технологического проектирования с выпуска и сопровождения документации на работу с электронными данными. Рассматривается способ ее решения с использованием современных средств автоматизации технологического проектирования. Указывается, что этот способ требует дополнительных затрат на обеспечение надежной работы с данными. Предлагается новый способ решения обозначенной проблемы, имеющий ряд преимуществ. Указывается, что предлагаемый способ обеспечивает надежность данных ТП и имеет ряд преимуществ, таких как более высокая скорость обработки данных и использование пользователем интерфейса одной программы.*

*Ключевые слова:* автоматизация, технологический процесс, интеграция, данные.

## SUPPORT OF DATA OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN INTEGRATED INFORMATION ENVIRONMENT OF AN ENTERPRISE

A. A. Bikchentaev

JSC “Information Satellite Systems” named after academician M. F. Reshetnev”  
52 Lenin st., Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: ayrat715@iss-reshetnev.ru

*In the work the author considers the problem of support of technological processes necessary for automation systems that are included in entire information environment of an enterprise. The author points out that the truth of the matter is in reorientation of the process of technological design from release and support of the documentation to electronic data management. The way of its solution, with the use of the modern facilities for automation of technological design, is under consideration. The author points out that this way requires extra costs to provide safe dealing with data and offers a new way for this problem solution, which has number of advantages. The author emphasizes that the introduced way provides safety of data of technological processes and has several advantages, such as higher speed of data processing and usage of single interface by the user.*

*Keywords:* automation, technological process, integration, data.

В основе эффективной автоматизации предприятия лежит построение интегрированной информационной среды [1; 2]. Интегрированная информационная среда – совокупность распределенных баз данных, содержащих сведения об изделиях, производственной среде, ресурсах и процессах предприятия, обеспечивающая корректность, актуальность, сохранность и доступность данных для тех субъектов производственно-хозяйственной деятельности, участвующих

в осуществлении жизненного цикла изделий, кому это необходимо и разрешено [3].

Одним из препятствий на пути создания интегрированной информационной среды является ориентация части бизнес-процессов предприятия на выпуск и сопровождение документов. При этом могут требоваться дополнительные организационные усилия и временные затраты на получение и поддержку данных, содержащихся в этих документах, в базах

автоматизированных систем, входящих в состав интегрированной информационной среды.

Показательным примером является разработка технологических процессов.

Государственные стандарты системы единой технологической документации (ЕСТД) определяют, что результатом разработки технологических процессов (ТП) должны являться документы, имеющие определенную структуру и форму оформления. ЕСТД была и остается до сих пор необходимой составляющей технологического проектирования.

В то же время данные технологических процессов в электронном виде необходимы для эффективной автоматизации других бизнес-процессов предприятия, входящих в состав технологической подготовки производства. В первую очередь это планирование проектирования, изготовления и использования средств технологического оснащения, а также нормирование. Кроме того, наличие источника актуальных и корректных электронных данных технологических процессов необходимо для повышения управляемости и контролируемости процессов технологической подготовки производства.

Таким образом, в системах автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов должны осуществляться подготовка технологической документации и выполняться сопровождение данных в интегрированной информационной среде предприятия.

Рассмотрим, как решается описанная проблема в существующих САПР ТП.

**Решение с использованием существующих САПР ТП.** Крупнейшие поставщики программного обеспечения для предприятий на отечественном рынке, такие как АСКОН, SDI Solution, SolidWorks и др., включают САПР ТП в комплекс интегрированных между собой автоматизированных систем, ядром которого является автоматизированная система управления данными об изделии (АСУДИ, далее – система управления данными)\*. Системы данного класса нацелены на обеспечение полноты, целостности и актуальности информации об изделии в любой момент вре-

мени и ее доступности всем участникам жизненного цикла в соответствии с имеющимися у них правами [1].

Работа с документами и данными технологических процессов в существующих системах автоматизации технологического проектирования осуществляется следующим образом [4; 5]: Пользователь использует САПР ТП для работы с данными технологических процессов, а система управления данными – для управления сформированными в САПР ТП файлами, процессами их согласования и осуществления над ними операций жизненного цикла.

САПР ТП позволяет формировать и размещать в системе управления данными два вида файлов: файлы данных и файлы документов.

Первые предназначены для хранения данных технологического процесса, получаемых в результате проектирования. Загрузка технологического процесса из системы управления данными и его сохранение в ней происходит посредством использования файлов данных.

Файлы документов представляют собой результат технологического проектирования, представленный в соответствии с требованиями стандартов ЕСТД.

Схематично работа пользователя с документами и данными технологических процессов в существующих решениях представлена на рис. 1.

Обратим внимание на следующие особенности данной схемы:

- данные технологического процесса сохраняются в системе управления данными в виде бинарного файла, ассоциированного с приложением САПР ТП;
- документация технологического процесса сохраняется в архиве системы управления данными. В статье [4] указано, что сохранение технологических карт в нейтральном формате (PDF, DOC, XLS, XPS) позволяет обходиться штатными средствами этой системы. Стоит отметить, что выбор формата PDF ограничивает возможность внесения изменений пользователем;
- сохранение в системе управления данными комплекта технологических карт происходит одновременно с сохранением файла технологического процесса.

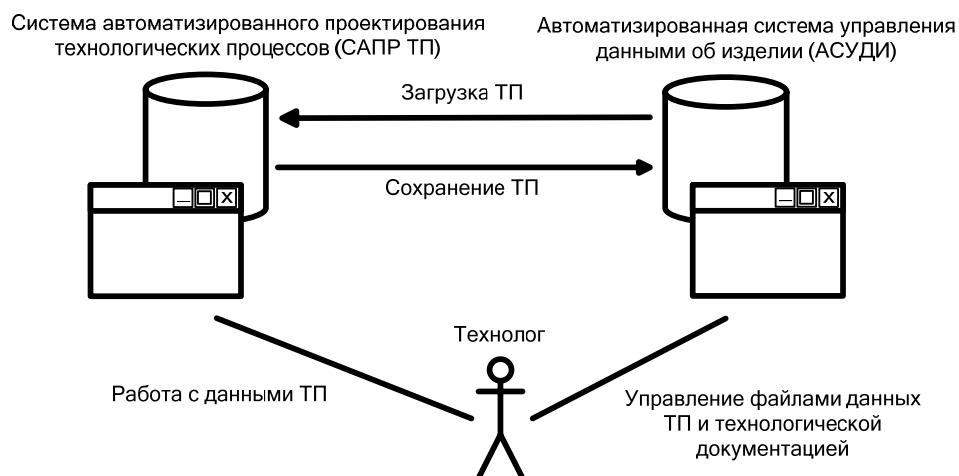


Рис. 1. Работа технолога с САПР ТП и АСУДИ в существующих комплексах автоматизированных систем

\* В англоязычной терминологии управление данными об изделии звучит как Product Data Management (PDM).

Проанализировав вышесказанное, можно сделать вывод о том, что существующий способ автоматизации технологического проектирования позволяет решить обозначенную проблему, так как при его использовании:

- данные технологических процессов размещаются в системе управления данными, откуда они могут быть доступны другим автоматизированным системам;
- соответствие данных технологического процесса и содержимого технологической документации достигается за счет использования PDF формата. Это вынуждает пользователя при необходимости внесения изменений в технологическую документацию вносить изменения в файл данных, используя САПР ТП.

Однако рассмотренный способ имеет ряд недостатков. Основной из них заключается в том, что пользователь имеет доступ в систему управления данными и может вручную управлять документами и данными технологических процессов. Наличие человеческого фактора не позволяет дать стопроцентную гарантию соответствия данных. Для того чтобы свести возможные последствия указанного недостатка к минимуму или полностью устранить их, нужны дополнительные организационные или технические изменения. Первые из них заключаются в обязательстве пользователя работать «правильным образом», т. е. размещать документы в системе управления данными не напрямую, а через интеграцию, реализованную в САПР ТП. Технические изменения заключаются в реализации профиля системы управления данными, обеспечивающего для пользователя описанные выше ограничения.

Второй недостаток – размещение данных в файлах, что приводит к относительно низкой скорости их обработки.

И, наконец, третий недостаток – необходимость для пользователя работы в двух системах: в САПР ТП для работы с данными технологических процессов и формирования документации и в системе управления данными для осуществления операций жизненного цикла и управления процессами согласования файлов. Это увеличивает необходимое количество действий пользователя, усложняет процесс его обучения, уменьшает удобство работы.

**Предлагаемое решение.** Предлагаемый способ организует взаимодействие между пользователем, САПР ТП и системой управления данными таким образом, чтобы пользователь не имел прямого доступа к системе управления данными, но мог управлять ее функциями через приложение САПР ТП (рис. 2). Для этого используется модуль интеграции, который может быть выполнен как часть приложения САПР ТП с использованием интерфейса программирования приложений системы управления данными. При этом доступ в систему управления данными осуществляется путем извлечения данных учетной записи этой системы из данных учетной записи САПР ТП.

Алгоритм вызова и выполнения функций системы управления данными представлен на рис. 3.

Данные учетной записи системы управления данными не разглашаются пользователю, за счет чего ограничивается его доступ в эту систему. Соответствие данных при этом достигается тем, что для формирования документов пользователю необходимо работать с данными в САПР ТП, так что эта система может использоваться как поставщик корректных и актуальных данных технологических процессов.

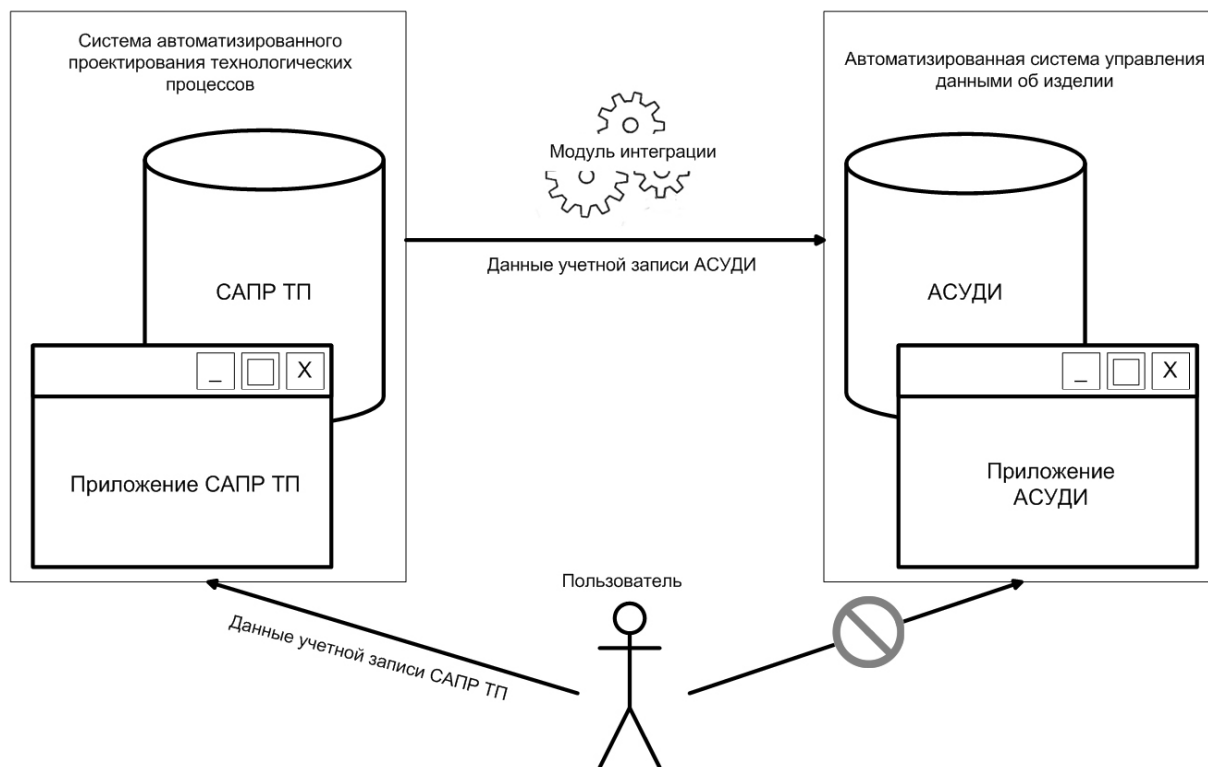


Рис. 2. Схема организации доступа в предлагаемом способе

Рассмотрим в качестве примера, как происходит внесение изменений в документ при его возврате на корректировку (рис. 4).

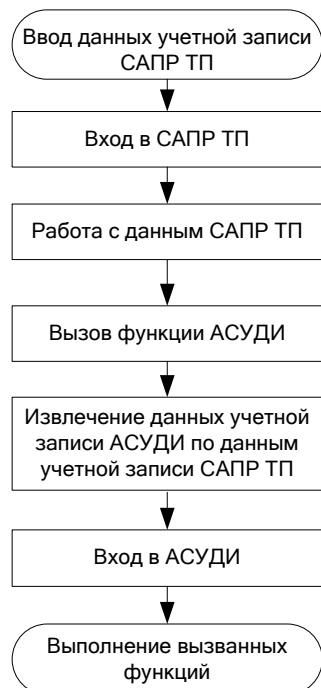


Рис. 3. Алгоритм вызова и выполнения функций АСУДИ

При появлении необходимости внесения изменений в электронный документ, размещенный в системе управления данными, пользователь оповещается об этом. Он вносит необходимые изменения в данные САПР ТП, вызывает функцию формирования новой версии электронного документа, которая автоматически размещается в системе управления данными. Таким образом, измененные версии документов формируются и размещаются в этой системе только после внесения изменений в базе данных САПР ТП.

Таким образом, предлагаемый способ имеет следующие преимущества:

- устраняется прямой доступ пользователя в систему управления данными и, следовательно, возможность

осуществления им действий, приводящих к несоответствию данных и содержимого документов технологических процессов;

- обеспечивается максимальная скорость обработки данных за счет использования базы данных САПР ТП для их хранения;

- пользователь осуществляет все операции по работе с данными и документами технологических процессов в одном приложении.

Ориентация части бизнес-процессов предприятия на выпуск документов делает актуальными задачи сопровождения их данных в электронном виде для создания и поддержки интегрированной информационной среды. Одним из таких процессов является технологическое проектирование. Оно нацелено на выпуск документации соответствующей ЕСТД. В то же время его выходные данные необходимы как минимум для автоматизации других процессов технологической подготовки производства.

Для решения обозначенной проблемы возможно использование современных средств автоматизации технологического проектирования. Однако при этом будут проявляться следующие недостатки:

- наличие прямого доступа пользователя в систему управления данными и возможность управления файлами и документами технологических процессов без использования интеграции с САПР ТП, что не позволяет гарантировать их соответствие;

- сравнительно низкая скорость обработки данных из-за их хранения в файлах;

- необходимость работы пользователя в двух приложениях различных систем.

Предложенный способ отличается тем, что основан на другом принципе интеграции САПР ТП с системой управления данными. Он позволяет решить обозначенную проблему без проявления недостатков предыдущего способа. При этом:

- надежность данных технологических процессов обеспечивается отсутствием прямого доступа пользователя к функциям системы управления данными;

- более высокая скорость обработки данных обеспечивается за счет их хранения в базе данных САПР ТП;

- пользователь может работать в приложении одной системы.

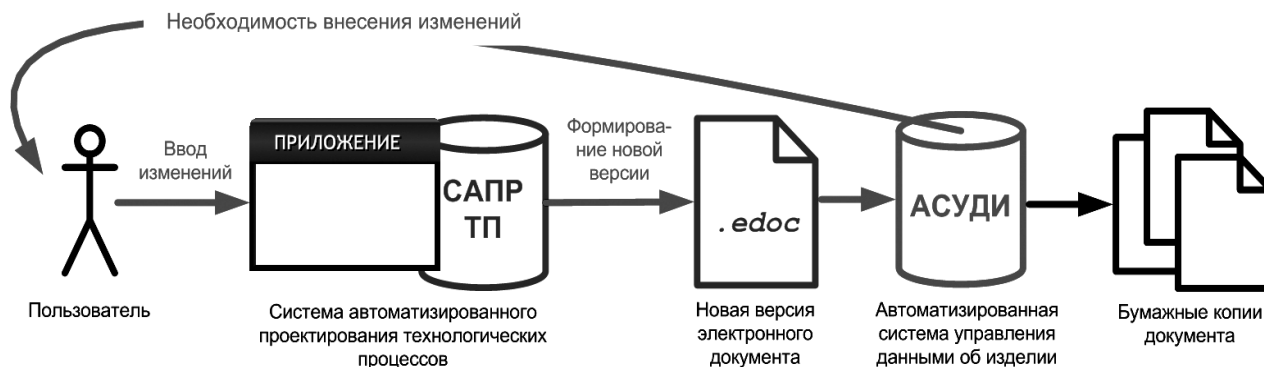


Рис. 4. Изменение документов при работе в САПР ТП и АСУДИ



### Библиографические ссылки

1. Судов Е. В., Левин А. И. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России [Электронный ресурс] // НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика». URL: [http://www.cals.ru/policy/material/concept\\_ipi.pdf](http://www.cals.ru/policy/material/concept_ipi.pdf) (дата обращения: 02.04.2013).
2. Черепашков А. А., Носов Н. В. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении : учебник для студентов высш. учеб. заведений. Волгоград : Ин-Фолио, 2009.
3. Р.50.1.031–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Ч. 1. Стадии жизненного цикла продукции : рекомендации по стандартизации / Госстандарт России. М. : Изд-во стандартов, 2001.
4. Андриченко А., Коптев А. Принципы интеграции PDM-систем и САПР технологических процессов [Электронный ресурс] // CAD/CAM/CAE Observer 2011. № 8 (68). URL: [http://www.sdi-solution.ru/images/articles/principy\\_vzaimodeistviya.pdf](http://www.sdi-solution.ru/images/articles/principy_vzaimodeistviya.pdf) (дата обращения: 02.04.2013).
5. Вертикаль. Система автоматизированного проектирования технологических процессов. Руководство пользователя. 2008 [Электронный ресурс]. URL: [http://sd.ascon.ru/ftp/Public/Documents/Vertical/VERTICAL\\_V3/VERTICAL\\_V3\\_.pdf](http://sd.ascon.ru/ftp/Public/Documents/Vertical/VERTICAL_V3/VERTICAL_V3_.pdf) (дата обращения: 02.04.2013).

### References

1. Sudov E. V., Levin A. I. *Kontseptsiya razvitiya CALS-tehnologiy v promyshlennosti Rossii* (Conception

of development of CALS technologies in Russia). Research center of CALS technologies «Prikladnaya logistika». Moscow, 2002. Available at: [http://www.cals.ru/policy/material/concept\\_ipi.pdf](http://www.cals.ru/policy/material/concept_ipi.pdf) (accessed 02 April 2013).

2. Cherepashkov A. A., Nosov N. V. *Komp'yuternye tekhnologii, modelirovanie i avtomatizirovannye sistemy v mashinostroenii* (Computer technologies, design, modeling and computer-aided systems in mechanical engineering). Textbook for higher school students. Volgograd, Publishing House «In-Folio», 2009, 640 p.

3. R.50.1.031-2001 *Informatsionnye tekhnologii podderzhki zhiznennogo tsikla produktsii. Terminologicheskii slovar'. Chast' 1. Stadii zhiznennogo tsikla produktsii* (Information technologies of life cycle of production support. Glossary. Part 1. Phases of life cycle of production). Recommendations for standardization; State Standard of Russia, Moscow. IPK Izdatel'stvo standartov, 2001, p. 27.

4. Andrichenko A., Koptev A. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2011, no. 8 (68). Available at: [http://www.sdi-solution.ru/images/articles/principy\\_vzaimodeistviya.pdf](http://www.sdi-solution.ru/images/articles/principy_vzaimodeistviya.pdf) (accessed 02 April 2013).

5. *Vertikal'. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov* (Vertikal. Computer-aided system of design of technological processes). User's manual. 2008. Available at: [http://sd.ascon.ru/ftp/Public/Documents/Vertical/VERTICAL\\_V3/VERTICAL\\_V3\\_.pdf](http://sd.ascon.ru/ftp/Public/Documents/Vertical/VERTICAL_V3/VERTICAL_V3_.pdf) (accessed 02 April 2013).

© Бикчентаев А. А., 2013

УДК 629.78

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С. А. Елубаев, Н. К. Джамалов, К. А. Алипбаев, А. С. Сухенко, Т. М. Бопеев

Дочернее товарищество с ограниченной ответственностью «Институт космической техники и технологии» акционерного общества «Национальный центр космических исследований и технологий» Республика Казахстан, 050063, Алматы, ул. Кисловодская, 34. E-mail: [alipbaev.k@istt.kz](mailto:alipbaev.k@istt.kz)

*В настоящее время имитационное моделирование в области проектирования космических систем является популярным средством для решения задач тестирования, проверки функциональности и отработки основных режимов работы систем управления космического аппарата. В данной статье изучены вопросы функционирования системы управления движением КА под воздействием внешних возмущающих факторов космической среды и управляющих сил и моментов с помощью имитационного моделирования. В связи с этим в Республике Казахстан силами отечественных специалистов проведены работы по разработке имитационных моделей систем управления КА, что позволит создать собственную научно-техническую базу для разработки систем управления движением и навигацией с учетом последних достижений науки и техники.*

*Ключевые слова:* космический аппарат, система управления движением, имитационное моделирование.

## SIMULATION MODELING OF THE MAIN COMPONENTS OF MOTION CONTROL SYSTEM OF THE SATELLITE

S. A. Yelubayev, N. K. Jamalov, K. A. Alipbayev, A. S. Sukhenko, T. M. Bopeyev

Subsidiary limited partnership "Institute of Space Technique and Technologies"  
of cooperative association "National Center of Space Research and Technologies"  
34 Kislovodskaya st., Almaty, 050063, Republic of Kazakhstan. E-mail: alipbaev.k@istt.kz

*At the present time simulation modeling is the popular tool for solution of problems of inspection of functionality and trial of the main modes of satellite control. The main task of this article is study of operation of motion control system of satellite under the influence of perturbing factors of space environment and control forces with the help of simulation modeling. In this regard the works on the development of simulation models of satellite control systems was carried out by home specialists in the Republic of Kazakhstan, which will allow to create the local scientific and technical basis for the development of motion control systems and navigation systems with the account of the latest achievements of science and technology.*

*Keywords: spacecraft, motion control system, simulation modeling.*

При движении космического аппарата (КА) по орбите на него действуют возмущающие факторы космической среды, такие как несферичность Земли, гравитационное влияние Луны, Солнца и планет, аэродинамическое сопротивление атмосферы Земли, магнитное поле Земли, силы давления солнечного света. Учет всех этих факторов при изучении движения космического аппарата является довольно сложной задачей. Кроме того, возникают задачи формирования управляющих воздействий с целью компенсации этих возмущений, изменения параметров орбиты или пространственной ориентации космического аппарата. Для нормального функционирования космического аппарата также необходимо решать вопросы энергоснабжения, связи с наземным комплексом управления и целый ряд других задач. Создание имитационных моделей значительно облегчает эти задачи. Для моделирования основных систем управления космического аппарата на данный момент существует большое количество специального программного обеспечения, которое, однако, не позволяет вносить изменения в код в соответствии с собственными требованиями. Следовательно, разработка собственных имитационных моделей систем управления КА позволит создать программно-математический аппарат для исследования и моделирования систем управления КА различного назначения. В данной статье рассматривается имитационная модель основных компонентов системы управления движением космического аппарата, разработанная в среде MathWorks MatLab/Simulink силами специалистов Института космической техники и технологий [1].

Разработанная имитационная модель, представленная на рис. 1, состоит следующих модулей: Environment, TotalForceAndMoment, Satellite, GroundControlStation, ReportingBlock, VisualizationBlock.

Модуль Environment представляет собой имитационную модель космической среды, представленной Землей, Луной и Солнцем. Входными параметрами модуля являются параметры космического аппарата (параметры орбиты, вектор положения и вектор скорости движения центра масс, угловое положение и угловая скорость движения относительно центра масс, массогабаритные и геометрические параметры космического аппарата). Выходными параметрами являются векторы сил и моментов сил от возмущающих

воздействий космической среды и параметры космической среды. Внутренняя структура модуля показана на рис. 2 и состоит из блоков Earth, Moon и Sun.

Блок Earth (рис. 3) представляет собой модель Земли и состоит из подблоков GravitationalField, AtmosphereField, MagneticField и Perturbation.

Подблоки GravitationalField, AtmosphereField и MagneticField представляют собой соответственно модели гравитационного поля, атмосферы и магнитного поля Земли и содержат внутреннюю структуру, построенную в соответствии с международными стандартами EGM2000, CIRA-96 и IGRF2010. В подблоке Perturbation формируется общее влияние Земли на движение космического аппарата.

Блок Moon представляет собой имитационную модель Луны, а блок Sun – имитационную модель Солнца, которые производят расчет гравитационных влияний Луны, Солнца и влияния сил давления солнечного света на движение космического аппарата.

В модуле TotalForceAndMoment формируются результирующие силы от возмущающих факторов космической среды и управляющих сил, сформированных системой управления, и моменты этих сил, действующие на движение космического аппарата [1].

Модуль Satellite представляет собой имитационную модель космического аппарата. Входными параметрами модуля являются возмущающие и управляющие силы и моменты, параметры космической среды и параметры наземного комплекса управления. Выходными параметрами являются параметры космического аппарата: параметры движения (вектор положения, вектор скорости), параметры ориентации (угловое положение и угловая скорость), масса, геометрические параметры, параметры системы ориентации, параметры системы связи, параметры системы энергоснабжения – и управляющие воздействия, сформированные системой управления [2]. В этом модуле для каждого изучаемого космического аппарата необходимо отдельно задавать массогабаритные и геометрические параметры космического аппарата.

Внутренняя структура модуля Satellite представлена на рис. 4 и содержит блоки Motion, OrientationSystem, OnBoardSystem Emulator, CommunicationsSystem, PowerSystem.

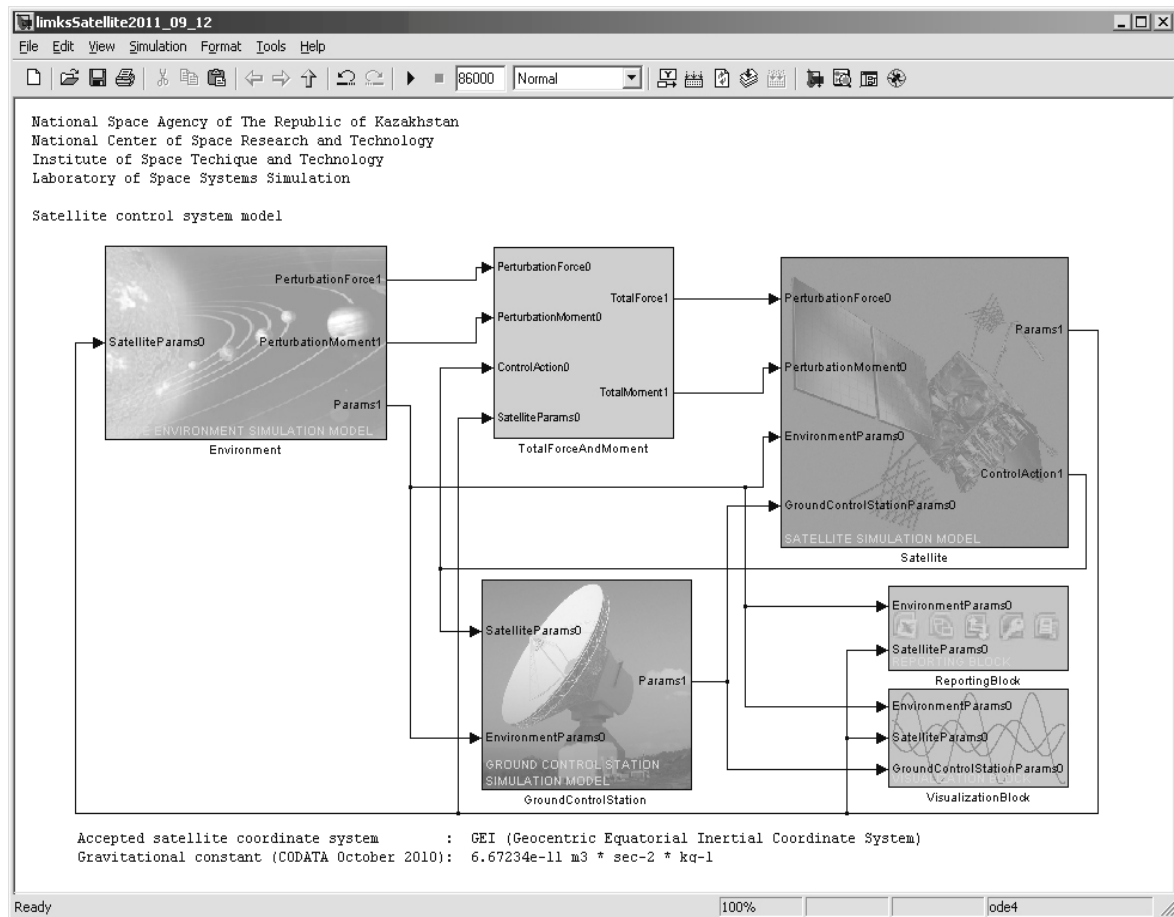


Рис. 1. Имитационная модель системы управления движением космического аппарата

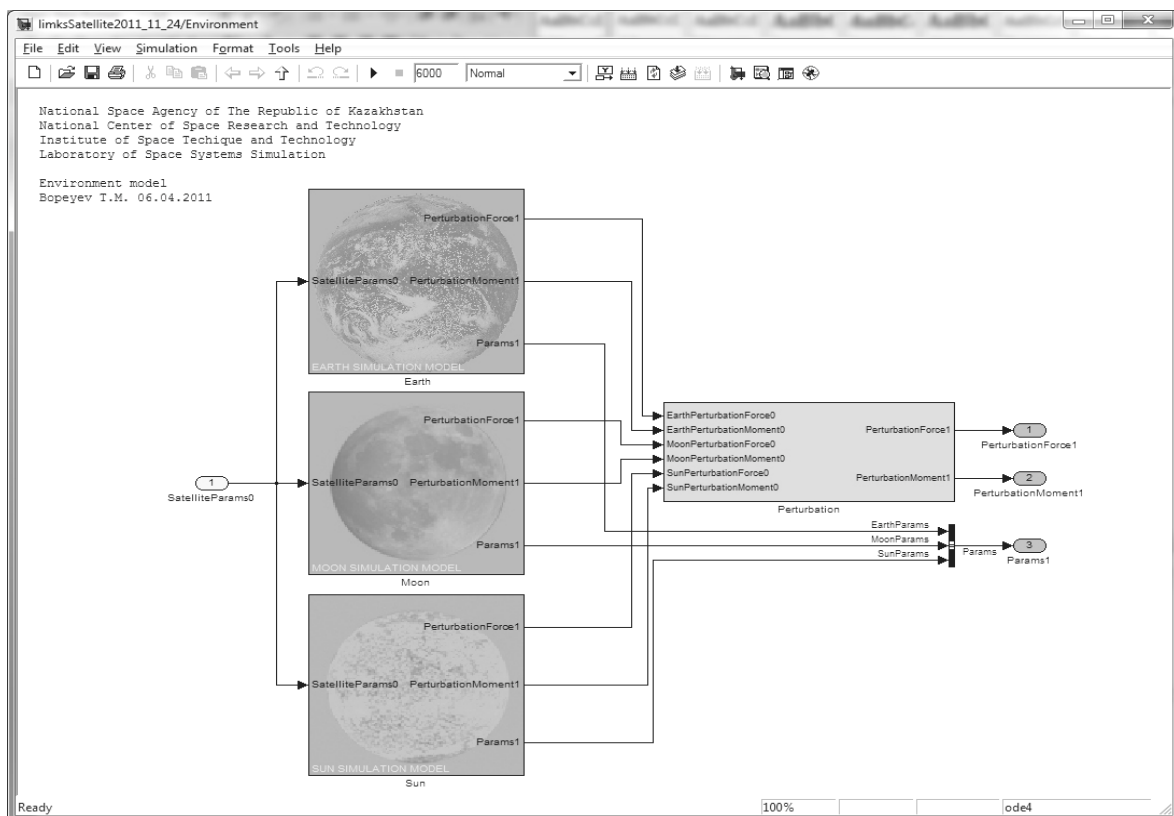


Рис. 2. Имитационная модель космической среды

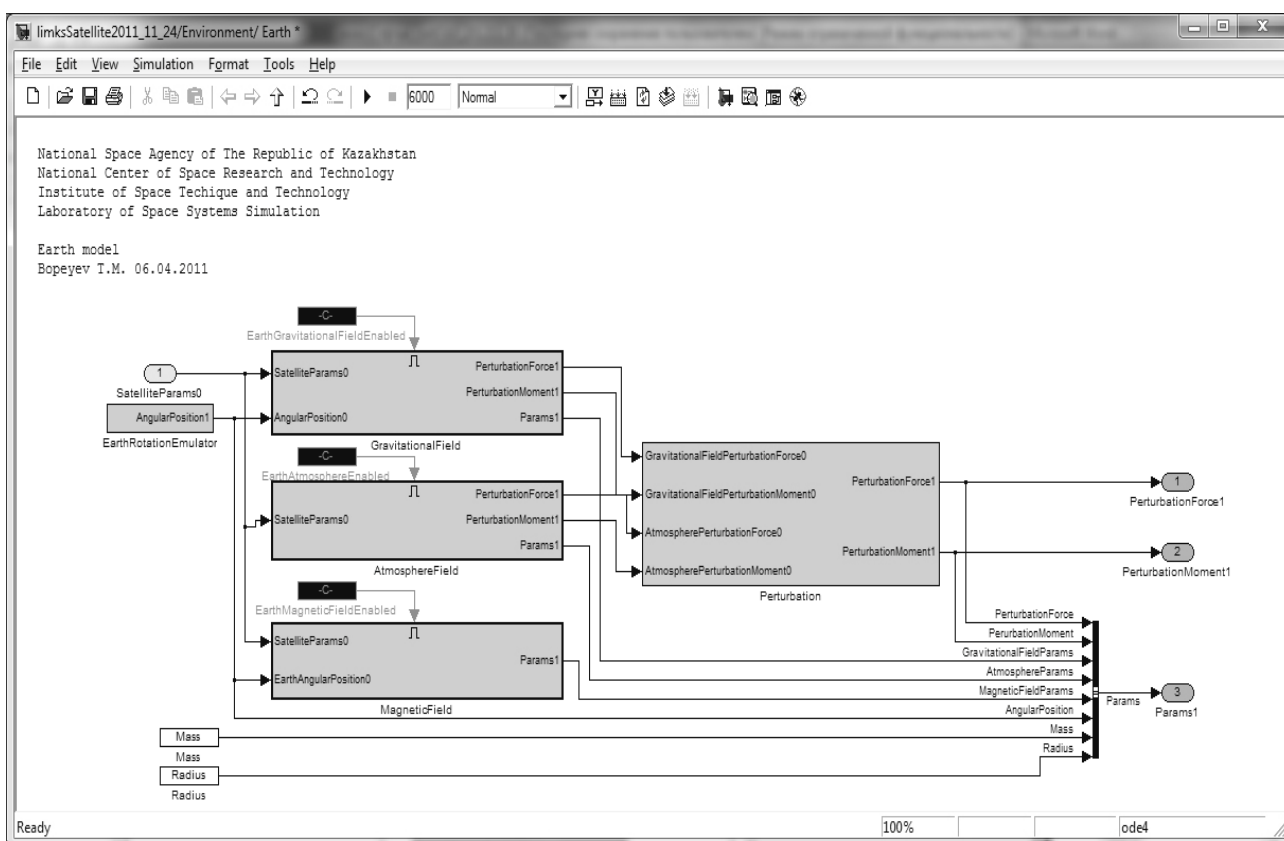


Рис. 3. Имитационная модель Земли

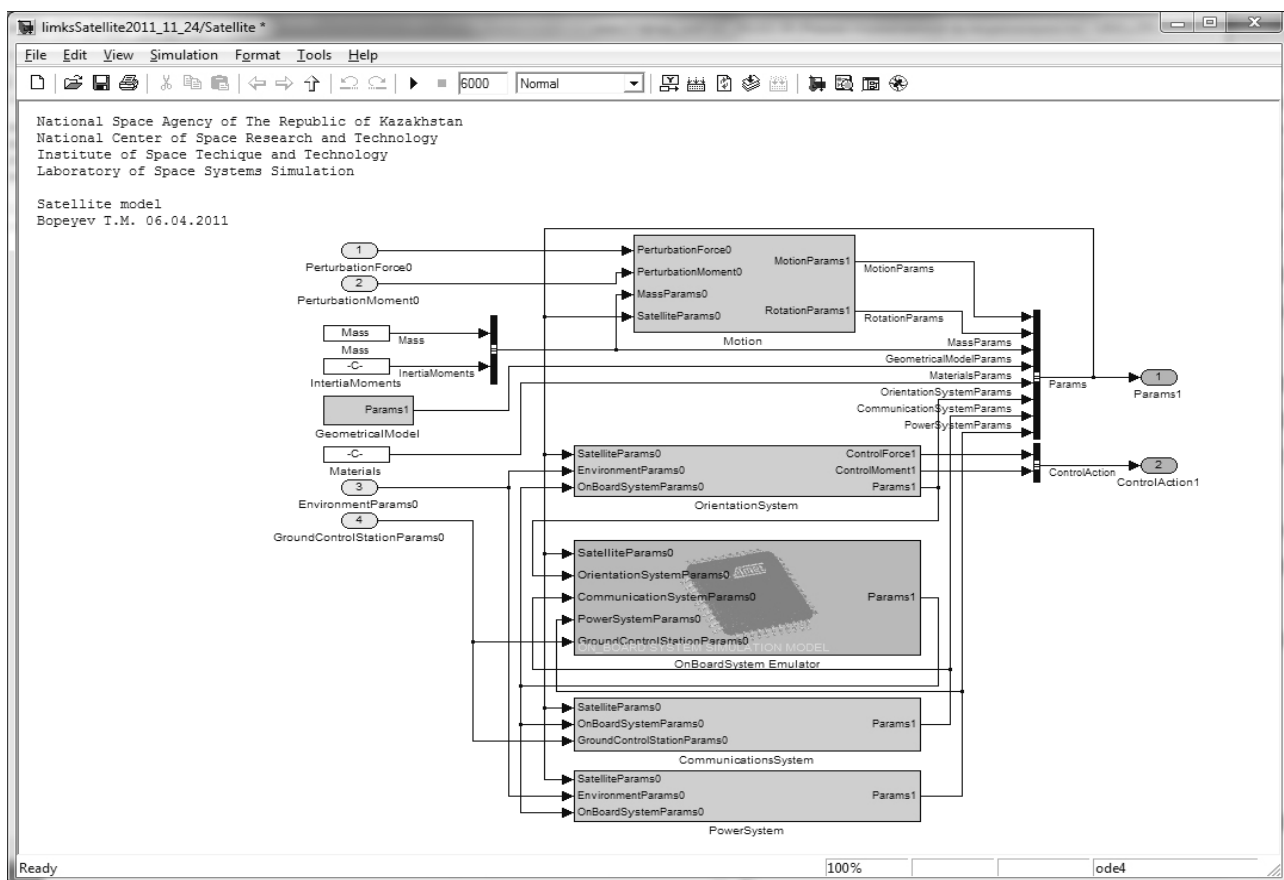


Рис. 4. Имитационная модель космического аппарата

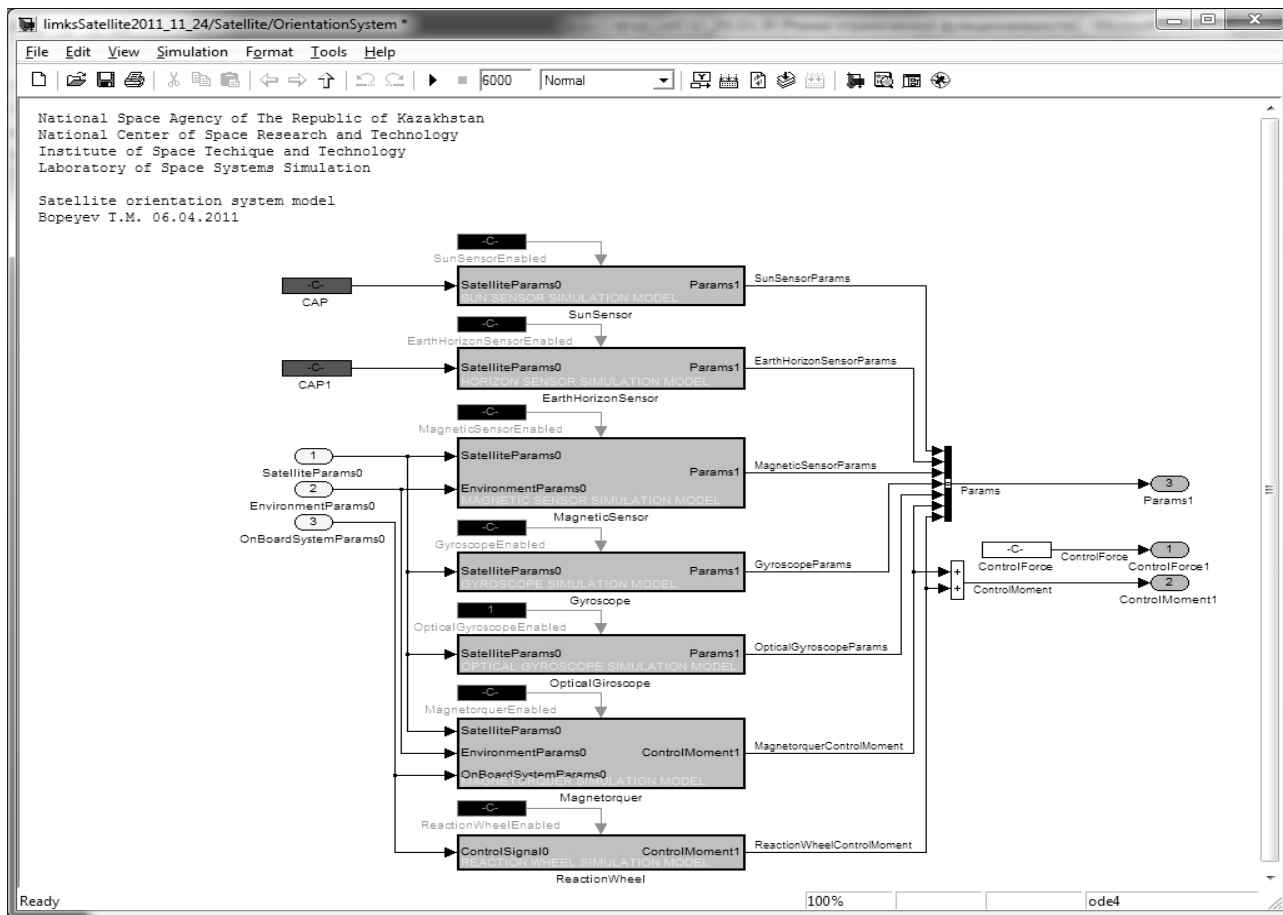


Рис. 5. Имитационная модель системы ориентации космического аппарата

Блок Motion моделирует движение как центра масс космического аппарата, так и движение космического аппарата относительно центра масс с учетом возмущающих и управляющих сил [3]. Блок содержит внутреннюю структуру, выполненную в соответствии с общими законами движения центра масс и относительно центра масс космического аппарата.

Блок OrientationSystem представляет собой модель системы ориентации космического аппарата. Внутренняя структура блока приведена на рис. 5 и представлена моделями солнечного датчика SunSensor, датчика горизонта Земли EarthHorizonSensor [4], магнитного датчика MagneticSensor, механического гироскопического датчика Gyroscope, оптического гироскопического датчика OpticalGyroscope [5], электромагнитного исполнительного органа Magnetorquer и инерционных исполнительных органов-маховиков ReactionWheel. Таким образом, блок представляет собой набор моделей датчиков ориентации и исполнительных органов системы ориентации [2]. Та или иная модель датчиков или исполнительных органов по желанию пользователя может быть включена или исключена из модели системы ориентации. Выходные параметры моделей датчиков ориентации подаются на вход модели бортового комплекса управления, где управляющие воздействия моделируются в соответ-

ствии с заданными законами управления и подаются на входы моделей исполнительных органов.

Блок OnBoardSystem Emulator моделирует работу бортового комплекса управления. На вход блока подается информация от всех остальных блоков космического аппарата, а на выход – управляющие воздействия для модели системы ориентации, системы связи и системы энергоснабжения. Таким образом, блок является замкнутой системой.

Блок CommunicationsSystem моделирует работу системы связи с наземным комплексом управления. Блок содержит внутреннюю структуру, которая моделирует работу приема-передающих устройств.

Блок PowerSystem представляет собой имитационную модель системы энергоснабжения космического аппарата. Блок также содержит внутреннюю структуру, моделирующую работу солнечных и аккумуляторных батарей.

Модуль GroundControlStation представляет собой имитационную модель наземного комплекса управления, внутренняя структура которой также представлена моделями приема-передающих устройств.

Кроме того, модель содержит дополнительные модули. Модуль ReportingBlock служит для экспорта результатов имитационного моделирования движения космического аппарата в различные форматы данных

для их последующей обработки и анализа. Модуль VisualizationBlock предназначен для графического представления результатов имитационного моделирования движения космического аппарата [3].

Таким образом, разработаны имитационные модели внешних возмущений, влияющих на движение КА как центра масс, так и относительно центра масс: модель гравитационных сил и моментов Земли, Луны и Солнца, модель аэродинамических сил и моментов, модель сил и моментов солнечного давления. Для изучения вопросов управляемого движения КА относительно центра масс разработаны имитационные модели различных датчиков ориентации КА (гироскопический датчик, магнитный датчик), имитационные модели инерционных (маховики) и электромагнитных исполнительных органов, а также бортового комплекса управления, формирующего управляющие сигналы для исполнительных органов на основе информации, полученной от имитационных моделей датчиков ориентации. Проведены работы по проверке адекватности работы данных имитационных моделей. Разработанные модели могут быть использованы как для изучения поведения КА в реальных условиях космоса, так и при проектировании системы управления движением КА для определения ее основных параметров.

#### Библиографические ссылки

1. Моделирование движения центра масс космического аппарата с использованием среды MatLab-Simulink / М. М. Молдабеков, Н. К. Джамалов, К. А. Алипбаев и др. // Прикл. космич. исслед. в Казахстане. Серия «Казахстан. космич. исслед.». 2010. Т. 6. С. 150–154.
2. Моделирование движения космического аппарата относительно центра масс в среде MatLab/Simulink / М. М. Молдабеков, Н. К. Джамалов, С. А. Елубаев, А. С. Сухенко // Современная астрофизика: традиции и перспективы : материалы III Фесенк. чтений. Алматы, 2010. С. 81–83.
3. Прогнозирование движения космического аппарата на основе имитационного моделирования / С. А. Елубаев, Н. К. Джамалов, К. А. Алипбаев и др. // Космические технологии: настоящее и будущее

(Передовые космические технологии на благо человечества) : материалы III Междунар. конф. Днепрпетровск, 2011. С. 25–26.

4. Модель датчика горизонта земли / С. А. Елубаев, Н. К. Джамалов, К. А. Алипбаев и др. // Космос на благо человечества – взгляд в будущее : материалы Междунар. конф. Астана, 2011. С. 132–134.

5. Моделирование гироскопических датчиков / С. А. Елубаев, Н. К. Джамалов, К. А. Алипбаев и др. // Тез. докладов I Междунар. Джолдасбек. симп. Алматы, 2011. С. 59–60.

#### References

1. Moldabekov M. M., Jamalov N. K., Alipbayev K. A., Bopeyev T. M., Yelubayev S. A., Sukhenko A. S. *Prikladnye kosmicheskie issledovaniya v Kazahstane. Seriya "Kazhastanskije kosmicheskie issledovaniya"*. Almaty, 2010, vol. 6, pp. 150–154.
2. Moldabekov M. M., Jamalov N. K., Yelubayev S. A., Sukhenko A. S. *Materialy III Fesenkovskih chtenij "Sovremennaja astrofizika: tradicii i perspektivy"* (Materials III Fesenkovskih reads "Modern Astrophysics: Traditions and Prospects"). Almaty, October 4–5, 2010, pp. 81–83.
3. Yelubayev S. A., Jamalov N. K., Alipbayev K. A., Bopeyev T. M., Sukhenko A. S. *Materialy 3 Mezhdunarodnoy konferentsii "Kosmicheskiye tekhnologii: nastoyashcheye i budushcheye"* (Peredovyye kosmicheskiye tekhnologii na blago chelovechestva) (Proc. of 3rd Int. Conf. "Space Technology: Present and Future" (Advanced Space Technologies for the benefit of humanity). Dnepropetrovsk, Dnepropetrovsk, 2011. pp. 25–26.
4. Yelubayev S. A., Jamalov N. K., Alipbayev K. A., Bopeyev T. M., Sukhenko A. S. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Kosmos na blago chelovechestva – vzgljad v budushcheye"* (Int. Conf. "Space for the benefit of mankind – a look into the future"). Astana, 2011, pp. 132–134.
5. Yelubayev S. A., Jamalov N. K., Alipbayev K. A., Bopeyev T. M., Sukhenko A. S. *Tezisy dokladov I mezhdunarodnogo Dzholdasbekovskogo simpoziuma* (Abstracts of the I int. Symp. Dzholdasbekovskogo). Almaty, 2011, pp. 59–60.

© Елубаев С. А., Джамалов Н. К., Алипбаев К. А., Сухенко А. С., Бопеев Т. М., 2013

**ПРЕЦЕДЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ИНЦИДЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ\***

В. Г. Жуков, А. А. Шалыпин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com, shalyapin2a@gmail.com

*Рассматривается общий подход к управлению инцидентами информационной безопасности в соответствии с международным стандартом ISO/IEC 27001:2005 и его совершенствование путем автоматизации соответствующих процедур на этапе принятия решения при определении стратегии реагирования с помощью аппарата прецедентного анализа. Предлагаемый авторами подход основан на поиске решения по аналогии – от частного к частному. Приводится описание логической структуры, модели и алгоритма системы прецедентного анализа инцидентов, а также результаты численных экспериментов. Предложенная концепция построения системы прецедентного анализа инцидентов информационной безопасности позволит повысить оперативность реагирования и многократно использовать накопленный ранее опыт их разрешения в процессе автоматизированного управления инцидентами.*

*Ключевые слова:* инцидент, прецедент, аналогия, стратегия реагирования, CBR-цикл.

**CASE BASED ANALYSIS OF INFORMATION SECURITY INCIDENTS**

V. G. Zhukov, A.A. Shalyapin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia

E-mail: zhukov.sibsau@gmail.com, shalyapin2a@gmail.com

*The article considers the general approach to the management of information security incidents according to international standard ISO/IEC 27001:2005 and its improvement by means of corresponding procedures automation at the stage of decision making in the process of response strategy definition with the help of case based analysis apparatus. The approach proposed by the authors is based on finding solutions on the analogy – from specific to specific. The authors present description of the logical structure, the model and the algorithm of case based incidents analysis system, as well as the results of numerical experiments. The proposed concept of building the case based system of information security incidents will allow to increase responsiveness and to repetitively use the previous experience of their solution in the process of automated incidents management.*

*Keywords:* incident, case, analogy, response strategy, CBR-cycle.

В соответствии с международным стандартом ISO/IEC 27001:2005, управление инцидентами информационной безопасности является важным элементом в обеспечении непрерывности бизнес-процессов организации. Под управлением инцидентами понимается процесс, на вход которого подаются данные, полученные в результате протоколирования информации о событиях, имеющих отношение к информационной безопасности, а на выходе процесса получают информацию о причинах произошедшего инцидента и мерах, которые необходимо принять для того, чтобы инцидент не повторился.

В общем случае управление инцидентами – циклический процесс, основные стадии которого отображает модель PDCA (Plan-Do-Check-Act, модель непрерывного улучшения процессов). Согласно стандарту ISO 27001, классическая модель включает в себя четыре стадии управления: идентификацию инцидента информационной безопасности, реагирование на инци-

дент информационной безопасности, расследование, корректирующие и превентивные мероприятия [1].

Именно во время реагирования и расследования инцидентов проявляются конкретные уязвимости информационной системы, обнаруживаются следы атак и вторжений, проверяется работа средств защиты, качество архитектуры системы информационной безопасности и ее управления. Также важным является наличие процедур анализа и устранения последствий инцидентов и принятия корректирующих мер для снижения вероятности повторения подобных инцидентов в будущем.

В первую очередь необходимо своевременно обнаружить инцидент, иначе невозможно отреагировать на него в кратчайшие сроки. В то же время по инцидентам, которые все-таки удалось выявить, часто отсутствуют четкие процедуры реагирования. Подобные ситуации требуют значительного времени для разрешения.

\* Работа поддержана грантом Президента РФ молодым кандидатам наук МК-473.2013.9.

**Проблема реагирования на инциденты информационной безопасности.** Основными средствами управления инцидентами являются системы мониторинга и корреляции событий информационной безопасности, автоматизирующие этап обнаружения инцидентов. Результаты работы данных средств анализируются экспертами, по результатам анализа разрабатываются стратегии реагирования. Большой объем информации, генерируемый системами мониторинга, требует наличия группы реагирования на инциденты информационной безопасности (ГРИБ), состоящей из квалифицированных специалистов. Далеко не всегда возможно эффективно организовать процесс управления инцидентами в силу финансовых ограничений и отсутствия штата специалистов. С другой стороны, полная зависимость от эксперта на этапе принятия решения снижает оперативность и, как следствие, увеличивает ущерб.

Таким образом, существует актуальная проблема оперативного реагирования на возникающие инциденты. Необходимо решить, какую стратегию из множества определенных применить, либо определить, что подходящей стратегии не существует и ее необходимо выработать.

Метод правдоподобного рассуждения позволит решить проблему реагирования на инциденты путем применения систем на основе прецедентов (Case-Based Reasoning, CBR) в качестве интегрированных средств автоматизации процесса управления. В итоге автоматизируется деятельность при определении стратегии реагирования на инциденты, что позволяет повысить эффективность, ускорить реакцию на возникающие инциденты и более интеллектуально подходить к процессу управления информационной безопасностью.

**Прецедентный анализ.** В прецедентных системах поиск решения базируется на понятии аналогии (поиск от частного к частному). Прецедент и текущая ситуация представляются объектами, для которых необходимо обнаружить аналогию и благодаря переносу фактов, справедливых для прецедента, сделать некоторое заключение относительно рассматриваемого инцидента. Как правило, прецедент состоит:

- из описания проблемной ситуации;
- совокупности действий, предпринимаемых для устранения данной проблемы (решения задачи);
- и в некоторых случаях – результата (или прогноза) применения решения [2; 3].

В качестве наиболее очевидной структуры прецедента можно привести параметрическое представление многомерным вектором:

$$CASE = (x_1, x_2, \dots, x_p, R),$$

где  $x_1, \dots, x_p$  – параметры ситуации, описываемой данным прецедентом;  $R$  – одно или множество решений данной задачи (диагноз, рекомендации).

Вывод на основе прецедентов включает в себя четыре основных этапа, образующих CBR-цикл (цикл рассуждения на основе прецедентов) [2], которыми являются:

- извлечение подобных прецедентов для сложившейся ситуации из базы прецедентов;

- повторное использование прецедента для попытки решения текущей проблемы;

- пересмотр и адаптация решения в соответствии с текущей проблемой;

- сохранение вновь принятого решения как части нового прецедента.

С учетом специфики конкретной предметной области и решаемых задач может использоваться упрощенный CBR-цикл [4]. Таким образом, основная цель использования аппарата прецедентов заключается в выдаче готового решения оператору.

Извлечение прецедентов основывается на определении функции подобия (метрики)  $F$ , значение которой определяет сходство прецедента и текущей ситуации. В пространстве признаков определяется точка, соответствующая целевой проблеме, и в рамках используемой метрики выбирается ближайший прецедент. Формально аналогия прецедента  $g = (x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{gp})$

и текущей ситуации  $k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kp})$  описывается функцией вида

$$SIM(g, k) = F(sim(x_{g1}, x_{k1}), \dots, sim(x_{gp}, x_{kp})),$$

где  $sim(x_{gi}, x_{ki})$  – локальная схожесть значений  $i$ -го признака прецедента  $g$  и  $i$ -го признака текущей ситуации (инцидента)  $k$ . Функция  $F$  выражает полную схожесть прецедента с текущей ситуацией.

В случае отсутствия аналогичных прецедентов в базе данных подход не приведет к необходимому решению для возникшей ситуации. Данная проблема может быть разрешена, если в CBR-цикле будет предусмотрена возможность пополнения базы непосредственно в процессе рассуждения (вывода).

**Концепция применения прецедентного анализа.** Первым шагом управления инцидентами информационной безопасности, как отмечалось ранее, является непосредственно регистрация инцидентов. Дальнейшие действия предполагают применение стратегий реагирования для каждого инцидента с учетом класса. На данном этапе можно выделить следующие проблемы:

- не всегда классификация инцидентов производится корректно;

- не существует единой стратегии реагирования на инциденты определенного класса в силу того, что каждый инцидент в той или иной мере индивидуален;

- имеют место инциденты, не имевшие место ранее и, следовательно, для таких инцидентов отсутствуют подходящие стратегии реагирования.

Концепция применения прецедентного анализа для совершенствования процесса управления инцидентами заключается в следующем. Имеется множество  $G$  известных инцидентов, множество  $R$  определенных стратегий реагирования. Отображение  $G \rightarrow R$  есть прецедент, т. е. пара, содержащая описание инцидента и соответствующей ему стратегии реагирования. При регистрации нового инцидента, для него находится подобный прецедент, после чего решение прецедента применяется для данного инцидента. Логическая структура системы, реализующей данный подход, приведена на рис. 1.



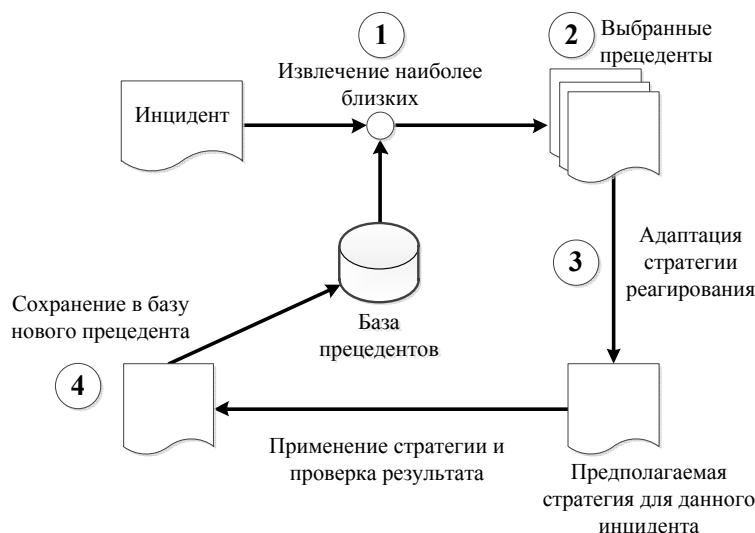


Рис. 1. Логическая структура системы прецедентного анализа

Инциденты, не известные ранее и для которых нет определенной стратегии реагирования, будем называть аномальными инцидентами. Другими словами, под аномальным инцидентом понимается инцидент, не имеющий аналогов в рамках класса, к которому он отнесен средством защиты. Заключение обаномальности инцидента дает повод для детального анализа.

С учетом этого прецедентный анализ сводится к классификации инцидентов на нормальные и аномальные исходя из количества найденных аналогий:  $G = \{g_1, \dots, g_n\}$  – множество прецедентов;  $g_i = (x_1, \dots, x_p, r_i)$  – единичный прецедент;  $K = \{k_1, \dots, k_m\}$  – множество зарегистрированных инцидентов;  $k_j = (x_1, \dots, x_p)$  – единичный инцидент;  $F(g_i, k_j)$  – функция подобия;  $G_1 = \{g_i : F(g_i, k_j) \leq d_{lim}\}$  – множество подобных прецедентов. Таким образом, условие отнесение инцидента к множеству прецедентов формулируется следующим образом:

$$k_j \in G \Leftrightarrow |G_1| \geq a_{lim}.$$

Как видно, результат классификации напрямую зависит от предельного расстояния  $d_{lim}$  и предельного количества аналогий  $a_{lim}$ .

**Модель алгоритма прецедентного анализа.** Для исследования эффективности предложенного подхода был использован источник данных KddDataset'99. В качестве метрического классификатора применялся метод  $k$ -ближайших соседей. Так как на данном этапе неизвестно влияние каждого параметра на конечный результат, то целесообразен выбор метрики без весовых коэффициентов.

Тестовый сценарий алгоритма реализован в аналитической платформе DeductorStudioAcademic и включает в себя следующие этапы (рис. 2):

1. После регистрации инцидента проводится его

нормализация:  $x_{норм} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}.$

2. Инициализация параметров алгоритма: выбор метрики, определение предельного расстояния  $d_{lim}$  и предельного значения аналогий  $a_{lim}$ . В качестве начального значения  $d_{lim}$  принято расстояние по классу:

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n d_{i_{cp}}}{n},$$

где среднее расстояние единичного прецедента до класса

$$d_{i_{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{n-1}.$$

3. Расчет расстояний между объектами по метрики

$$d_{gk} = \sqrt{\sum_{i=1}^p (x_{gi} - x_{ki})^2}.$$

4. Определение пар объектов, для которых справедливо  $d_{gk} \leq d_{lim}$  (прецедент  $g$  и инцидент  $k$  считаются подобными).

5. Для каждого инцидента  $k_j$  рассчитывается число  $a$  прецедентов, для которых выполняется  $d_{gk} \leq d_{lim}$ .

6. Инцидент  $k_j$  рассматривается как аномалия при  $a \leq a_{lim}$ .

7. Принимаются дальнейшие действия исходя из результата классификации: детальный анализ инцидентов либо применение стратегии реагирования, соответствующей наиболее аналогичному прецеденту.

Параметры алгоритма варьируются в ходе функционирования системы, за счет чего совместно с пополнением базы прецедентов реализуется обучение системы.

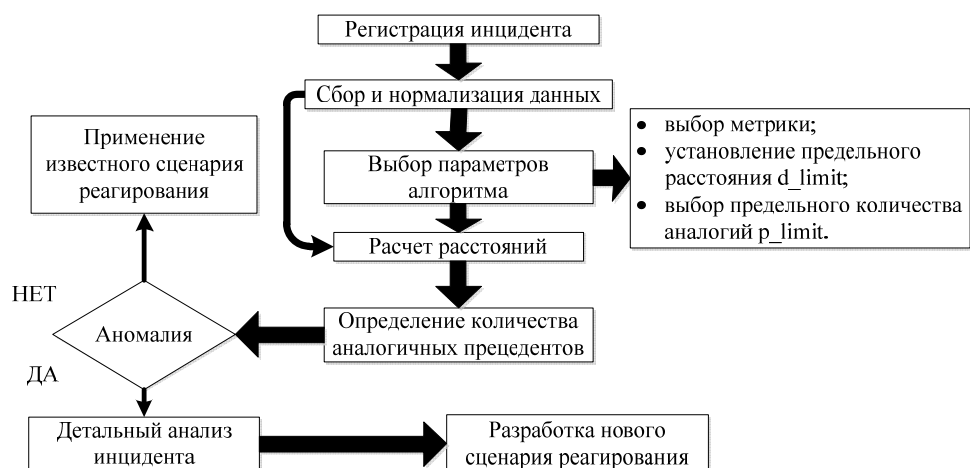


Рис. 2. Внедрение анализа инцидентов в процесс управления

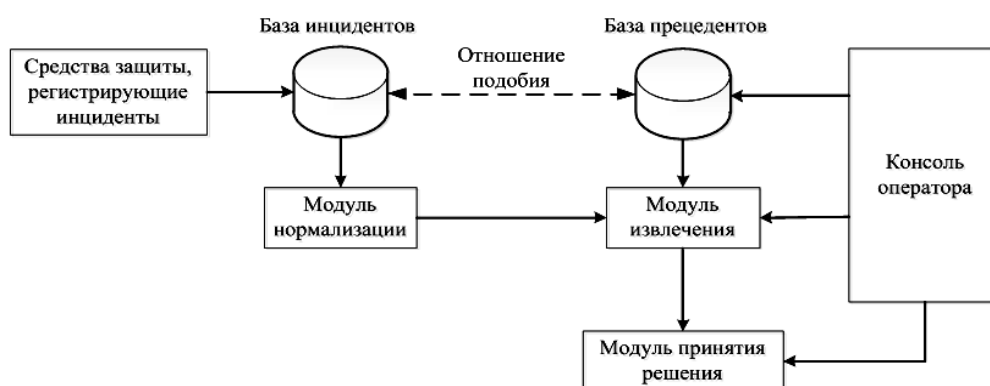


Рис. 3. Архитектура системы прецедентного анализа

### Архитектура системы прецедентного анализа.

С точки зрения программной реализации система прецедентного анализа имеет модульную структуру и включает в себя следующие компоненты (рис. 3):

1) базу инцидентов, содержащая записи о зарегистрированных инцидентах, ожидающих дальнейшей обработки;

2) модуль нормализации данных, преобразовывающий базу зарегистрированных инцидентов в соответствии со структурой базы прецедентов;

3) модуль извлечения, реализующий функцию расчета меры сходства инцидентов и прецедентов;

4) модуль принятия решений, определяющий результат классификации и ставящий инцидент в соответствие одному или нескольким прецедентам на основе рассчитанных мер подобия;

5) консоль оператора, предназначенная для коррекции процесса анализа и адаптации выработанной стратегии под ранее неизвестные условия.

Таким образом, применение предложенной концепции прецедентного анализа, в качестве инструмента, совершенствующего процесс управления инцидентами информационной безопасности, позволит повысить оперативность реагирования на инциденты, путем многократного применения накопленного опыта. Кроме того, данный подход позволяет решить задачу обнаружения аномальных инцидентов, являющихся наиболее критичными и требующих детального изучения.

### Результаты численных экспериментов.

Подобная реализация алгоритма позволяет получать результат как в аналитическом виде, так и в графическом, в виде точечной диаграммы. По точечной диаграмме визуально возможно определить аномалии – события, требующие внимания (рис. 4). Видно, что группа инцидентов, классифицированных как нормальные, отличаются по количеству аналогов от большинства нормальных инцидентов, т. е. имеют число аналогий, приближающееся к предельному. Это может также стать сигналом для проведения их детального анализа и выявления причин и скрытых факторов, в результате которых инциденты не укладываются в общую закономерность.

Пусть нулевая гипотеза представляет предположение о нормальности инцидента, тогда ошибкой 1-го рода является неверное опровержение нулевой гипотезы, ошибкой 2-го рода, неверное принятие нулевой гипотезы.

Выбор параметров  $d_{lim}$  и  $a_{lim}$  весьма противоречив. С одной стороны, увеличение предельного числа обнаруженных аналогий повышает достоверность классификации (снижает ошибки 1-го рода), но при этом границы между классами становятся менее четкими. Уменьшение же предельного расстояния также приводит к более точной классификации, но увеличивает вероятность ошибок 2-го рода (рис. 5). Как видно, один нормальный инцидент классифицирован неверно.

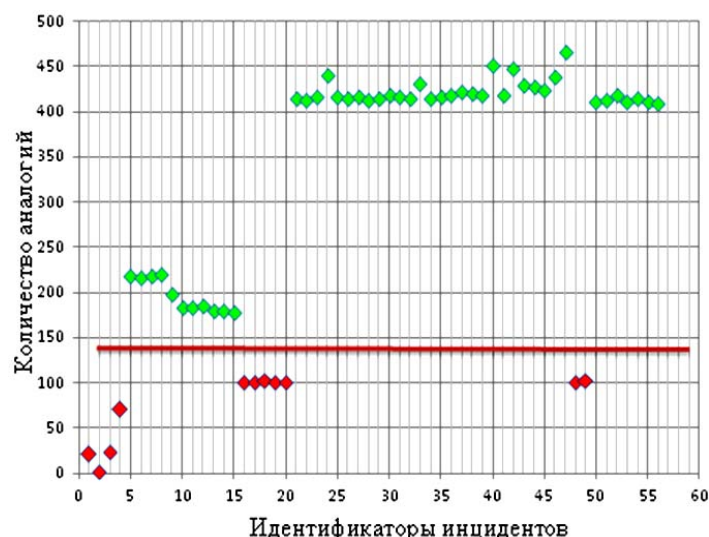


Рис. 4. Результат классификации инцидентов

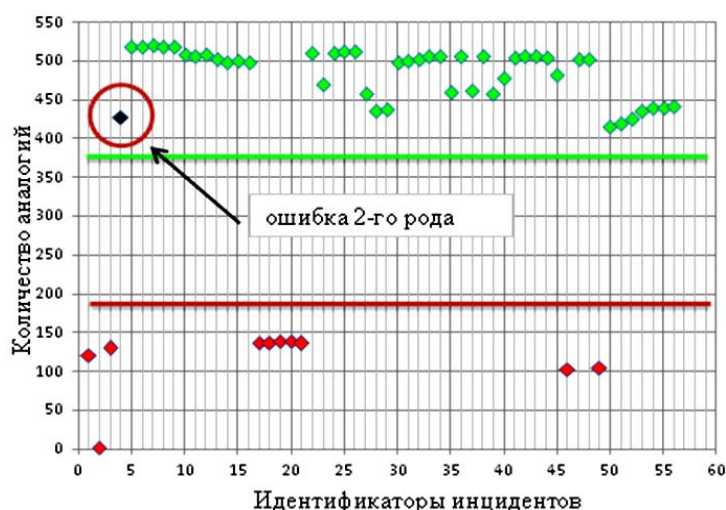


Рис. 5. Результат классификации инцидентов

Параметр  $a_{lim}$  зависит от конкретной ситуации. Предложенный подход классификации инцидентов для поиска аномалий сочетает в себе высокую точность обнаружения и низкий уровень ложных срабатываний, что достигается путем индивидуального выбора параметров алгоритма для каждого класса инцидентов.

Преимущества применения прецедентного анализа заключаются в возможности повторно применять накопленный опыт и в сокращении времени поиска сценариев реагирования для аналогичных инцидентов. Предложенная концепция позволяет решить задачу обнаружения аномальных инцидентов, требующих детального изучения сложившейся ситуации, и автоматизировать процесс получения решения для инцидентов, знания о которых содержатся в базе прецедентов.

#### Библиографические ссылки

1. ISO/IEC 27001:2005 Information technology – Security Techniques – Information Security Management Systems – Requirements.

2. Aamodt A., Plaza E. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, methodological Variations, and System Approaches // AI Communications. 1994. Vol. 7, № 1. P. 39–59.

3. Люгер Д. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. М. : Вильямс, 2002.

4. Концепция построения прецедентной экспертной системы / А. Ф. Берман, О. А. Николайчук, А. И. Павлов, А. Ю. Юрин // Материалы XII Междунар. конф. по вычисл. механике и соврем. прикл. прогр. системам. М., 2003. Т. 2. С. 110–111.

#### References

1. ISO/IEC 27001:2005 Information technology – Security techniques – Information Security Management Systems – Requirements.

2. Aamodt A., Plaza E. Case-Based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches. AI Communications, 1994, vol. 7, no. 1, pp. 39–59.

3. Lyuger D. F. *Iskusstvennyy intellekt: strategii i metody resheniya slozhnykh problem* (Artificial Intelligence: Strategies and methods to solvedifficult problems). Moscow, Vilyams, 2002.

4. Berman A. F., Nikolajchuk O. A., Pavlov A. I., Yurin A. Yu. *Materialy XII mezhdunarodnoj konferencii po*

*vychislitelnoj mexanike i sovremennym prikladnym programnym sistemam* (Materials XII Intern. Conf. on ComputationalMechanics andAdvanced Applied). Vladimir, June 30 – July 5, 2003. Moscow, vol. 2, pp. 110–111.

© Жуков В. Г., Шаляпин А. А., 2013

УДК 621.31:681.5

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА

Д. В. Замятин<sup>1</sup>, А. Н. Ловчиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 28. E-mail: zamyatin@mail.ru

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: ivt\_anlovch@sibsau.ru

*Исследованы возможности синтеза систем автоматического регулирования, описываемых системами дифференциальных уравнений третьего и четвертого порядка, оптимальных по быстродействию. Выполнен анализ существующих разработок для создания систем высокого порядка, оптимальных по быстродействию. Представлена простая методика синтеза, основанная на методе фазовых траекторий. Предлагаемая методика включает в себя все этапы создания оптимальной по быстродействию системы от исходного описания в виде дифференциального уравнения или передаточной функции до формирования корректирующего звена. Сложность создания системы высокого порядка, оптимальной по быстродействию, заключается в необходимости иметь для управления информацию о  $n - 1$  производных, где  $n$  – порядок системы дифференциальных уравнений. Однако технически получить такую информацию практически невозможно. Предлагается способ создания устройства для получения необходимой информации при синтезе систем высокого порядка, оптимальных по быстродействию.*

*Ключевые слова: оптимальные системы, метод фазовых траекторий, быстродействующие системы.*

## SYNTHESIS OF TIME OPTIMAL SYSTEMS OF HIGH ORDER

D. V. Zamjatin<sup>1</sup>, A. N. Lovchikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

28 Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: zamyatin@mail.ru

<sup>2</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: ivt\_anlovch@sibsau.ru

*The purpose of the work is to study the possibility of the synthesis of systems of automatic control described with time optimal systems of differential equations of the third and the fourth order. The authors analyze the existing investigations for creation of time optimal systems of high order and present a simple synthesis strategy based on the method of the phase trajectories. The proposed strategy includes all the stages of creation of the time optimal system, from the input description in the form of a differential equation or a transfer function to formation of a correcting section. The creation of time optimal system of higher-order is challenging to obtaining the information about the  $n - 1$  derivatives, where  $n$  is the order of the system of differential equations. However, to obtain such information technically is practically impossible. The article proposes a way to create a device for obtaining the necessary information with the synthesis of time optimal systems of high order.*

*Keywords: optimal system, method of phase trajectories, time optimal systems.*

При решении задачи создания системы высокого порядка, оптимальной по быстродействию, и наличии ограничений на управляющее воздействие  $|U| \leq U_{\max}$  структурная схема системы в соответствии с принципом максимума Понтрягина [1–4] представлена на рисунке, где  $W_{o,y}(p)$  – передаточная функция объекта управления; РЭ – релейный элемент, обеспечивающий ступенчатое изменение управляющего воздействия  $U$  от  $-U_{\max}$  до  $+U_{\max}$  и наоборот; УП – устройство переключения, реализующее определенную функцию переключения релейного элемента  $S(\varepsilon)$  в функции ошибки системы. Необходимо определить вид и параметры функции  $S(\varepsilon)$ , при которой система переходит из одного устойчивого состояния в другое за минимальное время.

В дальнейшем под системами высокого порядка будем понимать системы третьего и четвертого порядка. Методика синтеза оптимальных по быстродействию систем второго порядка хорошо изучена и не представляет сложностей [1]. Но для систем высокого порядка не существует простой и четко сформулированной методики синтеза несмотря на то, что различные разработки в этой области ведутся уже давно. Имеющиеся разработки сводятся к получению либо частных решений, либо сложных математических выражений, практически нереализуемых.

В общем случае закон оптимального управления формируется в виде нелинейной зависимости управляющего воздействия от вектора состояния системы или, в данном случае, вектора ошибки системы, определяемого выражением

$$U_{o,y} = U_{\max} \text{sign}[S(\varepsilon)]. \quad (1)$$

Задача нахождения оптимального управления  $U_{o,y}$  сводится к отысканию функции переключения  $S(\varepsilon)$ . Релейный элемент переключается тогда, когда функция переключения меняет знак, отсюда уравнение переключения имеет вид

$$S(\varepsilon) = 0. \quad (2)$$

Данное уравнение для систем второго порядка определяет линию в фазовой плоскости, для систем третьего порядка – поверхность, а для систем порядка выше третьего – гиперповерхность в координатах «ошибка и ее производные».

Для систем второго порядка это, как правило, линии второго порядка типа параболы, эллипса или скручивающейся спирали. Аналитически получить уравнение подобной линии переключения в большинстве практических случаев не удастся. Приходится прибегать к аппроксимации, т. е. сначала, используя информацию о математическом описании объекта управления, рассчитывать фазовые траектории системы относительно ошибки и ее производной для  $U = +U_{\max}$  и  $U = -U_{\max}$ , а затем по полученным дан-

ными осуществлять аппроксимацию, задаваясь видом аппроксимирующего уравнения, и таким образом получать уравнение переключения  $S(\varepsilon)$ . Если в этом случае аппроксимирующее выражение представлено в виде прямой линии, то полученный закон управления и систему называют квазиоптимальной, т. е. для одного задающего воздействия система оптимальна, для остальных – близка к оптимальной [1–4]. Квазиоптимальная система практически легко реализуема.

Если подобную методику распространить на системы третьего и четвертого порядков, то в первом случае необходимо аппроксимировать поверхность переключения плоскостью, во втором – аппроксимировать гиперповерхность гиперплоскостью. В общем случае уравнение переключения должно иметь вид

$$S(\varepsilon) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \varepsilon^{(i)}, \quad (3)$$

где  $a_i$  – параметры;  $\varepsilon^{(i)}$  –  $i$ -я производная ошибки системы;  $n$  – порядок системы.

Однако если для систем второго порядка задача определения уравнения линии переключения достаточно проста и описана в ряде источников, то для систем более высокого порядка она существенно усложняется. И для систем третьего и четвертого порядка практически невозможно представить, как гиперплоскость должна пересекать гиперповерхность.

В данной статье приведены результаты исследования возможностей построения оптимальной по быстродействию системы, когда объект управления описывается дифференциальным уравнением третьего и четвертого порядка, и приводятся рекомендации по проектированию подобных систем при различных параметрах уравнений объекта управления.

Предлагаемая методика синтеза систем высокого порядка, оптимальных по быстродействию [5], состоит из следующих этапов.

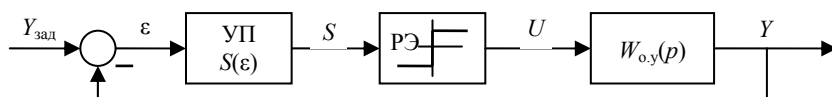
При проведении исследований предполагалось, что объект управления описывается дифференциальным уравнением

$$\sum_{i=0}^n c_i y^{(i)}(t) = ku(t), \quad (4)$$

где  $y^{(i)}(t)$  –  $i$ -я производная выходной координаты;  $n$  – порядок уравнения.

Поскольку гиперповерхность рассматривается в координатах «ошибка и  $n-1$  производные ошибки», то точки на подобной гиперповерхности находятся в результате решения дифференциального уравнения относительно ошибки:

$$\sum_{i=0}^n c_i \varepsilon^{(i)}(t) = c_0 y_{\text{зад}} - ku(t). \quad (5)$$



Структурная схема

Описание поверхности переключения следует находить в виде набора точек в  $n$ -мерном фазовом пространстве. В этом случае необходимо решать систему дифференциальных уравнений с применением принципа «обратного времени» на определенном интервале времени  $t_0 - t_k$ . Сложность решения последующей задачи аппроксимации при удовлетворении требования квазиоптимальности определяется значением  $t_k$ . Чтобы получить наилучший результат, выбираем границу интервала времени  $t_k$  исходя из порядка системы и вида корней характеристического уравнения объекта управления.

Проведенные исследования выявили следующие результаты:

1) для системы третьего порядка:

а) три отрицательных действительных корня:  $t_k \approx (1 \dots 1,5\tau)$ , где  $\tau$  – коэффициент, вычисляемый как

$$\tau = \sqrt[n]{c_n}, \quad (6)$$

здесь  $c_n$  – коэффициент при старшей производной дифференциального уравнения системы;  $n$  – порядок системы;

б) один отрицательный действительный корень и два отрицательных мнимых:  $t_k \approx (3 \dots 4\tau)$ ;

2) для системы четвертого порядка:

а) четыре отрицательных действительных корня:  $t_k \approx (2,5 \dots 4\tau)$ ;

б) четыре отрицательных мнимых корня:  $t_k \approx (3 \dots 4,5\tau)$ .

в) два отрицательных действительных корня и два отрицательных мнимых корня: в системе происходят автоколебания.

Если определены границы интервала решения системы дифференциальных уравнений, то встает вопрос о разбиении этого интервала. От количества точек на интервале зависит точность решения системы дифференциальных уравнений и время вычисления. Малое количество точек приведет к тому, что синтезируемая система будет не оптимальна по быстродействию, а большое – к чрезмерному времени вычисления решения. В результате многократного решения различных вариантов систем дифференциальных уравнений можно сформулировать следующую рекомендацию: достаточное количество точек на интервале решения равно 100, что позволяет получить точность решения на втором этапе до сотых долей значения коэффициентов: увеличение количества точек

до 1 000 приводит к повышению точности решения до тысячных долей значений коэффициентов.

Далее рассмотрим возможные значения корней характеристического уравнения объекта управления  $W_{0y}$ , применительно к разработанной методике, т. е. если применять данную методику, то какими могут быть значения корней характеристического уравнения объекта управления, чтобы гарантированно получить систему, оптимальную по быстродействию. Очевидно, что применимость разработанной методики не может зависеть от конкретных значений корней характеристического уравнения, поэтому в первую очередь следует обратить внимание на применимость в зависимости от порядка корней. Все результаты данных исследований сведены в таблицу.

На втором этапе методики проводится аппроксимация поверхности переключения некоторым аналитическим выражением с использованием уже имеющихся точек поверхности. Остановимся на выборе выражения для аппроксимации.

Выбор выражения для аппроксимации влияет на сложность реализации коррекции в системе. Поэтому выражение должно быть простым и по возможности близким к реальной поверхности. В литературе предлагается множество различных способов аппроксимации. Рассмотрим основные из них.

В качестве первого способа предлагается способ аппроксимации, основанный на разложении в ряд по функциям одной переменной [3]. Аппроксимация ведется с помощью суммы функций одной переменной:

$$\sum_{k=1}^n \varphi_{k0}(x_k), \quad (7)$$

где  $\varphi_{k0}(x_k)$  – некоторые функции.

Второй способ основан на представлении поверхности переключения отрезком степенного ряда. При этом способе аппроксимации уравнение аппроксимированной поверхности ищется в виде

$$x_n = c_{10}x_1 + \dots + c_{n0}x_n + c_{11}x_1^2 + \dots + c_{12}x_1x_2 + \dots + c_{n1}x_nx_1 + \dots, \quad (8)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – переменные;  $c_{10}, \dots, c_{n0}, c_{11}, c_{12}, \dots, c_{n1}$  – коэффициенты.

#### Порядок и типы характеристических уравнений

| Порядок системы уравнений | Варианты корней характеристического уравнения | Область применения разработанной методики синтеза (разность порядков корней)                                                |
|---------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Третий                    | Три действительных                            | Не более трех                                                                                                               |
|                           | Один действительный и два мнимых              | Не более трех                                                                                                               |
| Четвертый                 | Четыре действительных                         | Не более трех                                                                                                               |
|                           | Четыре мнимых                                 | Не более трех                                                                                                               |
|                           | Два действительных и два мнимых               | Порядки действительных относительно мнимых не более четырех, порядки действительных относительно друг друга не более одного |

Третий способ – аппроксимация поверхности переключения с помощью полиномов. А. М. Летовым [4] предложен полином в виде квадратичной формы:

$$\sum_{i,j=1}^n A_{ij}x_i x_j, \quad (9)$$

где  $x_i, x_j$  – переменные;  $A_{ij}$  – коэффициенты.

Самый простой способ – это аппроксимация полиномом первой степени:

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i, \quad (10)$$

где  $x_i$  – переменные;  $a_i$  – коэффициенты.

Применение выражения (10) для аппроксимации поверхности переключения означает аппроксимацию гиперповерхности гиперплоскостью.

Несмотря на серьезное упрощение аналитического выражения поверхности переключения, полином первой степени является наиболее подходящим для систем оптимальных по быстродействию, третьего и четвертого порядка, так как позволяет получить высокие результаты при простом корректирующем устройстве.

Выбор метода аппроксимации не оказывает значительного влияния на точность результатов. Для получения аналитического выражения поверхности переключения можно использовать метод наименьших квадратов. Рассмотрим использование этого метода подробнее.

Выражение (10) при использовании сигнала ошибки примет вид

$$\sum_{i=0}^{n-1} a_i \varepsilon^{(i)}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon^{(i)}$  –  $i$ -я производная ошибки системы;  $n$  – порядок системы.

Значения всех производных ошибки известны и требуется найти коэффициенты  $a_i$ . Поэтому формируем нормальную систему метода наименьших квадратов, используя зависимость  $\varepsilon^0$  от остальных производных:

$$\sum_{j=0}^n \left( \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^{j+k} \right) \cdot a_j = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^0 \cdot \varepsilon_i^k, \quad (12)$$

где  $k = 1, 2, \dots, n$ .

Полученная система (12) – это система алгебраических уравнений относительно неизвестных  $a_0, a_1, \dots, a_n$ . Решение нормальной системы найдем методом Гаусса:

$$a = A^{-1}B, \quad (13)$$

где  $a$  – вектор коэффициентов уравнения гиперповерхности переключения;  $A$  – матрица левой части системы уравнений частных производных;  $B$  – вектор правой части системы уравнений частных производных.

Сформировав поверхность переключения в виде

$$\sum_{i=0}^{n-1} a_i \varepsilon^{(i)} = 0, \quad (14)$$

переходим к третьему этапу методики.

Поверхности переключения (14) соответствует звено коррекции с передаточной функцией

$$W_k(p) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i p^i. \quad (15)$$

Передаточная функция звена коррекции (15) лишь теоретически заставляет систему работать нужным образом. На практике реализация передаточной функции, у которой порядок числителя больше порядка знаменателя, не применяется из-за того, что в реальной системе всегда присутствуют различные сигналы шума и применение дифференцирования ведет к потере полезного сигнала. Поэтому реализуем звено коррекции с передаточной функцией

$$W_k(p) = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} a_i p^i}{\sum_{i=0}^{n-1} b_i p^i}. \quad (16)$$

Это интегро-дифференциальное звено. Для реализации коррекции необходимо подобрать коэффициенты  $b_i$  в знаменателе таким образом, чтобы на каком-то участке частотной характеристики звено вело себя как дифференцирующее, обеспечивая оптимальность по быстродействию, а на высоких частотах – как обыкновенное усилительное. Предлагается следующая последовательность действий:

1. Вычислим вспомогательный коэффициент  $aT_{n-1}$

$$aT_{n-1} = n \sqrt[n]{a_{n-1}}. \quad (17)$$

2. Вычислим вспомогательный коэффициент  $aT_{n-1}$ :

$$bT_{n-1} = \frac{aT_{n-1}}{kp}, \quad (18)$$

где  $kp$  – коэффициент, зависящий от порядка уравнения и его корней.

Проведенные исследования соотношения (18) дали следующие результаты по определению значения  $kp$ : для системы второго порядка  $kp = 10 \dots 20$ ; для системы третьего порядка  $kp = 20 \dots 60$ ; для системы четвертого порядка  $kp = 30 \dots 100$ .

3. Знаменатель передаточной функции (16) сформируем как произведение  $n - 1$  звеньев

$$\sum_{i=0}^{n-1} b_i p^i = \prod_{i=1}^{n-1} (bT_{n-1} p + 1). \quad (19)$$

Как показывают исследования, формирование знаменателя передаточной функции коррекции (16) в форме (19) облегчает в дальнейшем ее практическую реализацию.

В итоге сформирована передаточная функция корректирующего устройства, обеспечивающего системе квазиоптимальность по быстродействию, которое может быть построено на операционных усилителях.

Таким образом, предложена методика синтеза систем, оптимальных по быстродействию, высокого порядка. Рассмотрено применение разработанной методики для систем, оптимальных по быстродействию, третьего и четвертого порядка. Данная методика достаточно проста и проектирование систем высокого порядка может быть легко автоматизировано с помощью распространенных информационных систем, таких как MathCAD и MicroCap.

## Библиографические ссылки

1. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. М. : Высш. шк., 1989.
2. Павлов А. А. Синтез релейных систем, оптимальных по быстродействию: Метод фазового пространства. М. : Наука, 1966.
3. Иванов В. А., Фалдин Н. В. Теория оптимальных систем автоматического управления. М. : Наука, 1981.
4. Куропаткин П. В. Оптимальные и адаптивные системы : учеб. пособие для вузов. М. : Высш. шк., 1980.
5. Замятин Д. В., Ловчиков А. Н. Методика синтеза оптимальных по быстродействию систем / Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 7. С. 28–30.

## References

1. Aleksandrov A. *Optimalnyye i adaptivnyye sistemy* (Optimal and adaptive systems). Moscow, Vysshaya shkola, 1989, 262 p.
2. Pavlov A. A. *Sintez releynykh sistem, optimalnykh po bystrodeystviyu: Metod fazovogo prostranstva* (Synthesis of relay systems, optimal for speed: Method of the phase space). Moscow, Nauka, 1966, 390 p.
3. Ivanov V. A., Faldin N. V. *Teoriya optimalnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya* (The theory of optimal systems of automatic control). Moscow, Nauka, 1981, 331 p.
4. Kuropatkin P. V. *Optimal'nyye i adaptivnyye sistemy* (Optimal and adaptive systems). Moscow, Vysshaya shkola, 1980, 287 p.
5. Zamyatin D. V., Lovchikov A. N. *Vestnik SibGAU*. 2005, № 7, pp. 28–30.

© Замятин Д. В., Ловчиков А. Н., 2013

УДК 321.313 + 004.428

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ МОЩНОСТЬЮ ДО 20 КВТ

Е. В. Карпенко, В. В. Карпенко, М. П. Головин

Сибирский федеральный университет  
Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 26. E-mail: cat.kras@gmail.com

*Приводятся основные принципы автоматизированного проектирования активной части низкоскоростного торцевого синхронного генератора для микроГЭС, обзор потребностей рынка в микроГЭС, шаги, предпринятые для ускорения процесса сборки, снижения стоимости изготовления. Используются методы объектно-ориентированного программирования, динамически подключаемые библиотеки. Результатом работы является программный комплекс «МикроГЭС Проектировщик», который позволяет создать модель в SolidWorks методами автоматизированного проектирования, где каждый параметр рассчитывается исходя из электромагнитной модели и конструктивных ограничений. Областью применения данного программного обеспечения является электроэнергетическое и гидротехническое строительство. Применение данного пакета позволяет сократить время проектирования конструкции микроГЭС, снижая цену изделия.*

*Ключевые слова:* низкоскоростной торцевой синхронный генератор, автоматизация проектирования, микроГЭС, программный комплекс, динамическая библиотека.

## AUTOMATION OF DESIGN OF BUTT GENERATORS WITH THE CAPACITY UP TO 20 KW

E. V. Karpenko, V. V. Karpenko, M. P. Golovin

Siberian Federal University,  
26 Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: cat.kras@gmail.com

*The article describes the basic principles of computer-aided design of the active part of low speed butt time parallel generators for micro hydro power stations, conducts a survey of the market needs in micro hydro power stations, steps taken to speed up the assembly process and to reduce the cost of manufacturing. We use object-oriented programming, dynamic link libraries. The result of our work is a software package «MHPS-designer» (micro hydro power stations designer) which allows you to create a model in SolidWorks with CAD methods where each parameter is calculated from the electromagnetic model and design constraints. The field of the software application is the energy and hydraulic engineering. Use of this software allows to reduce the time of construction design and to reduce the price of the product.*

*Keywords:* low-speed butt time parallel generator, automated design, micro hydro power station, program complex, dynamic library.



Красноярский край обладает достаточным потенциалом гидроресурсов для развития рынка продаж автономных источников электроэнергии [1], в частности свободнопоточных микроГЭС погружного типа [2]. Использование свободнопоточных микроГЭС на территории Красноярского края – это не только способ защиты окружающей среды, но и средство обеспечения электроэнергией районов, удаленных от централизованных линий передач.

Конструкция погружной свободнопоточной микрогидроэлектростанции [3] подразумевает использование торцевой электрической машины [4]. Низкоскоростной торцевой синхронный генератор может использоваться в различных видах энергоэффективных установок ввиду своих преимуществ перед генераторами классического типа: низкой частоты вращения, малых осевых габаритов, стабилизации нестационарного характера входной энергии [5].

Для повышения надежности и снижения стоимости выпускаемых торцевых генераторов целесообразно создание линейки генераторов путем изменения их эксплуатационных характеристик (мощности, частоты вращения, коэффициента полезного действия) [6].

При создании параметрических рядов торцевых генераторов необходимо учитывать наиболее применимые диапазоны величин эксплуатационных характеристик и в этих диапазонах увеличить число членов ряда, а в остальных – расширить интервалы между членами ряда. Такой подход позволит удовлетворить потребности наиболее широкого круга потребителей.

Как видно из рис. 1, наибольшая потребность в торцевых генераторах мощностью 5 кВт [7]. Отсюда следует, что на этом промежутке необходимо сгустить градации мощности или оставить прежними в 1 кВт, а на участках менее 3 кВт и более 7 кВт

градации мощности можно расширить. Получаем следующий ряд градации мощности (рис. 2, б).

Данный ряд мощностей является необходимым и достаточным: требуемую мощность (до 25 кВт) можно обеспечить либо одним генератором, либо компоновкой двух и более генераторов.

Для упрощения проектирования разработана интегрированная среда, построенная на принципах поддержки жизненного цикла изделия, включающая в себя подсистему синтеза параметров торцевого генератора, их оптимизации, конструирования активной части генератора и его корпусных элементов; подсистему анализа работоспособности торцевого генератора.

Базовой конструкцией является электрическая машина мощностью 5 кВт, частотой вращения 300 об/мин. Такая конструкция обусловлена опытом предыдущих разработок коллектива с 2005 г. Изначально генератор состоял из двух роторов и одного статора. Такое решение обеспечивало простоту конструкции сдвоенного статора, но требовало усложнения конструкции несущих элементов ротора и элементов соединения с валом генератора.

Схема со сдвоенным ротором была реализована в конструкции промышленного образца НТСГ мощностью 5 кВт. Сдвоенный ротор имеет существенно упрощенную конструкцию и обеспечивает удобную регулировку зазоров в осевом направлении. В этой конструкции регулирование положения ротора в обоих направлениях выполняется винтовыми тягами. Каждый из статоров в этой конструкции монтируется автономно и его положение не регулируется, что несколько упрощает сборку. Этот вариант компоновки статоров и роторов стал основным при создании промышленного образца.

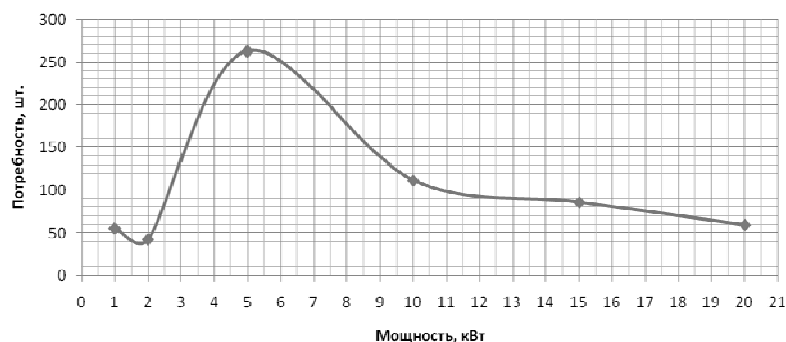


Рис. 1. Потребность в торцевых генераторах в Красноярском крае в 2011 г.

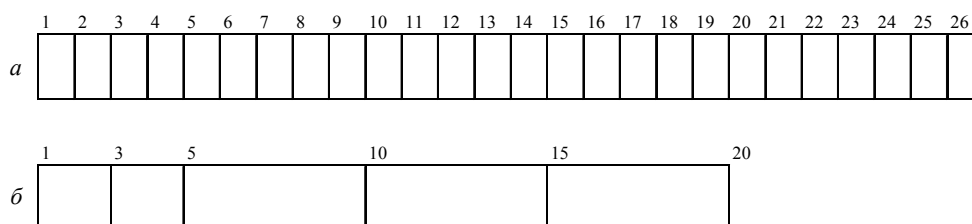


Рис. 2. Градации мощности торцевых генераторов без учета (а) и с учетом (б) потребности

Активная часть торцевого генератора представлена двумя статорами и одним ротором (рис. 3) [8]. Статор вмонтирован в корпус генератора, а ротор связан с входным валом машины. Ротор выполнен в виде диска, на котором закреплены постоянные магниты, закрытые полюсными наконечниками, поверхность активной зоны залита компаундом. Диск ротора соединен ступицей с валом ротора. Между ротором и статором предусмотрен конструкционный воздушный зазор, необходимый для обеспечения работоспособности генератора. Величина данного зазора равная 1 мм рассчитывается из требований модели электромагнитного взаимодействия

ротора и статора, исходя из критериев мощности и работоспособности генератора. Эта величина обеспечивается конструктивно с учетом допусков всей размерной цепи.

Статор представляет собой сборку из шаблонов (рис. 4), с пазами для монтажа модулей, что обеспечивает стабильно высокую точность углового положения модулей по периметру статора и резко повышает производительность сборки [9].

Для повышения производительности сборки потребовалось создание технологической оснастки – шаблона для намотки модуля – и использование намоточного станка (рис. 5).

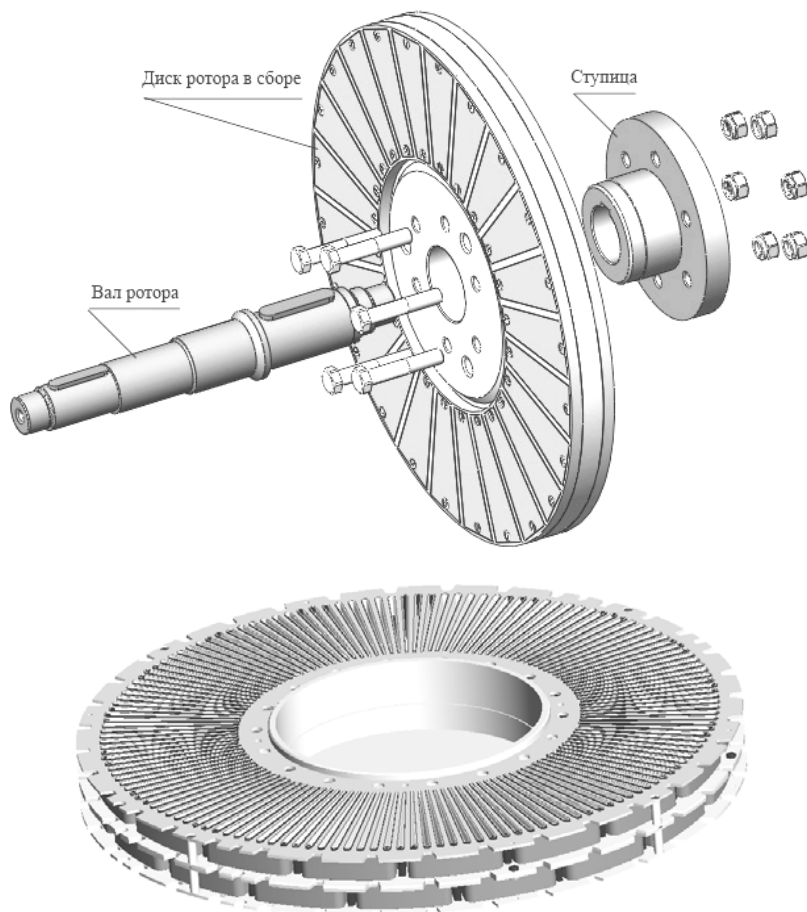


Рис. 3. Ротор и статор в сборе

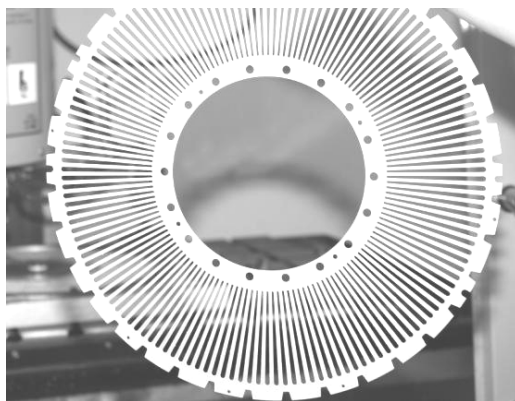


Рис. 4. Шаблон для сборки модулей

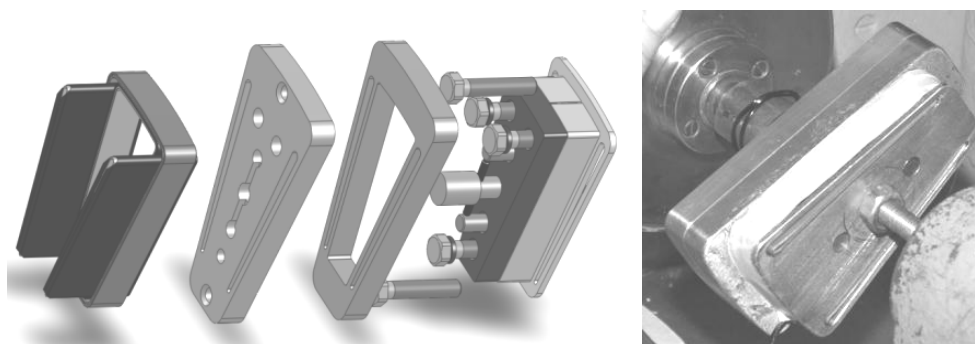


Рис. 5. Шаблон для намотки модуля

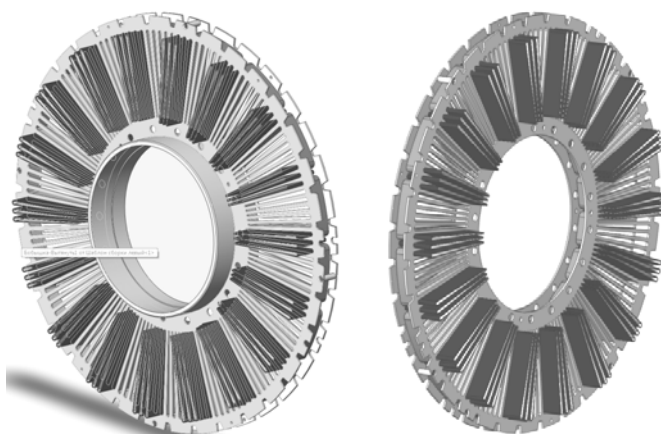


Рис. 6. Правый и левый полустатор

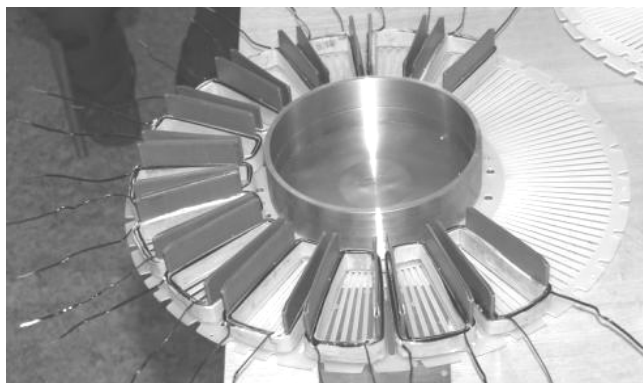


Рис. 7. Монтаж правого полустатора

Также применяется оснастка для гибочного станка, изготавливающая клинья, которые состоят из тонких стальных пластинок, согнутых посередине.

В результате использования оснасток и последующей технологической проработки конструкция и структура генератора изменились. В новую конструкцию статора внесены конструктивные изменения, продиктованные технологическими соображениями. Статор генератора теперь состоит из двух полустаторов – правого и левого (рис. 6), собираемых вместе на окончательной стадии сборки генератора.

Правый полустатор (рис. 7) отличается тем, что его первый шаблон крепится винтами к технологическому центру, что облегчает пропитку и заливку ста-

тора компаундом. Кроме того, внутренняя поверхность технологического центра является базой при токарной обработке торцевых поверхностей статоров для удаления выступающих элементов пластин статора и самого технологического центра.

В каждом из шаблонов сборки статора выполнены отверстия, ускоряющие пропитку статора компаундом и повышающие ее качество. Усовершенствование конструкции статора позволило ускорить процесс сборки, снизить стоимость изготовления, гибко масштабировать конструкцию для варьирования выходной мощности, а также дало возможность построить алгоритмы для автоматизированного проектирования.

Проектирование начинается с активной части, логика проектирования для всех деталей одинакова и показана на примере вала. Вал как деталь, несущая на себе остальные детали и сборки и подверженная действию сторонних сил и моментов, должна отвечать всем критериям работоспособности, а также по параметрам вала определяются геометрические размеры всех остальных компонентов генератора. Участок вала под ступицу проектируется из расчета, что диск ротора и сама ступица должны быть симметричны относительно подшипников. Ступица должна быть прочной в месте крепления к ней диска ротора. По результатам конечно-элементного анализа получено, что толщина фланца ступицы равна толщине диска ротора. Минимальная толщина диска ротора определяется электромагнитным расчетом.

Задача конструирования заключается в подборе оптимальной толщины диска ротора (рис. 8) с учетом требований электромагнитной модели, условий прочности болтов на разрыв от затяжки и условия минимально возможной массы. При подборе стандартных изделий, таких как шпонки, шайбы, подшипники, болты, гайки и пр., использованы данные справочников и проверочных расчетов. При конструировании полюсного наконечника учитываются размеры магнита. Высота полюсного наконечника равна высоте магнита плюс два диаметра шляпки винтов для крепления.

Кроме вышеперечисленных принципов при расчете параметров учтены следующие ограничения и критерии: реализуемость конструктивного решения для

выбранных данных; минимизация трудоемкости изготовления; технологическая реализуемость конструкции на предприятии-изготовителе; соразмерности деталей и сборок.

Выходными данными подсистемы синтеза параметров торцевого генератора является набор геометрических параметров в виде  $D_i @$  Эскиз; @ Деталь, где  $D_i$  –  $i$ -й размер, уникальный в пределах текущего эскиза, Эскиз $_i$  –  $i$ -й эскиз, уникальный в пределах текущей детали; Деталь – деталь, уникальная в пределах текущей под сборки.

Такой вид обеспечен представлением ссылок в среде SolidWorks. Для обеспечения максимальной четкости восприятия выходные параметры подсистемы формируются именно в таком виде. Этих данных вполне достаточно для перестроения всей модели.

Эскиз вала отображает расположение размеров  $D_i$  и их значение для базовой конструкции. Расчет начинается с входного конца вала, диаметр которого зависит от заданной мощности и частоты вращения. Далее по установленным закономерностям либо по выборке из таблиц справочников определяются размеры других участков вала. Путем итерационного подхода к расчету параметров и их проверке определяется наиболее оптимальная конструкция вала и других деталей с заданными входными параметрами.

Некоторые из расчетных зависимостей, обеспечивающих корректность геометрии вала, показаны в таблице. Наименования размеров вала указаны на эскизе вала (рис. 9).

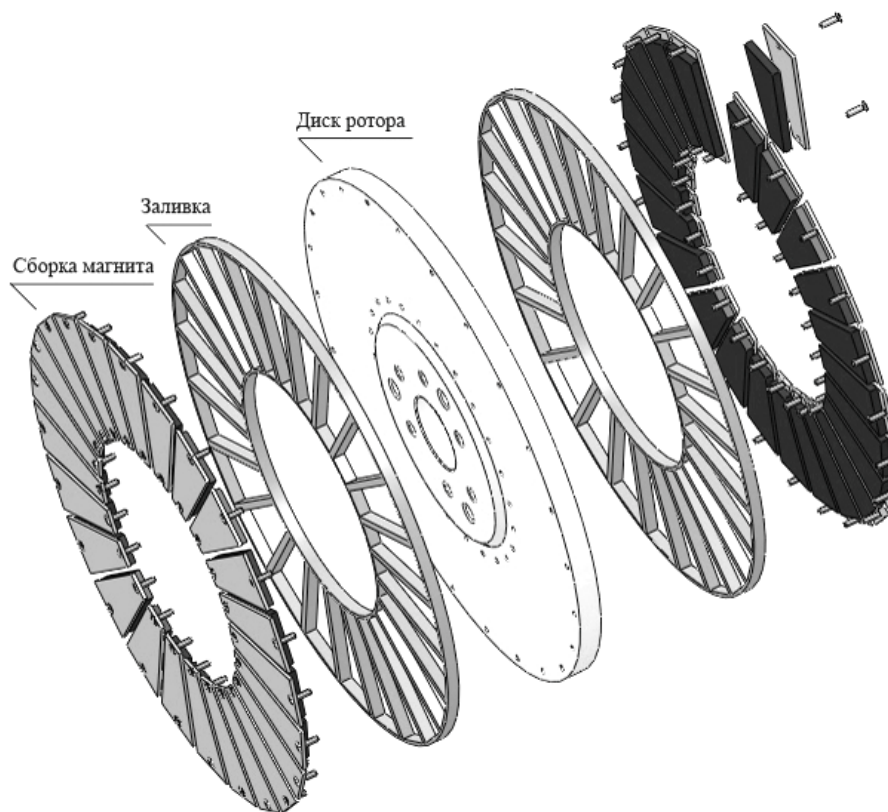


Рис. 8. Диск ротора в сборе

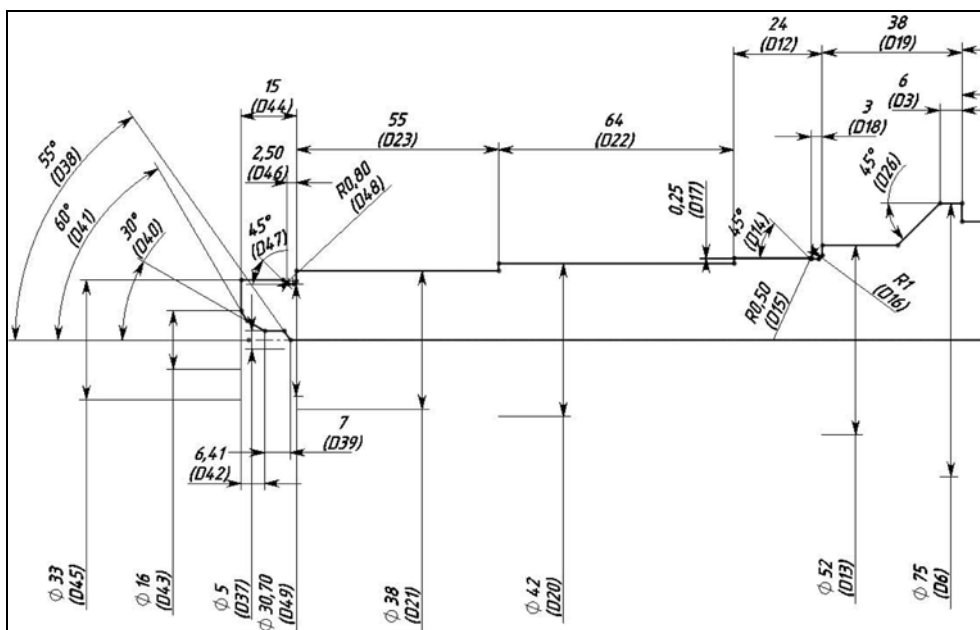


Рис. 9. Часть эскиза вала

## Выходные параметры алгоритма конструирования вала

| Обозначение размера   | Наименование размера                               | Значение | Единица измерения | Формула для вычисления                                                                  | Примечание                                                  |
|-----------------------|----------------------------------------------------|----------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| D21@Эскиз1@Вал ротора | Диаметр входного конца вала                        | 38       | мм                | $D21@Эскиз1@Вал \text{ ротора} \geq \leq 6 \cdot \sqrt[3]{9550 \cdot \frac{P}{\omega}}$ | Округление до большего нормального линейного размера        |
| D45@Эскиз1@Вал ротора | Диаметр участка вала для захвата                   | 33       | мм                | $D45@Эскиз1@Вал \text{ ротора} \leq D21@Эскиз1@Вал \text{ ротора} \cdot 0,86$           | Округление до большего нормального линейного размера        |
| D20@Эскиз1@Вал ротора | Диаметр участка вала для установки упорного кольца | 42       | мм                | $D20@Эскиз1@Вал \text{ ротора} \geq D21@Эскиз1@Вал \text{ ротора} \cdot 1,11$           | Округление до большего нормального линейного размера        |
| D5@Эскиз1@Вал ротора  | Диаметр участка вала под подшипник                 | 45       | мм                | $D5@Эскиз1@Вал \text{ ротора} \geq D20@Эскиз1@Вал \text{ ротора} \cdot 1,07$            | Округление до большего нормального линейного размера        |
| D30@Эскиз1@Вал ротора | Диаметр центрального отверстия                     | 5        | мм                | –                                                                                       | Выбирается из таблицы в зависимости от D5@Эскиз1@Вал ротора |
| D36@Эскиз1@Вал ротора | Диаметр центрального отверстия                     | 16       | мм                | –                                                                                       | Выбирается из таблицы в зависимости от D5@Эскиз1@Вал ротора |

Все расчеты геометрических параметров микро-ГЭС, показанных на примере вала, описаны в динамически подключаемых библиотеках (DLL). Каждая библиотека выполняет конкретную задачу автоматизированного проектирования:

- синтез и оптимизация параметров генератора – расчет, оптимизация и ранжирование решений параметров генератора для определенной турбины;
- конструирование генератора – определение всей совокупности геометрических параметров генератора, необходимых и достаточных для создания 3D модели изделия;
- моделирование генератора – создание твердотельной модели генератора в CAD-среде для выбранных вариантов турбины и генератора;

– анализ работоспособности элементов генератора по критериям напряженно-деформированного состояния и ресурса с учетом взаимодействия электромагнитного тяжения ротора, технологических погрешностей и деформативности системы с использованием твердотельной модели.

Синтез геометрических параметров генератора основывается на выходных параметрах электромагнитной модели торцевого генератора (результата работы соответствующей подсистемы интегрированной среды) и расчетной модели турбины.

Для обеспечения единства информационной среды используется единая база данных, хранящая информацию обо всех автоматизируемых этапах жизненного цикла (рис. 10).

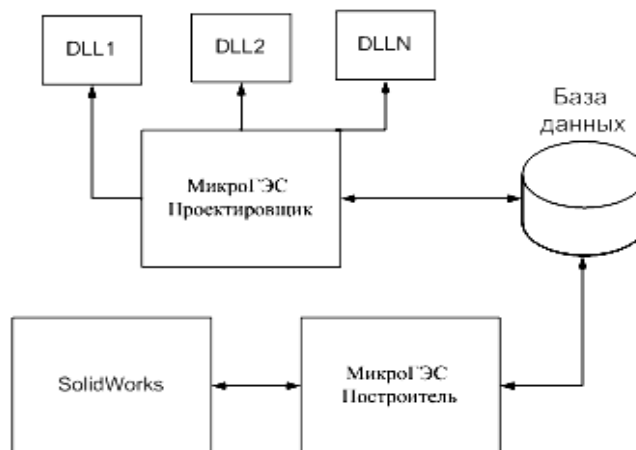


Рис. 10. Архитектура единой информационной системы

Разработанная интегрированная среда автоматизированного проектирования позволяет повысить качество электрических машин. Получаемые на выходе расчетные модели используются в исследованиях напряженно-деформированного состояния, электромагнитного взаимодействия, действующих сил и эксплуатационных характеристик. Программный продукт позволяет изменять геометрические параметры базовой модели изделия и автоматически генерировать конструкторскую и технологическую документацию торцевого генератора.

#### Библиографические ссылки

1. Кашина Е. В., Бочарова Е. В. Оценка рыночного потенциала свободнопоточных микроГЭС на территории Красноярского края // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 6 (33). С. 184–186.
2. Перспективы использования малой гидроэнергетики в сибирском регионе / М. П. Головин, А. Л. Встовский, Е. А. Спирин и др. // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 6 (33). С. 179–184.
3. Погружная свободнопоточная микрогидроэлектростанция : пат. 2247859 Рос. Федерация, МПК F03B13/00 / М. П. Головин, А. Л. Встовский, Л. М. Головина и др. ; Красноярский гос. техн. ун-т. 2003127811/06; заявл. 15.09.2003 ; опубл. 10.03.2005, Бюл. № 7.
4. Низкоскоростной синхронный генератор и система управления режимами его работы / В. М. Бычков, А. Л. Встовский, В. И. Пантелеев, К. С. Федий // Изв. вузов. Электромеханика. 2010. № 3. С. 23–28.
5. Торцевая электрическая машина пат. № 2313887 Рос. Федерация, МПК H02K21/24, H02K021/12. / А. Л. Встовский, М. П. Головин, К. С. Федий и др. ; Красноярский гос. техн. ун-т. 2006121299/09; заявл. 15.06.2006 ; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 7.
6. Морозов Д. И., Карпенко Е. В., Колбасина Н. А. Оптимизационный синтез параметров низкоскоростного торцевого синхронного генератора // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 1 (41). С. 38–42.
7. О выборе типа микроГЭС и ее оптимальной мощности в зависимости от гидрологических параметров / Е. А. Спирин, А. А. Никитин, М. П. Головин, А. Л. Встовский // Соврем. технологии. Систем. анализ. Моделирование. 2012. № 4. С. 109–116.

8. Подсистема конструирования ротора генератора микроГЭС / Е. В. Карпенко, В. В. Карпенко, Е. А. Ощепков. Зарегистрировано в Роспатенте. Свидетельство № 2011615697 от 20.07.2011.

9. Подсистема конструирования статора генератора микроГЭС / В. В. Карпенко, Е. В. Карпенко, Е. А. Ощепков. Зарегистрировано в Роспатенте. Свидетельство № 2011615698 от 20.07.2011 г.

#### References

1. Kachina E. V., Botcharova E. V. *Vestnik SibGAU*. 2010, № 6 (32), pp. 184–186.
2. Golovin M. P., Vstovsky A. L., Spirin E. A., Fediy K. S., Golovina L. N. *Vestnik SibGAU*. 2010, № 6(32), pp. 179–184.
3. Patent 2247859 RF, MPK F03B13/00. *Pogruzhnaya svobodno potochnaya mikro gidroelektrostantsiya* (Immersion svobodnopotochnaya micro hydropower). Golovin M. P., Vstovskiy A. L., Golovina L. M., Limarenko G. M., Bukhanov V. V., Kuzmin S. S. ; Krasnoyarsk State Technical University. 2003127811/06; Stated. 15.09.2003; Publ. 10.03.2005, Bull. № 7.
4. Bychkov V. M., Vstovsky A. L., Panteleev V. I., Fediy K. S. *Izvestiya vuzov. Elektronika*. 2010, № 3, pp. 23–28.
5. Patent 2313887 RF, MPK H02K21/24, H02K021/12. *Tortsevaya elektricheskaya mashina* (Sensing an electric machine). Vstovskiy A. L., Golovin M. P., Fediy K. S., Golovina L. N., Spirin E. A. ; Krasnoyarsk State Technical University. 2006121299/09; Stated. 15.06.2006; Publ. 27.12.2007, Bull. № 7.
6. Morozov D. I., Karpenko E. V., Kolbasina N. A. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 1 (41), pp. 38–42.
7. Spirin E.A., Nikitin A.A., Golovin M.P., Vstovsky A. L. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2012, № 4, pp. 109–116.
8. Karpenko E. V., Karpenko V. V., Oshchepkov E. A., *Podсистема konstruirovaniya rotora generatora mikroGES* (Subsystem design micro hydro generator rotor). Rospatent. Svidetelstvo № 2011615697, 20.07.2011.
9. Karpenko V. V., Karpenko E. V., Oshchepkov E. A. *Podсистема konstruirovaniya statora generatora mikroGES* (Subsystem design micro hydro generator stator). Rospatent. Svidetelstvo № 2011615698, 20.07.2011.

© Карпенко Е. В., Карпенко В. В., Головин М. П., 2013

## МИНИМИЗАЦИЯ МЕЖМОДУЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МУЛЬТИВЕРСИОННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА\*

И. В. Ковалев, Ю. А. Нургалева, А. В. Шахматов, С. А. Чекмарев, Ф. А. Лукин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: kleniks@yandex.ru

*Показано, что использование модульного принципа на этапе технического проектирования мультиверсионного программного комплекса связано с процессом оптимизации состава и взаимосвязей его отдельных компонентов. Предложена оригинальная постановка задачи синтеза мультиверсионной модульной структуры программного комплекса, обеспечивающей минимизацию межмодульного интерфейса. Представленная постановка задачи позволяет сформировать мультиверсионный набор компонентов модулей, использующихся в программах комплексов как произвольно, так и в заданной заранее последовательности. При этом набор мультиверсий удовлетворяет заданным условиям, обеспечивая максимальную надежность ПК и минимальное значение характеристик межмодульного интерфейса.*

*Ключевые слова:* мультиверсионный программный комплекс, модульная структура, межмодульный интерфейс, надежность.

## MINIMIZATION OF INTER-MODULE INTERFACE FOR PROVISION OF RELIABILITY OF MULTIVERSION SOFTWARE SYSTEM

I. V. Kovalev, J. A. Nurgaleeva, A. V. Shahmatov, S. A. Chekmaryov, F. A. Lukin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: kleniks@yandex.ru

*It is shown that the use of a modular principle at the stage of technical design of multiversioning software package is connected to the process of optimization of structure and interactions of the individual components. The authors offer an original definition of the problem of synthesis of multiversioning modular structure of software system that ensures the minimization of inter-module interface. The presented definition of the problem allows to generate a set of components multiversioning modules that are used in the programs of the complexes as arbitrary, and in the pre-set sequence. In this case the set of multiverses meets the specified conditions, ensuring maximum reliability and minimum PC specifications of inter-module interface.*

*Keywords:* multiversioning software system, modular structure, intermodule interface, reliability.

При синтезе мультиверсионной архитектуры программного обеспечения (ПО) важным этапом является распределение моделей и методов оценки параметров надежности по фазам жизненного цикла разработки программных средств систем управления и обработки информации [1]. Наиболее важными являются фазы, которые вносят наибольший вклад в надежность ПО: фаза дизайна архитектуры, фаза кодирования, фаза тестирования компонентов и фаза тестирования системы.

Под архитектурой ПО, как и вообще любых других средств обработки информации, в узком смысле понимают совокупность их свойств и характеристик, призванных удовлетворить запросы пользователей. В более широком смысле архитектура ПО – обобщенная модель информационной системы, достаточная для понимания принципов ее функционирования [2].

Надежность архитектуры включает в себя надежность индивидуальных элементов. Сбой отдельного

элемента приводит к неработоспособности этого и, возможно, других элементов, но не всей системы в целом. Сбой в системе или ее функциях может возникнуть в периоде простоя системы. Период простоя системы определяется как отрезок времени, на котором система или ее часть не может выполнять функции. Период простоя системы приводит к резкому снижению производительности, поэтому уменьшение времени простоя системы является одним из наиболее важных факторов при разработке архитектур распределенного программного обеспечения.

Основные понятия теории надежности комплексов программ базируются на понятиях теории надежности, первоначально развившейся применительно к аппаратным комплексам, однако имеются существенные различия в принципах обеспечения надежности программного обеспечения и других технических систем.

\*Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России», ГК № 14.B37.21.0451.

Эксперименты показывают, что применение избыточности на самых ранних этапах разработки, насколько это возможно, уменьшает вероятность появления ошибок. Надежное ПО можно создать с помощью тщательной разработки архитектуры и выявления ошибок в компонентах, которые оказывают самое большое влияние на надежность системы. Эти компоненты определяются как наиболее часто используемые или архитектурно связанные со множеством других компонентов.

Модульная организация предполагает деление ПО на функционально завершенные части (модули), унификацию связей между ними и установление иерархии взаимодействия компонентов, которая определяется последовательностью их вызова. Вызов осуществляется передачей управления от вызывающего модуля к вызываемому, который по окончании выполнения возвращает управление вызывающему модулю. Вызов группы программ осуществляется передачей управления диспетчеру группы программ более низкого уровня иерархии, входящей в данный программный комплекс (ПК).

Основные методы современной практической разработки программных комплексов базируются на функциональной декомпозиции с использованием модульно-иерархических принципов [3]. При этом на каждом иерархическом уровне ПК ограничивается сложность компонентов и их связей. В результате общая сложность программной системы с возрастанием объема задач растет значительно медленнее, чем при неструктурированном проектировании.

Очевидно, что использование модульного принципа на этапе технического проектирования связано с процессом оптимизации состава и взаимосвязей отдельных компонентов мультиверсионного программного и информационного обеспечения систем обработки информации и управления. Таким образом, комплекс задач синтеза модульных систем на основе мультиверсионной программной архитектуры включает в себя оптимальный выбор состава модулей мультиверсионного ПК и информационных массивов, содержания межмодульного интерфейса, а также структуры системы в целом.

Известно, что основными критериями синтеза модульных систем обработки информации и управления на этапе технического проектирования являются минимум сложности межмодульного интерфейса, минимум времени обмена между оперативной и внешней памятью ЭВМ при решении задач, минимум объема неиспользуемых данных при пересылках между оперативной и внешней памятью ЭВМ; минимум технологической сложности алгоритмов обработки данных, являющейся обобщением показателя транспортного фактора при реализации алгоритмов решения функциональных задач; максимум информационной производительности модульных систем при решении задач, максимум достоверности обработки данных [4].

В качестве ограничений при решении задач синтеза оптимальных модульных систем мультиверсионной обработки информации и управления, кроме перечисленных показателей, используются такие характеристики, как состав процедур и объем каждого модуля, состав и объем информационных массивов,

сложность и состав интерфейса между отдельными модулями, степень дублирования процедур и информационных элементов, объем оперативной памяти ЭВМ, число каналов связи с внешними запоминающими устройствами, возможности передачи управления внутри и между модулями, последовательность выполнения процедур, допустимые затраты и время разработки и внедрения системы и т. д.

Исходными данными для решения задач синтеза являются техническое задание на разработку системы, результаты анализа существующей системы управления и результаты ее предварительного обследования. На основе этих данных определяются следующие характеристики: множество функциональных задач обработки данных; множество процедур обработки данных, включая альтернативные (реализация мультиверсионности); множество информационных элементов системы, связанных с процедурами обработки данных и идентифицируемых по типам: входной, промежуточный, выходной; варианты возможного взаимодействия процедур обработки данных с информационными элементами; технологическая матрица смежности либо технологическая скелетная матрица; множество допустимых последовательностей выполнения процедур; характеристики процедур, информационных элементов и технических средств [4].

Решение поставленных задач позволяет разработать функциональную блок-схему мультиверсионной модульной структуры ПК на архитектурном (системном) уровне, обеспечивающую минимальный интерфейс между модулями комплекса. Следует отметить, что дублирование мультиверсионных элементов (мультиверсий) в модулях проектируемого ПК обеспечивает снижение значения показателя программно-информационной связи этих модулей.

Рассмотрим постановку задачи синтеза мультиверсионной модульной структуры ПК, обеспечивающей минимизацию межмодульного интерфейса [5].

В проектируемый модуль добавляются мультиверсии (не меньше двух), и известны следующие значения:

$R_{ij}$  – надежность  $j$ -й версии  $i$ -го модуля;

$X_{ij}$  – булева переменная, равная 1, если  $j$ -я версия используется в  $i$ -м модуле, или 0 – в противном случае;

$n$  – количество модулей;

$m_i$  – количество версий  $i$ -го модуля;

$R_i$  – надежность  $i$ -го модуля:

$$R_i = 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij})^{X_{ij}}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Синтезируются программы и указываются последовательности, определяющие, какие модули и в каком порядке используются, при этом:

$K$  – количество программ;

$S_k$  – множество модулей, соответствующих  $k$ -й программе.

Затем, задав ограничения на надежность системы и ограничения на межмодульный интерфейс, введем дополнительные переменные:

$F_k$  – частоту использования  $k$ -й программы;



$R$  – надежность системы, максимизация которой осуществляется согласно выражению

$$\max R = \sum_{k=1}^K F_k \prod_{i \in S_k} R_i.$$

Межмодульный интерфейс – это количество одних и тех же мультиверсий модулей, использующихся разными программами [6].

Для формализации постановки задачи, обеспечивающей минимизацию межмодульного интерфейса, введем дополнительную переменную  $W_{ik}$  – булеву переменную, равную 1, если  $i$ -й модуль используется  $k$ -й программой и 0 – в противном случае.

$$Y_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^n W_{ik} X_{ij} \geq 1, \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^n W_{ik} X_{ij} = 0. \end{cases}$$

Переменная  $Y_{kj}$  служит для формализации взаимосвязи разрабатываемой системы с отдельными мультиверсиями модулей.

Для минимизации межмодульного интерфейса на уровне отдельных версий в качестве критерия используется следующее выражение:

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{k'=k+1}^K Y_{kj} Y_{k'j}.$$

Представленная постановка задачи позволяет сформировать мультиверсионный набор компонентов модулей, использующихся в программах модульного ПК как произвольно, так и в заданной заранее последовательности. Полученный набор мультиверсий будет удовлетворять заданным условиям, обеспечивая максимальную надежность ПК и минимальное значение характеристик межмодульного интерфейса.

#### Библиографические ссылки

1. Ковалев И. В., Капулин Д. В., Царев Р. Ю. Архитектурная надежность программного обеспечения

информационно-управляющих систем : монография / Краснояр. гос. аграр. ун-т. Красноярск, 2011.

2. Kovalev I. V. System of Multi-Version Development of Spacecrafts Control Software. Sinzheim, 2001.

3. Kovalev I. V., Younoussou R. V. Fault-Tolerant Software Architecture Creation Model Based on Reliability Evaluation // Advances in Modeling and Analysis. D. 2002. Vol. 7, № 3. P. 31–44.

4. Мамиконнов А. Г., Кульба В. В. Синтез оптимальных модульных СОД. М. : Наука, 1986.

5. Капчинский И. А., Кузнецов А. С., Штенцель А. В. Принципы формирования мультиверсионного программного комплекса // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 1 (18). С. 18–23.

6. Новой А. В., Штенцель А. В. Оценка надежности мультиверсионной программной архитектуры систем управления и обработки информации // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 3 (20). С. 73–79.

#### References

1. Kovalev I. V. Kapulin D. V., Carev R. J. *Arhitekturnaja nadezhnost' programmnogo obespechenija informacionno-upravljajushih sistem* (Architectural software reliability management information systems). Krasnojar. gos. agrar. un-t. Krasnojarsk, 2011, 182 p.

2. Kovalev I. V. System of multi-version development of spacecrafts control software. Pro Universitate Verlag Sinzheim. 2001, 77 p.

3. Kovalev I. V., Younoussou R. V. Fault-tolerant software architecture creation model based on reliability evaluation. Advances in Modeling and Analysis – D. 2002, vol. 7, № 3, pp. 31–44.

4. Mamikonov A. G., Kulba V. V. *Sintez optimal'nyh modul'nyh SOD* (Synthesis of optimal modular SOD). Moscow, Nauka, 1986.

5. Kapchinskij I. A., Kuznecov A. V., Shtendel A. V. *Vestnik SibGAU*. 2008, № 1 (18), pp. 18–23.

6. Novoj A. V., Shtendel A. V. *Vestnik SibGAU*. 2008, № 3 (20), 73–79.

© Ковалев И. В., Нургалеева Ю. А., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Лукин Ф. А., 2013

УДК 519.87

### О ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СТОХАСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А. А. Корнеева, Е. А. Чжан

Сибирский федеральный университет  
Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: ekach@list.ru

Рассматривается проблема идентификации многомерных статических объектов при различном уровне априорной информации. Исследуется вопрос о влиянии выбранной параметрической структуры модели на качество идентификации в условиях помех, ее соответствии реальному математическому описанию объекта. Приводятся результаты численного исследования различных параметрических моделей многомерных статических процессов.

Ключевые слова: априорная информация, идентификация в узком и широком смысле, стохастический объект, непараметрические и параметрические модели.

## ABOUT THE PARAMETRIC MODELING OF STOCHASTIC OBJECTS

A. A. Korneeva, E. A. Chzhan

Siberian Federal University

79 "Svobodnyi" prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: ekach@list.ru

*The authors consider the problem of multi-dimensional static objects identification at different levels of a priori information and investigate the question of the influence of the selected parametric model structure on the identification quality under noise conditions, its adequacy to the actual mathematical description of the object. The results of computational investigation of different parametric models of multi-dimensional static processes are presented.*

**Keywords:** *priori information, identification in "narrow" and "wide" sense, stochastic object, non-parametric and parametric models.*

При параметрическом моделировании (или идентификации в узком смысле) предполагают, что структура объекта каким-то образом выбрана на основании имеющейся априорной информации с точностью до параметров. Следующий основной этап состоит в оценке этих параметров на основании текущей информации. Итак, построение параметрической модели состоит из двух основных этапов: определения класса параметрических структур с точностью до параметров и их последующего оценивания по результатам наблюдения входных-выходных переменных исследуемого объекта. Однако на практике объема априорной информации часто недостаточно для обоснованного выбора класса моделей с точностью до параметров. Тем самым неизбежно возникает большая или меньшая неточность на стадии формулировки задачи идентификации. Здесь уместно вспомнить известную фразу Демокрита: «Даже незначительное отступление от истины в дальнейшем ведет к бесконечным ошибкам».

Ниже мы уделим особое внимание случаю, когда структура модели и уравнение исследуемого процесса в той или иной мере отличаются.

**Постановка задачи.** Общепринятая схема исследуемого процесса представлена на рис. 1 [1; 2].

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $A$  – неизвестный оператор объекта;  $x(t) \in \Omega(x) \subset R^1$  – выходная переменная процесса;  $u(t) = (u_i(t), i = \overline{1, m}) \in \Omega(u) \subset R^m$  – векторное входное воздействие;  $\xi(t)$  – векторное случайное воздействие;  $(t)$  – непрерывное время;  $H^u$ ,  $H^x$  – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля;

$h^u(t)$ ,  $h^x(t)$  – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса с нулевыми математическими ожиданиями и ограниченной дисперсией.

Измеряя значения входных и выходных переменных с интервалом времени  $\Delta t$ , получим обучающую выборку  $\{u_i, x_i, i = \overline{1, s}\}$ , где  $s$  – объем выборки, которая используется для оценки параметров модели. Обратим внимание на одно важное обстоятельство, связанное со стохастической зависимостью компонент вектора  $u(t)$ . При наличии подобной зависимости вид параметрической модели исследуемого процесса существенно меняется [3]. Более подробно об этом см. в [4].

Следует отметить, что объем выборки и характер ее накопления оказывают существенное влияние на качество решения задачи идентификации, однако на практике чаще всего объем выборки весьма ограничен. О важности задач такого рода говорит председатель Экспертного совета РФФИ по математике, механике и информатике академик Е. И. Моисеев: «...существует очень важная проблема, как сделать заключение на основании малого – в смысле математической статистики – количества данных. У нас была рассмотрена задача из области медицины примерно с 20 параметрами (прогноз катастрофического течения послеоперационного периода) и всего 600 данными. По всем правилам, нельзя делать вывод по 600 данным, если меняются 20 параметров. Но где взять больше? 600 операций сделали – вот и вся статистика. Жизнь такие задачи ставит». Данное исследование тесно связано со сформулированной выше проблемой.

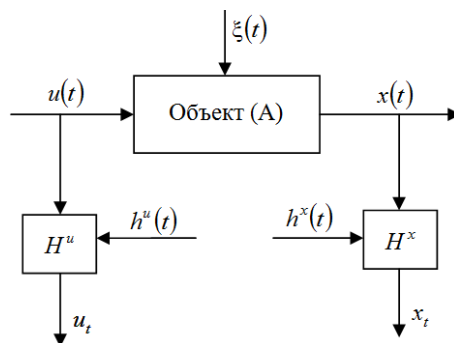


Рис. 1. Общая схема исследуемой системы  
(обозначения см. в тексте)

**Параметрическая идентификация.** При построении моделей разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория параметрической идентификации, или идентификация в узком смысле [1; 2]. Ее содержание, как было отмечено выше, состоит в том, что на первом этапе на основании имеющейся априорной информации определяется параметрический класс операторов  $A^\alpha$ , например:

$$\tilde{x}_\alpha(t) = A^\alpha(u(t), \alpha), \quad (1)$$

где  $A^\alpha$  – параметрическая структура модели;  $\alpha$  – вектор параметров. На втором этапе осуществляется оценка параметров  $\alpha$  на основе имеющейся выборки  $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$ , где  $s$  – объем выборки. Существует большое количество методов получения оценок параметров, например метод стохастических аппроксимаций [1]:

$$\alpha_s^l = \alpha_{s-1}^l + \gamma_s^l \left( x_s - \sum_{l=1}^N \alpha_{s-1}^l \phi_l(u_s) \right) \phi_l(u_s), \quad l = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где  $\gamma_s^j, j = \overline{1, N}$  – коэффициенты Роббинса–Монро, удовлетворяющие определенным условиям сходимости [2].

На практике обычно основное внимание уделяется задаче определения параметров объекта при заданной или принятой структуре [2]. Качество полученной модели зависит от того, насколько хорошо угадана параметрическая структура. Однако структура зависимости априорно не известна, т. е. она подбирается экспериментальным путем. К чему может привести неправильно подобранная структура, будет показано ниже.

**Непараметрическая идентификация.** Априорная информация об объекте при непараметрической идентификации, или идентификации в широком смысле, отсутствует или очень бедная, поэтому приходится предварительно решать большое число дополнительных задач. К этим задачам относятся выбор структуры системы и задание класса моделей, оценивание степени стационарности и линейности объекта и действующих переменных, оценивание степени и формы влияния входных переменных на выходные, выбор информативных переменных и др. К настоящему времени накоплен большой опыт решения задачи идентификации в узком смысле. Методы же решения задач идентификации в широком смысле начали разрабатываться только в последние годы, и здесь результаты значительно скромнее, что в первую очередь можно объяснить чрезвычайной трудностью задачи [1].

Идентификация в широком смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора. В этом случае задача идентификации состоит в оценивании класса операторов на основе выборки  $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$  в форме

$$\tilde{x}_s(t) = A_s(u(t), \vec{x}_s, \vec{u}_s), \quad (3)$$

где  $\vec{x}_s = (x_1, x_2, \dots, x_s), \vec{u}_s = (u_1, u_2, \dots, u_s)$  – временные векторы. Оценка оператора  $A_s$  в некоторых случаях может быть осуществлена средствами непараметрической статистики [5].

В качестве оценки (3) можно использовать непараметрическую оценку функции регрессии Надарая–Ватсона [5; 6]:

$$x_s(u) = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \prod_{j=1}^m \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))}{\sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^m \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))}, \quad (4)$$

где  $\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)), i = \overline{1, s}, j = \overline{1, m}$  – ядерная колоколообразная функция и коэффициент размытости ядра  $c_s$ , которые удовлетворяют следующим условиям сходимости [2; 5]:

$$\begin{aligned} c_s > 0, \quad \lim_{s \rightarrow \infty} c_s = 0, \quad \lim_{s \rightarrow \infty} s c_s^m = \infty, \\ \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) \geq 0, \quad c_s^{-1} \int_{\Omega(u)} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) du^j = 1, \quad (5) \\ \lim_{s \rightarrow \infty} c_s^{-1} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) = \delta(u^j - u_i^j). \end{aligned}$$

В качестве колоколообразной функции  $\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))$  могут быть использованы ядра различного вида: треугольное, параболическое или прямоугольное.

Параметр размытости  $c_s$  при наличии обучающей выборки  $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$  находится из задачи минимизации квадратичного показателя соответствия выхода объекта и выхода модели, основанного на методе скользящего экзамена, когда в модели (4) по индексу  $i$  исключается  $k$ -е наблюдение переменной, предъявляемой для экзамена:

$$R(c_s) = \sum_{k=1}^s (x_k - x_s(u_k, c_s))^2 = \min_{c_s}, \quad k \neq i, \quad (6)$$

т. е.  $i = k$ , где индекс  $i$  фигурирует в формуле (4).

Вообще говоря, каждой компоненте вектора  $u$  может соответствовать компонента вектора  $c_s$ . Таким образом, формула (4) может быть представлена в следующем виде:

$$x_s(u) = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \prod_{j=1}^m \Phi(c_{sj}^{-1}(u^j - u_i^j))}{\sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^m \Phi(c_{sj}^{-1}(u^j - u_i^j))}, \quad (7)$$

тогда определение компонент вектора  $c_s = c_{s1}, c_{s2}, \dots, c_{sm}$  может быть осуществлено из минимизации критерия  $R(c_s)$  (6) по вектору  $c_s = c_{s1}, c_{s2}, \dots, c_{sm}$ .

Во многих практических задачах может быть использован следующий прием. Приведем численные значения наблюдений вектора  $u$  к одному и тому же интервалу с помощью операции центрирования и нормирования. В этом случае приближенно можно принять компоненты вектора  $c_s = c_{s1}, c_{s2}, \dots, c_{sm}$  одинаковыми, т. е.  $c_{s1} = c_{s2} = \dots = c_{sm}$ . В итоге определение параметра

размытости существенно упрощается, поскольку оно приводится к одномерной задаче оптимизации  $R(c_s)$  по  $c_s$ .

Примечательным здесь является то, что при этом исключается этап выбора параметрической структуры, т. е. уравнения процесса с точностью до параметров. Тем самым можно утверждать, что идентификация в этом случае, а это вариант идентификации в широком смысле, является более адекватной многим реальным задачам.

Следует обратить внимание на то, что непараметрическая оценка функции регрессии относится к классу локальных аппроксимаций. Это и обуславливает возможность ухода от привычного этапа параметризации. Более того, при наличии «трубчатой» структуры исследуемого процесса в данном случае не требуется каких-либо коррекций непараметрической модели в отличие от параметрической [3].

**Численные исследования.** В целях проведения численного эксперимента зададим уравнение линейного относительно коэффициентов объекта. Для примера рассмотрим многомерный безынерционный стохастический объект

$$\begin{aligned} x(u) = & 1,5 \sin u_1 + 0,3u_2^3 + u_3 - \\ & - 0,6u_4 + 0,3u_5 + 0,5u_6^2 + 0,5u_7^2 + \\ & + 0,2u_8 + 0,3 \sin u_9 - 0,4 \cos u_{10}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $u_i \in [0; 3]$ ,  $i = \overline{1, 10}$ .

На выход объекта накладывалась помеха

$$\xi = x\zeta k, \quad (9)$$

где  $\zeta$  – случайная величина, нормально распределенная в интервале  $[-1; 1]$ ;  $k$  – процент помехи.

О качестве модели будем судить по относительной ошибке аппроксимации:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^s (x^i(u) - x_s^i(u))^2 / \sum_{i=1}^s (x^i(u) - \hat{m}_x)^2}, \quad (10)$$

где  $s$  – объем выборки;  $\hat{m}_x = s^{-1} \sum_{i=1}^s x^i(u)$  – оценка математического ожидания.

Принято считать [7], что вид параметрической модели задан априорно и стоит лишь задача оценивания

коэффициентов по выборке. Рассмотрим, к чему приводит ошибка при математическом определении структуры. Приведем модель, структура которой отлична от структуры объекта:

$$\begin{aligned} x_s(u) = & \alpha_1 \exp(u_1) + \alpha_2 u_2^3 + \\ & + \alpha_3 u_3 + \alpha_4 u_4 + \alpha_5 u_5 + \alpha_6 u_6^2 + \\ & + \alpha_7 u_7^2 + \alpha_8 u_8 + \alpha_9 \sin u_9 + \alpha_{10} u_{10}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, мы заменили один член, входящий в описание объекта, на явно отличающийся член. Результаты моделирования представлены в табл. 1.

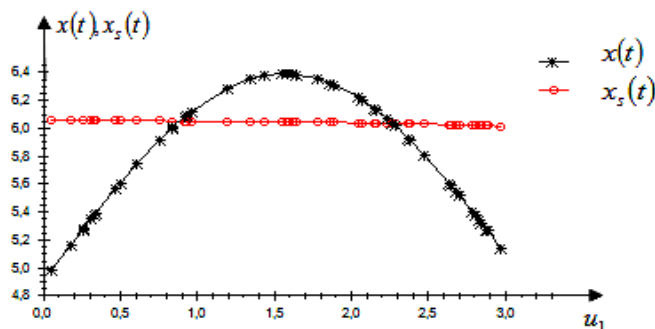
Таблица 1

Результаты моделирования объекта (8) и модели (11)

| Объем выборки $s$ | Процент помехи $k$ | Относительная ошибка $\sigma$ |
|-------------------|--------------------|-------------------------------|
| 50                | 3                  | 0,149                         |
| 100               | 3                  | 0,153                         |
| 500               | 3                  | 0,159                         |
| 1000              | 3                  | 0,159                         |
| 10 000            | 3                  | 0,159                         |
| 100 000           | 3                  | 0,156                         |
| 50                | 5                  | 0,167                         |
| 100               | 5                  | 0,167                         |
| 500               | 5                  | 0,165                         |
| 1000              | 5                  | 0,166                         |
| 10 000            | 5                  | 0,170                         |
| 100 000           | 5                  | 0,167                         |

Как видно из табл. 1, с увеличением помехи измерений выхода объекта относительная ошибка аппроксимации увеличивается. Однако с увеличением выборки нет ожидаемого уменьшения ошибки (10), т. е. величина ошибки практически не меняется.

На рис. 2 представлен график значений выхода объекта и модели по переменной  $u_1$ , т. е.  $u_1 \in [0; 3]$ ,  $u_2 = u_3 = \dots = u_{10} = 1,5$ . Такой график будем называть срезом по переменной  $u_1$ . Объем точек  $s = 50$  и помеха  $k = 3\%$ . На рис. 2 и далее показаны значения выхода объекта  $x(u)$  и его параметрической модели  $x_s(u)$ .

Рис. 2. Срез по переменной  $u_1$

Из графика среза по переменной  $u_1$  (см. рис. 2) видно, что модель не повторяет поведение объекта. Этот факт вытекает из того, что функции при  $u_1$  в объекте и в модели не совпадают. Однако при оценивании коэффициентов с помощью МНК коэффициент при переменной  $u_1$  практически равен нулю ( $\alpha_1 = 0,024$ ) при объеме выборки  $s = 50$  и с ростом выборки  $s$  значение коэффициента уменьшается (табл. 2).

Таблица 2  
Оценки коэффициентов модели (11)  
в зависимости от объема выборки

| $s$        | 50    | 500   | 10 000 | 100 000 |
|------------|-------|-------|--------|---------|
| $\alpha_1$ | 0,024 | 0,016 | 0,011  | -0,004  |

На рис. 3 показан срез по переменной  $u_3$ .

В данном случае значения модели и объекта практически совпадают (рис. 3), отличие в значениях модели и объекта вызвано наличием помехи (9). Значительное отличие в значениях объекта и модели наблюдается только по переменной  $u_1$ .

Теперь в модели при еще одной переменной возьмем функцию, отличную от истинной:

$$x_s(u) = \alpha_1 \exp(u_1) + \alpha_2 u_2^3 + \alpha_3 u_3^2 + \alpha_4 u_4 + \alpha_5 u_5 + \alpha_6 u_6^2 + \alpha_7 u_7^2 + \alpha_8 u_8 + \alpha_9 \sin u_9 + \alpha_{10} \cos u_{10}. \quad (12)$$

В этой серии экспериментов уже при двух входных переменных функции были плохо угаданы.

Результаты моделирования при разном объеме выборки и различном уровне помех представлены в табл. 3.

Таблица 3  
Результаты моделирования объекта (8)  
и модели (12)

| Объем выборки $s$ | Процент помехи $k$ | Относительная ошибка $\sigma$ |
|-------------------|--------------------|-------------------------------|
| 50                | 3                  | 0,204                         |
| 100               | 3                  | 0,199                         |
| 500               | 3                  | 0,211                         |
| 1 000             | 3                  | 0,212                         |
| 10 000            | 3                  | 0,212                         |
| 50                | 5                  | 0,227                         |
| 100               | 5                  | 0,200                         |
| 500               | 5                  | 0,215                         |
| 1 000             | 5                  | 0,217                         |
| 10 000            | 5                  | 0,220                         |

Ошибка аппроксимации увеличилась в среднем на 6 %. Однако в данном случае, как и в предыдущих, ошибка не уменьшается с ростом выборки. Функции при двух переменных не соответствуют истинным, ошибка моделирования при этом составляет 20 %.

Далее приведем срез по переменной  $u_3$  (рис. 4). Как и следовало ожидать, в данном случае график модели более не линеен в отличие от графика объекта. Структура объекта и модели не совпадают по переменной  $u_3$ , что и привело к увеличению ошибки.

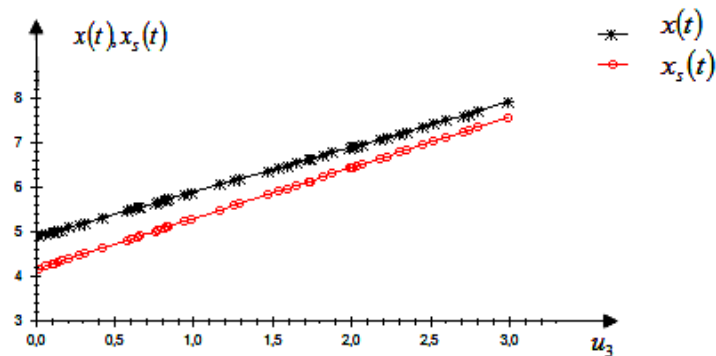


Рис. 3. Срез по переменной  $u_3$

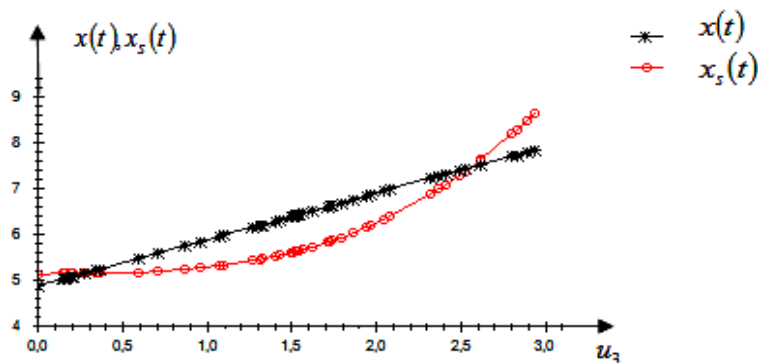


Рис. 4. Срез по переменной  $u_3$

Рассмотрим еще один случай, который состоит в искажении члена, входящего в описание модели:

$$x_s(u) = \alpha_1 \exp(u_1) + \alpha_2 u_2^3 + \alpha_3 u_3^2 + \alpha_4 u_4 + \alpha_5 u_5 + \alpha_6 u_6^4 + \alpha_7 u_7^2 + \alpha_8 u_8 + \alpha_9 \sin u_9 + \alpha_{10} \cos u_{10}. \quad (13)$$

Результаты серии аналогичных экспериментов представлены в табл. 4.

Таблица 4  
Результаты моделирования объекта (8) и модели (13)

| Объем выборки $s$ | Процент помехи $k$ | Относительная ошибка $\sigma$ |
|-------------------|--------------------|-------------------------------|
| 50                | 3                  | 0,253                         |
| 100               | 3                  | 0,252                         |
| 500               | 3                  | 0,255                         |
| 1 000             | 3                  | 0,257                         |
| 10 000            | 3                  | 0,257                         |
| 50                | 5                  | 0,268                         |
| 100               | 5                  | 0,250                         |
| 500               | 5                  | 0,260                         |
| 1 000             | 5                  | 0,260                         |
| 10 000            | 5                  | 0,262                         |

Функции при трех переменных, входящих в уравнение модели, не соответствуют истинным, ошибка увеличилась на 4 % по сравнению с предыдущими результатами, т. е. чем хуже подобрана модель, тем больше ошибка.

На основе проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы. Очевидным является тот факт, что при несовпадающей структуре модели, т. е. когда структура модели не соответствует математическому описанию объекта, ошибка аппроксимации велика и такая модель неадекватна. Были получены противоречивые результаты: увеличение выборки не приводит к уменьшению ошибки моделирования. Если математическое описание модели и объекта совпадает по всем переменным кроме одной, то это приводит к тому, что коэффициент при этой переменной стремится к нулю при увеличении выборки. Именно поэтому она не оказывает негативного влияния на модель и ошибка аппроксимации в этом случае не так велика (около 14 %).

## Библиографические ссылки

1. Эйхгофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975.
2. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М. : Наука, 1984.
3. Медведев А. В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1995. Т. 2. С. 201–206.
4. Корнеева А. А., Сергеева Н. А., Чжан Е. А. О непараметрическом анализе данных в задаче идентификации // Вестн. нац. исслед. Том. гос. ун-та. Управление, вычисл. техника и информатика. 2013. № 1 (22). С. 86–96.
5. Надарая Э. А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбил. ун-та, 1983.
6. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1983.
7. Зарубин В. С. Математическая статистика / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. М. : Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Баумана, 2008.

## References

1. Eykhoff P. *Osnovy identifikacii sistem upravleniya* (System Identification Parameter and State Estimation). Moscow, Mir, 1975, 683 p.
2. Cyppin Ja. Z. *Osnovy informacionnoj teorii identifikacii* (The foundation of information identification theory). Moscow, Nauka, 1984, 320 p.
3. Medvedev A. V. *Analiz dannyh v zadache identifikacii* (Data analysis in the identification problem). Minsk, BGU, 1995, vol. 2, pp. 201–206.
4. Korneeva A. A., Sergeeva N. A., Chzhan E. A. *Vestnik TGU. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* (Control, computer engineering and and computer science). 2013, no. 1 (22), pp. 86–96.
5. Nadaraya E. A. *Neparametricheskie ocenki plotnosti veroyatnosti i krivoj regressii* (Non-parametric estimation of the probability density and the regression curve). Tbilisi, izd. Tbil. un-ta, 1983, 194 p.
6. Medvedev A. V. *Neparametricheskie sistemy adaptacii* (Nonparametric adaptation systems). Novosibirsk: Nauka, 1983, 174 p.
7. Zarubin V. S., Krishhenko V. S. *Matematicheskaya statistika* (Mathematical statistics). Moscow, izd-vo MGTU im. Bauman (Publishing Bauman), 2008, 424 p.

© Корнеева А. А., Чжан Е. А., 2013

# О РАЗРЕШИМОСТИ ОДНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ОПЕРАТОРА В КЛАССЕ ФУНКЦИЙ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА\*

Е. К. Лейнартас<sup>1</sup>, Е. И. Яковлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: lein@mail.ru

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: yei@nm.ru

*Рассматривается проблема существования глобальных аналитических решений обобщенной задачи Коши с начально-краевыми условиями типа Рикье, заданными на координатных гиперплоскостях. Используются как классические методы комплексного анализа, так и относительно новые методы теории амёб алгебраических гиперповерхностей. Доказана разрешимость в классе функций экспоненциального типа краевой задачи для полиномиального дифференциального оператора с постоянными коэффициентами. Найдена зависимость характеристик роста решений краевой задачи от роста краевых условий и правой части уравнения. Примененные методы могут быть полезны для дальнейших исследований в теории дифференциальных операторов.*

*Ключевые слова:* задача Коши, дифференциальные операторы, интегральные представления, амёба алгебраической гиперповерхности, преобразование Бореля.

## ON THE SOLVABILITY OF ONE BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR POLYNOMIAL DIFFERENTIAL OPERATOR IN THE CLASS OF FUNCTIONS OF EXPONENTIAL TYPE

E. K. Leinartas<sup>1</sup>, E. I. Yakovlev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79 "Svobodnyi" prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: lein@mail.ru

<sup>2</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: yei@nm.ru

*The work is devoted to the problem of existence of global analytical solutions of the generalized Cauchy problem with initial-boundary conditions of Riquier type, specified on the coordinate hyperplanes. Used as the classic methods of complex analysis, and relatively new methods of the theory of amoebas algebraic hyperplanes. The authors prove the solvability of value problem in the class of functions of exponential type boundary for polynomial differential operator with constant coefficients and reveal the linear connection of the characteristics of the growth of solutions of boundary-value problem from the growth of the boundary conditions and right-hand side of the equation. Research methods can be useful for further research of the theory of differential operators.*

*Keywords:* Cauchy problem, differential operators, integral representations, amoeba of algebraic hypersurface, transformation of Borel.

Различным вариантам Коши–Ковалевской посвящено много работ. В классической ситуации данные Коши задаются на нехарактеристической гиперповерхности и речь идет, как правило, о существовании локальных аналитических решений. О глобальных аналитических решениях известно значительно меньше. Например, в монографии [1] рассматривается задача Коши в комплексной области, в частности вопрос о существовании глобальных решений. В некоторых обобщениях задачи Коши дополнительные условия на решения ставятся на нескольких гиперповерхностях [2–4] и их называют начально-краевыми условиями типа Рикье.

В данной статье рассматривается обобщенная задача Коши для полиномиального дифференциального оператора с постоянными коэффициентами с начально-краевыми условиями типа Рикье, заданными на координатных гиперплоскостях. Доказываются существование и единственность глобального решения этой задачи в классе целых функций экспоненциального типа, указывается связь характеристик роста решения с ростом входных данных задачи (теорема 1). Для доказательства использованы как классические методы комплексного анализа (преобразование Бореля степенных рядов, интегральные представления), так и сравнительно новые методы теории амёб алгебраических гиперповерхностей.

\*Работа первого автора поддержана грантом РФФИ 11.01-00852.

1. Введем следующие обозначения  $z = (z_1, \dots, z_n)$  – точки  $n$ -мерного комплексного пространства  $C^n$ ;  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  – мультииндексы,  $\|\alpha\| = \alpha_1 + \dots + \alpha_n$ ,  $\alpha! = \alpha_1! \dots \alpha_n!$ ,  $z^\alpha = z_1^{\alpha_1} \dots z_n^{\alpha_n}$ ,  $D_j$  – оператор дифференцирования по  $j$ -й переменной,  $D^\alpha = D_1^{\alpha_1} \dots D_n^{\alpha_n}$ .

В главе 5, посвященной задаче Коши, монографии Л. Хермандера [5] доказывается следующая теорема (теорема 5.1.1).

**Теорема.** Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$D^\beta F = \sum_{\|\alpha\| \leq m} c_\alpha(z) D^\alpha F + G, \quad (1)$$

где коэффициенты  $c_\alpha(z)$  суть аналитические функции от  $z = (z_1, \dots, z_n)$  в окрестности нуля в пространстве  $C^n$ ;  $\|\beta\| = m$ . Зададим краевые условия:

$$D_j^k [F - \Phi] \Big|_{z_j=0} = 0, \text{ если } 0 \leq k < \beta_j, \\ j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Если  $\sum_{\|\alpha\|=\|\beta\|} c_\alpha(0)$  меньше некоторого положительного числа, зависящего только от  $\|\beta\|$ , то тогда для любых функций  $G$  и  $\Phi$  аналитических в окрестности нуля, краевая задача (1)–(2) имеет, и притом единственное, аналитическое в окрестности нуля решение  $F$ .

Отметим, что в (2) содержится  $\|\beta\|$  граничных условий и  $\|\beta\|$  есть порядок дифференциального уравнения (1).

Частными случаями данной теоремы являются классическая теорема Коши–Ковалевской (если  $\beta = (m, 0, \dots, 0)$  и  $c_\beta(z) \neq 0$ ) и теорема Гурса–Бодо [5].

*Замечание.* Краевую задачу (1)–(2) можно назвать обобщенной задачей Коши с начально-краевыми условиями типа Рикье (см. [2–4]). В данном случае значения искомой функции и ее производных задаются на координатных плоскостях.

Для формулировки глобального варианта теоремы Хермандера о разрешимости задачи (1)–(2) и его доказательства используем некоторые понятия и факты теории амб алгебраических гиперповерхностей (см. [6]). Обозначим через  $\mathbf{Z}$  множество целых чисел и через  $\mathbf{Z}^n = \mathbf{Z} \times \dots \times \mathbf{Z}$  –  $n$ -мерную целочисленную решетку.

Пусть  $A = \{\alpha\} \subset \mathbf{Z}^n$  – некоторое фиксированное конечное множество и  $P(z) = \sum_{\alpha \in A} c_\alpha z^\alpha$  – полином,

а  $V = \{z \in C^n : P(z) = 0\}$  – множество его нулей.

*Многогранником Ньютона*  $N_P$  многочлена  $P$  называется выпуклая оболочка в  $\mathbf{R}^n$  элементов множества  $A$ .

*Амбой* алгебраической гиперповерхности называется образ множества нулей  $V$  многочлена  $P(z)$  при отображении

$$\text{Log} : z = (z_1, \dots, z_n) \rightarrow (\log |z_1|, \dots, \log |z_n|) = \text{Log} |z|.$$

Заметим, что отображение  $\text{Log}$  является композицией двух:

$$\text{Abs} : z = (z_1, \dots, z_n) \rightarrow (|z_1|, \dots, |z_n|)$$

$$\text{и } \log : (|z_1|, \dots, |z_n|) \rightarrow (\log |z_1|, \dots, \log |z_n|).$$

Множество  $V$ , а значит и  $\text{Log}(V)$ , замкнуто, поэтому его дополнение открыто. Пусть  $\{E\}$  – набор непустых связанных компонент дополнения  $\mathbf{R}^n \setminus \text{Log}(V)$ . Для любой непустой компоненты  $E$  функция  $1/P(z)$  голоморфна в  $\text{Log}^{-1}E \subset C^n \setminus V$  и разлагается там в ряд Лорана (см., например, [6]):

$$\frac{1}{P(z)} = \sum_{\beta} \frac{a_\beta}{z^\beta},$$

коэффициенты которого можно определить следующим образом:

$$a_\beta = \frac{1}{(2\pi i)^n} \int_{\Gamma} \frac{z^\beta}{P(z)} \frac{dz}{z},$$

где  $\Gamma = \text{Log}^{-1}u$ ,  $u = (u_1, \dots, u_n) \in E$  – остов полицилиндра  $\Gamma = \{z \in C^n : |z_j| = e^{u_j}, j = 1, \dots, n\}$ . Известно, что область сходимости ряда Лорана логарифмически выпукла, т. е. связанная компонента  $E$  дополнения амбы  $\text{Log}(V)$  является выпуклым множеством.

Для  $v \in N_P \cap \mathbf{Z}^n$  *двойственным конусом* называется множество

$$C_v^P = \{s \in \mathbf{R}^n : \langle s, v \rangle = \max_{\alpha \in N_P} \langle s, \alpha \rangle\}.$$

Существует инъективная функция  $v$  из множества компонент связности  $v : \{E\} \rightarrow \mathbf{Z}^n \cap N_P$  такая, что двойственный конус  $C_{v(E)}^P$  есть асимптотический конус для выпуклой компоненты  $E$ .

Приведем некоторые сведения из теории целых функций (см., например, [7]).

Целая функция  $F(z)$  называется *функцией экспоненциального типа*, если она удовлетворяет неравенству

$$|F(z)| \leq M \exp \langle a, |z| \rangle \quad (3)$$

для некоторых  $M > 0$ , где  $a \in \mathbf{R}_+^n$ ,  $x \in \mathbf{R}^n$ ,  $x_j \geq 0$ ,  $|z| = (|z_1|, \dots, |z_n|)$ ,  $\langle a, |z| \rangle = a_1 |z_1| + \dots + a_n |z_n|$ .

Множество тех точек  $a \in \mathbf{R}_+^n$ , для которых при фиксированной целой функции  $F(z)$  справедливо неравенство (3), будем обозначать  $\sigma_F$  и называть *тип-множеством функции*  $F(z)$ .

Отметим, что открытое ядро  $\overset{\circ}{\sigma}_F$  множества  $\sigma_F$  является выпуклым множеством и  $\mathbf{R}_+^n$  является асимптотическим конусом для  $\overset{\circ}{\sigma}_F$ .



Будем рассматривать полиномиальные дифференциальные операторы  $P(D)$  с постоянными коэффициентами со следующим условием на многогранник Ньютона  $N_p$  характеристического многочлена  $P(z) = \sum_{\alpha \in A} c_\alpha z^\alpha$ : существует вершина  $m \in N_p$  такая, что  $\alpha \leq m$  для всех  $\alpha \in N_p$ . Здесь неравенство  $\alpha \leq m$  означает, что  $\alpha_j \leq m_j$  для всех  $j = 1, \dots, n$ .

При выполнении данного условия соответствующая компонента  $E_m$  дополнения амобы  $R^n \setminus A_p$  не пуста и двойственный конус  $C_V^m$  содержит  $R_+^n$ .

**Теорема 1.** Если функция  $\Phi(z)$ , задающая краевые условия (2), и правая часть  $G(z)$  уравнения (1) являются функциями экспоненциального типа с тип-множествами  $\sigma_\Phi$  и  $\sigma_G$  соответственно, то решение  $F(z)$  также является функцией экспоненциального типа, тип-множество которой  $\hat{\sigma}_F$  удовлетворяет условию  $\hat{\sigma}_F \supset \hat{\sigma}_\Phi \cap \hat{\sigma}_G \cap \text{Abs}(\text{Log}^{-1}E_m)$ .

2. Для доказательства теоремы 1 нам потребуется несколько вспомогательных утверждений.

*Преобразование Бореля* функции экспоненциального типа

$$F(z) = \sum_{x \geq 0} \frac{f(x)}{x!} z^x, \quad x! = x_1! \cdots x_n!$$

называется функция

$$\hat{F}(z) = \sum_{x \geq 0} \frac{f(x)}{z^{x+I}},$$

где  $I = (1, \dots, 1)$ .

Взаимосвязь между ростом целой функции  $F(z)$  и сопряженными радиусами сходимости ассоциированной по Борелю функции  $\hat{F}(z)$  устанавливает теорема Бореля. Необходимые понятия и доказательство приведены в монографии Л. И. Ронкина [7].

**Теорема Бореля.** Гиперповерхность сопряженных типов при сопряженных порядках  $(1, \dots, 1)$  целой функции  $F(z)$  совпадает с гиперповерхностью сопряженных радиусов сходимости ряда, определяющего ее преобразование по Борелю  $\hat{F}(z)$ .

В частности, теорема Бореля означает, что открытое ядро тип-множества  $\hat{\sigma}_F$  совпадает с областью сходимости ряда функции  $\hat{F}(z)$ .

**Лемма 1.** Если решение  $F(z)$ , правая часть  $G(z)$  и функция  $\Phi(z)$ , задающая краевые условия в задаче (1)–(2), являются функциями экспоненциального типа:

$$F(z) = \sum_{x \geq 0} \frac{f(x)}{x!} z^x, \quad G(z) = \sum_{x \geq 0} \frac{g(x)}{x!} z^x,$$

$$\Phi(z) = \sum_{x \geq 0} \frac{\varphi(x)}{x!} z^x,$$

то коэффициенты  $f(x)$  ряда для  $F(z)$  удовлетворяют разностному уравнению

$$\sum_{0 \leq \alpha \leq m} a_\alpha f(x + \alpha) = g(x), \quad x \geq 0 \quad (4)$$

и краевым условиям

$$f(x) = \varphi(x), \quad 0 \leq x, \quad x \not\geq m. \quad (5)$$

Здесь  $x \not\geq m$  означает, что для некоторого  $j_0$   $\alpha_{j_0} < m_{j_0}$ .

**Доказательство.** Подставляя в (1)–(2) разложения функций  $F, G, \Phi$  в степенные ряды и приравнявая коэффициенты при одинаковых степенях  $z^x$ , по стандартным выкладкам получим (4)–(5).

Разрешимость задачи (4)–(5) и формулы для решения приведены в [8].

С точки зрения теории разностных уравнений ассоциированная по Борелю функция  $\hat{F}(z)$  является производящей функцией решения  $f(x)$  разностного уравнения. Соответственно ассоциированные по Борелю функции  $\hat{G}(z)$  и  $\hat{\Phi}(z)$  – производящие функции соответственно правой части  $g(x)$  уравнения (4) и функции  $\varphi(x)$ , задающей краевые условия (4).

**Лемма 2.** Для производящей функции  $\hat{F}(z)$  решения  $f(x)$  разностной задачи (4)–(5) справедлива формула

$$\hat{F}(z) = \left( \sum_{0 \leq \alpha \leq m} c_\alpha z^\alpha \hat{\Phi}_\alpha(z) \right) \frac{1}{P(z)} + \hat{G}(z) \frac{1}{P(z)},$$

$$\text{где } \hat{\Phi}_\alpha(z) = \sum_{x \not\geq \alpha} \frac{\varphi(x)}{z^{x+I}}.$$

**Доказательство.** Поделим равенства (4) на  $z^{x+I}$  и просуммируем по всем  $x \geq 0$ :

$$\sum_{x \geq 0} \left( \sum_{0 \leq \alpha \leq m} c_\alpha \frac{f(x + \alpha)}{z^{x+I}} \right) = \sum_{x \geq 0} \frac{g(x)}{z^{x+I}} = \hat{G}(z).$$

Меняя в левой части равенства порядок суммирования, получим:

$$\begin{aligned} & \sum_{0 \leq \alpha \leq m} c_\alpha z^\alpha \left( \sum_{x \geq 0} \frac{f(x + \alpha)}{z^{x+I+\alpha}} \right) = \\ & = \sum_{0 \leq \alpha \leq m} c_\alpha z^\alpha \left( \hat{F}(z) - \sum_{x \not\geq \alpha} \frac{f(x + \alpha)}{z^{x+I}} \right) = \\ & = P(z) \hat{F}(z) - \sum_{\alpha \not\geq m} c_\alpha z^\alpha \left( \hat{\Phi}_\alpha(z) \right), \end{aligned}$$

где  $\hat{\Phi}_\alpha(z) = \sum_{0 \leq x, x \not\geq \alpha} \frac{\varphi(x)}{z^{x+I}}$  – частичная сумма ряда  $\hat{\Phi}(z)$ .

Таким образом,

$$P(z)\hat{F}(z) - \sum_{0 \leq \alpha \leq m} c_\alpha z^\alpha (\hat{\Phi}_\alpha(z)) = \hat{G}(z)$$

или

$$\hat{F}(z) = \sum_{0 \leq \alpha \leq m} c_\alpha z^\alpha \hat{\Phi}_\alpha(z) \frac{1}{P(z)} + \frac{\hat{G}(z)}{P(z)}.$$

Известны также интегральные представления, связывающие функции  $F$  и  $\hat{F}$ , ассоциированные по Борелю (см., например, [7]):

$$F(z) = \frac{1}{(2\pi i)^n} \iint_{\Gamma} \hat{F}(\xi) \exp\langle z, \xi \rangle d\xi,$$

где  $\Gamma$  – остов полицилиндра,  $\Gamma := \{\xi \in C^n : |\xi_j| = R_j, j = 1, \dots, n\}$ ;  $R = (R_1, \dots, R_n) \in \sigma_F$ ,  $\langle z, \xi \rangle = z_n \xi_1 + \dots + z_1 \xi_n$ ;  $d\xi = d\xi_1 \wedge \dots \wedge d\xi_n$ .

Учитывая лемму 2, в случае экспоненциальных входных данных получаем следующее интегральное представление для решения задачи (1)–(2):

$$F(z) = \frac{1}{(2\pi i)^n} \int_{\Gamma} \frac{\sum_{\|\alpha\| \geq 0} c_\alpha \xi^\alpha \hat{\Phi}_\alpha(\xi) \exp\langle z, \xi \rangle d\xi}{P(\xi)} + \frac{1}{(2\pi i)^n} \int_{\Gamma} \frac{\hat{G}(\xi) \exp\langle z, \xi \rangle d\xi}{P(\xi)}, \quad (6)$$

где  $\Gamma = \{|\xi_j| = R_j, j = 1, \dots, n\}$ ;  $R = (R_1, \dots, R_n) \in \sigma_\Phi \cap \sigma_G$  и  $\text{Log} R \in E_m$ .

Доказательство теоремы 1. Тип-множества  $\sigma_\Phi$  и  $\sigma_G$  выпуклы и октантообразны (см. [7]), т. е. положительный октант  $R_+^n$  является для них асимптотическим конусом. Этим же свойством обладает и компонента  $E_m$  амобы характеристического многочлена  $P(z)$ . Поэтому пересечение  $\sigma_\Phi \cap \sigma_G \cap \text{AbsLog}^{-1} E_m \neq \emptyset$ . Возьмем  $R = (R_1, \dots, R_n)$  из этого пересечения, тогда остов  $\Gamma = \{\xi \in C^n : |\xi_j| = R_j, j = 1, \dots, n\}$  лежит в области, где голоморфны функции  $\hat{\Phi}_\alpha$ ,  $\hat{G}$  и  $1/P(\xi)$  (здесь используется тот факт, что ряды  $\hat{\Phi}(\xi)$ ,  $\hat{G}(\xi)$  сходятся в  $\sigma_\Phi$  и  $\sigma_G$ ), поэтому для  $F(z)$  справедливо интегральное представление (6), которое означает, что  $F(z)$  – функция экспоненциального типа.

Стандартная оценка интеграла показывает, что  $R = (R_1, \dots, R_n) \in \sigma_F$ , таким образом  $\sigma_\Phi \cap \sigma_G \cap \text{AbsLog}^{-1} E_m \subset \sigma_F$ .

### Библиографические ссылки

1. Дубинский Ю. А. Задача Коши в комплексной области. М.: Изд-во Моск. энерг. ин-та, 1996.
2. Riquier C. Les systemes d'equations aux derivees partielles. Paris: Gauthier-Villars, 1910.
3. Гюнтер Н. М. О распространении теоремы Коши на любую систему уравнений в частных производных // Мат. сб. 1925. Т. 32, № 2. С. 367–447.
4. Казаков А. Л. Обобщенная задача Коши с данными на двух поверхностях для квазилинейной аналитической системы // Сиб. мат. журн. 2007. Т. 48, № 5. С. 1041–1055.
5. Хермандер Л. Линейные дифференциальные операторы с частными производными. М.: Мир, 1965.
6. Forsberg M., Passare M., Tsikh A. Laurent Determinants and Arrangements of Hyperplane Amoebas // Advances in Mathematics. 2000. Vol. 151. P. 45–70.
7. Ронкин Л. И. Введение в теорию целых функций многих переменных. М.: Наука, 1971.
8. Лейнартас Е. К. Устойчивость задачи Коши для многомерного разностного оператора и амоба характеристического множества // Сиб. мат. журн. 2011. Т. 52, № 5. С. 864–870.

### References

1. Dubinsky Y. A. *Zadacha Koshi v kompleksnoy oblasti* (Cauchy problem in a complex domain). Moscow, MEI, 1996, 180 p.
2. Riquier C. *Les systemes d'equations aux derivees partielles*. Paris, Gauthier-Villars, 1910.
3. Gunther N. M. *Mat. Sb.*, 1925, vol. 32, no. 2, pp. 367–447.
4. Kazakov A. L. *Sibirsk. Mat. Zh.*, 2007, vol. 48, no. 5, pp. 1041–1055.
5. Hermander L. *Lineynyye differentsial'nyye operatory s chastnymi proizvodnymi* (Linear differential operators with partial derivatives). Moscow, Mir, 1965, 380 p.
6. Forsberg M., Passare M., Tsikh A. Laurent Determinants and Arrangements of Hyperplane Amoebas. *Advances in Math.* 2000, vol. 151, pp. 45–70.
7. Ronkin L. I. *Vvedeniye v teoriyu tselykh funktsiy mnogikh peremennykh* (Introduction to the theory of entire functions of several variables). Moscow, Nauka, 1971, 430 p.
8. Leinartas E. K. *Sibirsk. Mat. Zh.*, 2011, vol. 52, no. 5, pp. 1087–1095.

© Лейнартас Е. К., Яковлев Е. И., 2013

## АНАЛИЗ ЛЕКСИЧЕСКИХ ПАР ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ДИАЛОГИЧЕСКОЙ И МОНОЛОГИЧЕСКОЙ РЕЧИ\*

Д. В. Личаргин<sup>1</sup>, А. В. Щурова<sup>1</sup>, Е. А. Курбатова<sup>1</sup>, И. В. Колбасина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 28

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: lichdv@hotmail.ru

*Рассматривается подпроблема проблемы формирования корректного и осмысленного текста посредством использования программных систем, а именно проблема формального представления ассоциативных переходов между предложениями и фрагментами текстов на естественном языке. Основной идеей решения этой подпроблемы является формализация и оценка расстояния между парами слов естественного языка как между парами векторов многомерного семантического пространства слов естественного языка. Определяются семантические координаты лексического и грамматического пространства слов, пар слов и предложений естественного языка. Приводятся примеры различных типов лексико-грамматических отношений между словами естественного языка. Рассматривается дерево генерации синонимичных предложений на основе выделения темы, ремы, связки, модальности и других уровней генерации осмысленных фраз естественного языка.*

*Ключевые слова:* искусственный интеллект, обработка естественного языка, тест Тьюринга, генерация осмысленных текстов, математическая семантика.

## LEXICAL PAIRS ANALYSIS FOR AUTOMATIC GENERATION OF DIALOGUE AND MONOLOGUE SPEECH

D. V. Lichargin<sup>1</sup>, A. V. Shchurova<sup>1</sup>, E. A. Kurbatova<sup>1</sup>, I. V. Kolbasina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

28 Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia

<sup>2</sup>Siberian State Airspace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: lichdv@hotmail.ru

*In the paper the sub-problem of the problem of correct and meaningful text formation by means of software application, and namely the problem of formal presentation of association transfers between sentences and natural language texts fragments is considered. The main idea in solving the sub-problem is to formalize and estimate the distance between natural language word pairs as pairs of vectors of multidimensional semantic space of natural language words. The semantic coordinates of lexical and grammatical space of words, word pairs and sentences of the natural language are determined. Examples of different types of lexical and grammatical relations between natural language words are offered. The tree of synonymic sentences generation is considered based on the determination of the theme, the rheme, the link, the modality and other levels of natural language meaningful phrases generation.*

*Keywords:* Artificial Intelligence, Natural Language Processing, Turing Test, Meaningful Texts Generation, Mathematical Semantics.

На сегодняшний день порождение (синтез) речи компьютером является, безусловно, важной проблемой. В данной области широко распространены и разрабатываются разнообразные системы формирования высказываний и обработки естественного языка, а также языковых баз данных различными программными системами: экспертными системами, программами электронного перевода, «ботами» (системами диалога с пользователем), синонимизаторами, программами генерации текстов по тематике «прогноз погоды», «технический справочник» и т. п.

Проблема является актуальной в связи с важностью развития систем взаимодействия человека

и компьютера на основе естественного языка (естественно-языкового интерфейса) и потребностью в формировании заданного множества осмысленных текстов различного рода с использованием соответствующих программных приложений.

Проблема генерации осмысленной речи исследуется со времен появления вычислительной техники и широко исследуется различными авторами, в частности Э. Кодда, А. Хомским, А. С. Нариньяни, М. В. Никитиным, К. Шенноном, А. И. Пиотровским, и даже задолго до появления компьютерной техники (машина Луллия и др.).

\*Исследование поддержано Министерством образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.1010.

Важными проблемами являются проблемы перевода [1; 2], машинного перевода, построения экспертных систем, естественно-языковых интерфейсов и др. Для решения этих проблем используются различные средства и методы: метод резолюций, древесный парсинг предложения, мультииерархические системы параллельного разбора (грамматики, семантики, морфологии, фонетического членения предложения и других единиц языка), объектное представление и фреймы, реляционные, многомерные и иерархические базы данных, онтологии, семантические классификации, семантические сети и многие другие.

Кроме того, особого рассмотрения требует проблема анализа семантических пар слов языка, что может позволить генерировать ассоциативно связанные диалоги и монологи на естественном языке.

Цель данной работы состоит в том, чтобы дать анализ лексических пар (слов и предложений) для генерации диалогической и монологической речи.

Задачи данной работы заключаются:

- в анализе классификации слов и смысловых понятий английского языка для ее последующего использования в качестве основы для генерации осмысленного подмножества языка;
- анализе взаимосвязей между словами и выражениями в английском языке: их пар как векторов многомерного пространства слов языка и траекторий слов и предложений как цепочки или системы векторов.

Основная идея работы состоит в построении модели естественного языка на основе многомерного представления слов и пар слов языка и в применении этой модели для решения проблемы генерации ассоциативных переходов в диалогической и монологической речи.

Новизна данной работы состоит в формальном представлении ассоциативных переходов между словами и предложениями как траекторий (функций) в многомерном семантическом пространстве [3], заданном векторами признаков семантической классификации.

Современный уровень разработки в этой области характеризуется многими в определенном смысле не до конца успешными попытками создания систем генерации осмысленной речи на более или менее широких подмножествах естественного языка. В частности, на основе корпусов текстов, данных социальных сетей и отладки семантических сетей с логическими переходами вида «вопросы – ответы», а также «вопрос 1 – вопрос 2 – ...», имеются различные реализации решения этой проблемы в некоторых приближениях (программа Alice, обучающая система «Робот Джордж» и др.).

Решение задач семантики, дискретной математики, лингвистики и искусственного интеллекта направлено на прохождение теста Тьюринга со все более

жесткими условиями, включающими в себя широкий набор слов, конструкций, фактов и эмуляции отношения к предмету разговора со стороны собеседника или выступающего.

Рассмотрим многомерное пространство объектов естественного языка: слов и выражений. Многие словосочетания могут быть сформированы правильно относительно грамматики, но при этом не иметь семантического смысла. Допустим, фраза «See I» грамматически построена неверно, фраза I eat a hat грамматически корректна, но не имеет семантического смысла, а фраза I eat a pear верна и в грамматическом, и в семантическом смысле.

Ниже приводится пример учета комбинаторики слов естественного языка, представленного в форме подстановочной таблицы, способной генерировать осмысленные фразы на английском языке (табл. 1).

Возможно построение многомерной грамматической базы данных со следующими координатами вектора понятийного описания:

- $G_1$  = Части речи {«Артикль», «Прилагательное», «Существительное», «Глагол», ...};
- $G_2$  = Члены предложения {«Определитель», «Определение», «Подлежащее», «Сказуемое», ...};
- $G_{3,1}$  = Лица {«1-е», «2-е», «3-е», «Не определено»};
- $G_{3,2}$  = Аспект {«Неопределенный», «Продолженный», «Совершенный», «Совершенный продолженный», «Не определен»};
- $G_{3,1,1}, v_{3,1,2}, \dots$  = Другие размерности, выраженные грамматическими категориями.

Далее определим лексическое пространство языка (лексический куб) со следующими координатами:

- $S_1$  = Порядок слов {Исполнитель, Действие, Реципиент, Получатель, Место, Время, Инструмент, Метод};
- $S_2$  = Тема {Еда, одежда, тело, здание, группа людей, транспорт, ...};
- $S_3$  = Варианты замены слов в предложении {to cook, to boil, to roast, to fry, to bake, ..., to eat, to chew, ...} (рис. 1).

Все грамматические конструкции располагаются в ячейках многомерного массива данных – многомерного пространства слов языка. Координаты вектора, такие как, например, V[Глагол / Признак / Совершенный, ...], определяют ячейку с грамматической конструкцией «having + ГЛАГОЛ + -(e)d». Вектор V[Прилагательное / Предикат / Первое лицо, Превосходная степень, длинное прилагательное, ...] определяет конструкцию «am the most + ПРИЛАГАТЕЛЬНОЕ». Реляционные таблицы как часть этого многомерного массива представлены в лингвистике в форме традиционных грамматических парадигм.

Таблица 1

#### Принцип генерации осмысленных фраз естественного языка методом подстановки

|                  |                                |                      |                                   |
|------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| the ... этот ... | of the ... этого ...           | is over закончится   | now сейчас                        |
| series серия     | game игра                      | is left осталось     | at the present moment в настоящем |
| season сезон     | tournament турнир              | starts начинается    | today сегодня                     |
| cycle цикл       | Olimpic games Олимпийские игры | goes on продолжается | this week на этой неделе          |

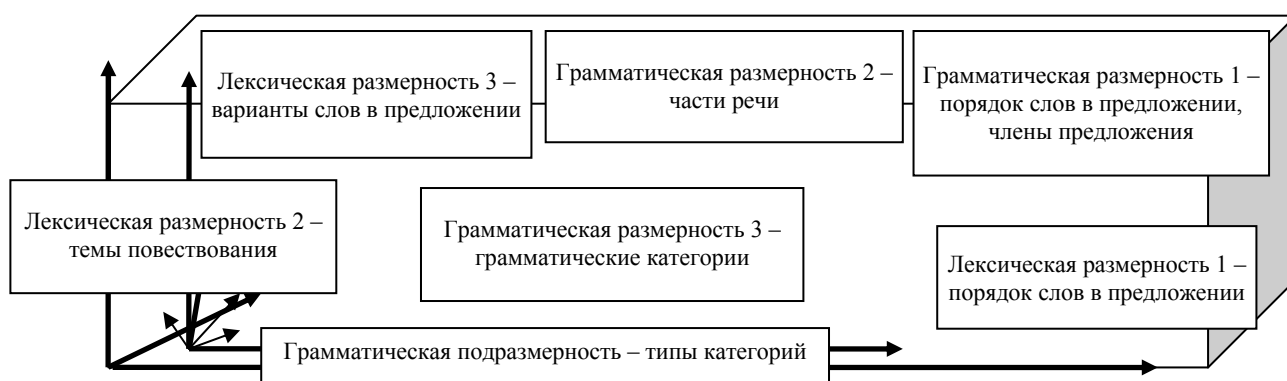


Рис. 1. Координаты многомерного лексико-грамматического подпространства леса данных естественного языка

В отличие от популярной в традиционной дисциплине «Обработка естественного языка» статистической модели языка, в которой вероятность языковых выражений определяется на основе марковских процессов и других вероятностных и статистических методов и их применения к анализу корпусов текстов на естественном языке, рассматриваемая модель представляет язык как векторизованное пространство векторизованных классификаций.

Приведем несколько примеров такого подхода [3–5], составляющего общий контекст исследования отношений между парами слов естественного языка,  $M(\langle \text{модель естественного языка} \rangle)[L(\langle \text{уровень предложения} \rangle), S(\langle \text{лексика} \rangle), G(\langle \text{грамматика} \rangle)]$  [ $O(\langle \text{порядок слов и члены предложения} \rangle)$  {субъект, предикат, объект},  $T(\langle \text{объекты по тематике изучения} \rangle)$  {идеи {науки, представления, чувства ...}, предметы {одежда, еда, части тела, здания, транспорт, ...}, существа, ...},  $V(\langle \text{варианты подстановок слов в предложение} \rangle)$  {позитивное {обожать, любить, ...}, негативное {не любить, ненавидеть, ...}, ...},  $N(\langle \text{функции предложения над точками слов} \rangle)$ ].

Такое многомерное пространство включает в себя комбинаторно сочетающиеся группы слов, например, группа слов {носить, одевать, снимать, гладить, шить, ...} относится к ячейке многомерного пространства  $M(\langle \text{модель языка} \rangle)[G(\langle \text{грамматика} \rangle)[\langle \text{отношение—существо—объект предмет} \rangle, \langle \text{одежда} \rangle; \langle \text{глагол} \rangle, \langle \text{предикат} \rangle, \langle \text{неопределенная форма} \rangle]$ . Пример подстановочной таблицы как среза многомерного понятийного пространства слов естественного языка приводится ниже.

В качестве пояснения места анализа отношений пар слов в общей модели естественного языка как леса классификаций рассмотрим группу слов {кофта, носки, куртка, майка, фартук, ...}, которая относится к ячейке многомерного массива  $M(\langle \text{модель естественного языка} \rangle)[L(\langle \text{уровень слова} \rangle), G(\langle \text{грамматика} \rangle)]S(\langle \text{семантика} \rangle)[\langle \text{объект} \rangle, \langle \text{одежда} \rangle, \langle \text{существительное} \rangle, \langle \text{субъект} \rangle, \langle \text{единственное число} \rangle]$ . Обе группы слов образуют синтагматические пары вида  $M(\langle \text{модель естественного языка} \rangle)[L(\langle \text{синтагма} \rangle), G(\langle \text{грамматика} \rangle)]S(\langle \text{семантика} \rangle)[\langle \text{объект} \rangle, \langle \text{одежда} \rangle; \langle \text{существительное} \rangle, \langle \text{субъект} \rangle, \langle \text{единственное число} \rangle] + [\langle \text{действие с объектом} \rangle, \langle \text{одежда} \rangle; \langle \text{глагол} \rangle, \langle \text{предикат} \rangle, \langle \text{неопределенная форма} \rangle], N(\langle \text{функция двух аргументов} \rangle)$ : «носить кофту», «гладить фартук», «шить носки», «снимать куртку» и т. п.

Грамматический порядок слов получает в соответствие семантические группы слов, в результате чего данное пространство становится критерием семантической и грамматической осмысленности речи. Функции определенного вида, определенной геометрии над данными группами слов с хорошей вероятностью образуют осмысленные фразы. Фрагменты этих функций представляют собой предложения осмысленного естественного языка. Функции предложений соответствуют гнездящимся деревьям уровня предложения. Для решения проблемы анализа отношений пар слов и предложений рассматриваются следующие разделы модели естественного языка на основе леса классификаций:  $M(\langle \text{модель естественного языка} \rangle)[L(\langle \text{уровень пар слов} \rangle), S(\langle \text{семантика} \rangle)[\langle \text{объект} \rangle, \langle \text{одежда} \rangle] + S(\langle \text{семантика} \rangle)[\langle \text{объект} \rangle, \langle \text{устройство} \rangle; \langle \text{действие} \rangle, \langle \text{над одеждой} \rangle]] \supseteq \{ \langle \text{кепка – стиральная машина} \rangle, \langle \text{свитер – швейная машина} \rangle, \langle \text{кофта – уют} \rangle \}$ .

Важно отметить, что рассматриваемое трехмерное лексико-семантическое пространство слов общей мультиерархической модели языка, т. е. модели на основе векторизованного леса лингвистических данных, и его различные отображения на трехмерное грамматическое пространство слов той же модели дают возможность выявлять не просто осмысленные синтагматические отношения между словами, но и различного рода ассоциативные отношения между словами и их цепочки (табл. 2).

Представленные обозначения F.G.L.Ex.S соответствуют уровням дерева шкалы вариантов подстановки слов в семантическом пространстве слов и предложений, а именно:

- Группы вариантов;
- Группа слов;
- Список слов по изменяющемуся признаку;
- Экземпляр списка;
- Стилистический вариант.

Тогда как обозначение D.A.P означает вложение уровней дерева в виде цепочек именных групп вида:

- Позиция объекта в предельно полном предложении;
- Атрибут объекта;
- Часть объекта;
- Атрибут части объекта.

Рассмотрим принцип сведения переходов между предложениями к переходам между словами на основе парсинга предложения в форме дерева актуального членения предложения с одним ключевым словом на вершине дерева парсинга.

Таблица 2

## Возможные отношения между словами со стороны шестимерного лексико-грамматического пространства

| Название лексического и грамматического отношения | Вектор многомерного пространства для слова 1 | Вектор многомерного пространства для слова 2  | Пример отношения                                                                                  |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Различие в частях речи                            | G[«Verb», B, C] + S[D, E, F]                 | G[«Noun», B, C] + S[D, E, F]                  | Love – to love                                                                                    |
| Различие в грамматической категории               | G[A, B, «Singular»] + S[D, E, F]             | G[A, B, «Plural»] + S[D, E, F]                | Fan's – fans'                                                                                     |
| Различие в теме                                   | G[A, B, C] + S[D, E1 = «Food», F = «Make»]   | G[A, B, C] + S[D, E2 = «Clothes», F = «Make»] | Cook – sew                                                                                        |
| Различие в объекте                                | G[A, B, C] + S[D, E, F.G.H]                  | G[A, B, C] + S[D, E, F.G.¬H]                  | Start > launch                                                                                    |
| Антонимы                                          | G[A, B, C] + S[D, E, F.G1.L1.Ex1]            | G[A, B, C] + S[D, E, F.G1.L1.Ex2]             | To be born – to live – to die – to revive                                                         |
| Гиперонимы                                        | G[A, B, C] + S[D, E, F...G....Ex]            | G[A, B, C] + S[D, E, F...G]                   | Mother – Parent                                                                                   |
| Гипонимы                                          | G[A, B, C] + S[D, E, F...G]                  | G[A, B, C] + S[D, E, F...G....Ex]             | Parent – Mother                                                                                   |
| Дефиниция                                         | G[A, B, C] + S[D1.0.0, E, F.G.L...]          | G[A, B, C] + S[D2.0.0, E, F.G.L...]           | Driver – Vehicle, Driver – To Drive, Driver – Route или A Cook – To Cook – Dish – Cooked – Recipe |
| Эмотивный синоним                                 | G[A, B, C] + S[D, E, F.G.L.Ex.S]             | G[A, B, C] + S[D, E, F.G.L.Ex.¬S]             | Лицо – Ряха – Лик – Харя или Waste – Spend – Have (Time)                                          |
| Аспект / часть                                    | G[A, B, C] + S[D, E, F...]                   | G[A, B, C] + S[D.0.P, E, F...]                | Traffic – Car – Wheel – Tyre                                                                      |
| Аспект / атрибут                                  | G[A, B, C] + S[D, E, F...]                   | G[A, B, C] + S[D.A, E, F...]                  | Car – Old – 15 years old, Car – Powerful – 100 house-powers                                       |

Традиционно актуальное членение предложений включает в себя деление на тему и рему, при этом рема является ключевым словом в предложении, а тема относится ко всему тексту или его фрагменту. Таким образом, на вершине дерева актуального членения предложения имеет место ключевое слово (рема); на втором уровне дерева парсинга имеют место тема и рема; на третьем уровне имеет место четверка: тема, связка, рема, модальность; на четвертом уровне добавляются обстоятельства, имеющие важную уточняющую функцию; на пятом уровне имеют место очевидные, понятные из контекста обстоятельства и конкретизация; на шестом – полупустые слова, уточняющие аспекты слов, указанных выше в дереве разбора. Например:

0. Тема повествования: «суп».

1. Ключевое слово: «вкуснятина» = «вкусный».

2. Тема–Рема: «суп – вкуснятина» = «суп – вкусный».

3. Тема–Рема–Связка–Модальность: «суп–вкусным–вышел–классно (очень хорошо)».

4. Важная конкретизация: «...вкусным и профессиональным».

5. Контекстуальная конкретизация: «суп, который готовила Аня, ...».

6. Аспекты понятий: «впечатление от супа, ..., это просто восторг от вкусняшки, профессиональной штуки...».

7. Различные эквивалентные преобразования, например двойное отрицание.

Таким образом, одну и ту же мысль, что суп вкусный, можно выразить астрономическим количеством более частных по смыслу и по форме фраз.

Приведем дополнительный пример генерации дерева синонимичных по контексту фраз. Например:

0. Тема повествования: «автомобиль».

1. Ключевое слово: «надежность».

2. Тема–Рема: «автомобиль – надежность» = «автомобиль – надежный».

3. Тема–Рема–Связка–Модальность: «автомобиль–надежным–сконструировали–профессионалы (хорошо)».

4. Важная конкретизация: «...надежным и функциональным».

5. Контекстуальная конкретизация: «автомобиль, который купил Петр, ...».

6. Аспекты понятий: «оценка автомобиля, ..., это является идеалом надежности, комфортабельного дизайна...».

7. Различные эквивалентные преобразования, например двойное отрицание: «...нисколько не опасен», «нельзя не заметить...».

Приведем дополнительные примеры: генерации последовательностей фраз на естественном языке.

1. Тема: Овощи; Рема: Разговор. Генерация предложения: Говорить об овощах → я говорю об овощах → я хочу сказать об овощах → овощи, это – то, о чем я хочу сказать (Первое предложение).

2. Тема: Овощи; Рема: Вкусно. Генерация предложения: Овощи вкусные → ... → Присутствие свежих овощей заворачивает отличным вкусом (Второе предложение).

3. Тема: Овощи; Рема: Пять часов. Генерация предложения: Овощи были в пять часов → Овощи съели в пять часов → Овощи исчезли в пять часов → Овощи исчезли с тарелок в пять часов → Ерунда, что овощи не исчезли с тарелок в пять часов (Третье предложение).

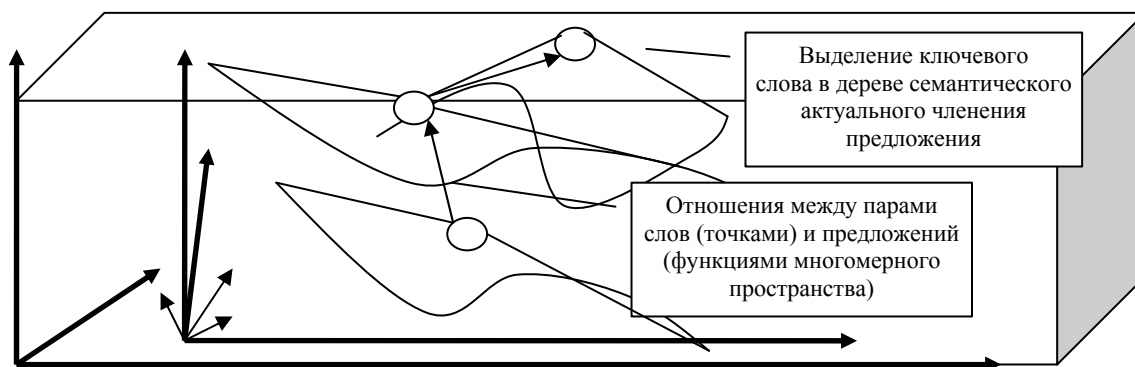


Рис. 2. Модель лексико-грамматического пространства

4. Тема: Кухня, Рема: Красивая. Генерация предложения: Кухня – красивая → Кухня приятна для еды → Сегодня кухня особенно приятна для еды → Сегодня кухня особенно приятна для «пожевать». (Четвертое предложение с элементами сленговых оборотов).

5. Тема: Повар, Рема: Хороший/профессиональный. Генерация предложений: Повар – профессионал → Повар, конечно, профессионал → Я уверен, что повар, конечно, профессионал → Я уверен, что повар, конечно, профи → Я уверен, что повар, конечно, суперпрофи (Пятое предложение с фонетическим шумом сленговой стилистики языка).

Таким образом, от модели траекторий в виде цепочек пар слов естественного языка, как точек многомерного пространства можно перейти к соответствующей траектории ключевых слов как вершин деревьев генерации каждого из вариантов синонимичных фраз языка (см. рис. 2).

Парсинг актуального членения предложения дает возможность выделить в предложении ключевое слово, тему и рему, тему–рему–связку–модальность и другие уровни. Данный парсинг отличается от грамматического парсинга и семантического анализа предложения. В связи с развитием электронного обучения [6] важным остается аспект применения генерации речи обучающих системах.

Таким образом, необходимо отметить, что проблема генерации логико-грамматических переходов между парами предложений нуждается в дальнейшем исследовании. Метод аналогии между переходами в виде пар слов и переходом между предложениями в виде дерева с одним ключевым словом на корне дерева актуального членения предложения является эффективным и нуждается в дальнейшем развитии.

### Библиографические ссылки

1. Сдобников В. В. Новый взгляд на стратегию перевода: коммуникативно-функциональный подход // Журн. Сиб. федер. ун-та. 2011. Т. 4, № 10. С. 1444–1453.
2. Алексеева И. С. Текст как доминанта перевода // Журн. Сиб. федер. ун-та. 2011. Т. 4, № 10. С. 1375–1384.
3. Сафонов К. В., Личаргин Д. В. Elaboration of a Vector-Based Semantic Classification over the Words and Notions of the Natural Language // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 5 (26). С. 52–56.
4. Сафонов К. В., Личаргин Д. В. Разработка векторизованной семантической классификации над словами и понятиями естественного языка // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (31). С. 33–37.
5. Сафонов К. В., Личаргин Д. В. Некоторые принципы автоматической генерации учебных материалов на основе баз знаний и лингвистической классификации // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 2 (42). С. 72–77.
6. Обучение математике в среде Moodle на примере электронного обучающего курса / Т. В. Зыкова, Т. В. Кытманов, Г. М. Цибульский, В. А. Шершнева // Вестн. Краснояр. гос. пед. ун-та им. В. П. Астафьева. 2012. № 1. С. 60–63.

### References

1. Sdobnikov V. V. *The Journal of SibFU*, 2011, vol. 4, № 10, pp. 1444–1453.
2. Alekseeva I. S. *The Journal of SibFU*. 2011, vol. 4, № 10, pp. 1375–1384.
3. Safonov K. V., Lichargin D. V. *Vestnik SibGAU*, 2009, № 5 (26), pp. 52–56.
4. Safonov K. V., Lichargin D. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 4 (30), pp. 33–37.
5. Safonov K. V., Lichargin D. V. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 2 (42), pp. 72–77.
6. Zykova T. V., Kytmanov T. V., Tsibulskyi G. M., Shershneva V. A. *Vestnik KSPU*, 2012, № 1, pp. 60–63.

© Личаргин Д. В., Щурова А. В.,  
Курбатова Е. А., Колбасина И. В., 2013

## О КОМПЬЮТЕРНОМ ИССЛЕДОВАНИИ К-МОДЕЛЕЙ

Т. В. Мальцева, А. В. Медведев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: nonparametric@mail.ru

*Рассматриваются модели систем нелинейных стохастических объектов без памяти, не поддающихся декомпозиции, в условиях частичной параметрической и непараметрической априорной неопределенности. Осуществляется постановка задачи моделирования в условиях, близких к реальным условиям технологических процессов, в зависимости от имеющейся априорной информации. Используются теоретические аспекты параметрической и непараметрической идентификации; вводится понятие составных векторов переменных процесса, позволяющее учесть сложный характер внутренних связей; рассматривается проблема разной дискретности измерений и принадлежности априорной информации к разным уровням. Рассматривается новый тип моделей, базирующийся на триаде «фундаментальные законы, параметризованные уравнения и непараметризованные зависимости». Приводятся новые алгоритмы, модели, представлены численные исследования. Результаты могут быть применены при моделировании технологических производственных процессов и процессов переработки, а также для описания объектов или процессов, характеризующихся большим числом связей и сложностью вследствие недостатка информации.*

*Ключевые слова:* априорная информация, комбинированная система, непараметрические оценки, многосвязность, К-модели, прогнозирование.

## ON A COMPUTER RESEARCH OF K-MODELS

T. V. Maltseva, A. V. Medvedev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: nonparametric@mail.ru

*The paper deals with a research of output prediction algorithm for a system of nonlinear stochastic static objects that can not be decomposed, in partial parametric and nonparametric uncertainty. The authors set the goal to perform modeling in conditions brought nearer to real technological industrial process conditions, due to the prior information obtained. In the approach the theoretical aspects of parametric and nonparametric identification of stochastic objects are used; term of compound vectors that allows to take account of intrastation complexity is introduced; problems of distinct discreteness of variables measurement and account of different levels of the prior information are considered. The authors present a new type of models which is based on the following triad: basic laws, parameterized and nonparameterized relations. The work contains new algorithms, models and computational investigations. The results can be applied when modeling of technological processes of production and processing, as well as in description of objects characterized with multi-linked relations and complexity resulting from the lack of information.*

*Keywords:* prior information, complex system, nonparametric estimate, multilinked system, K-models, prognostication.

Многообразие задач идентификации и моделирования обусловлено различными типами исследуемых процессов, а также разнообразием случайных возмущений, действующих на объект и в каналах связи. При этом существенная роль при формулировке задач моделирования конкретных процессов принадлежит средствам контроля и технологии измерения переменных объекта. В зависимости от объема априорной информации различают задачи идентификации в узком и широком смысле. В настоящее время наиболее полно развита теория идентификации в узком смысле. «Априорная информация об объекте при идентификации в „широком“ смысле отсутствует или очень бедная, поэтому приходится предварительно решать

большое число дополнительных задач. К этим задачам относятся: выбор структуры системы и задание класса моделей, оценивание степени стационарности и линейности объекта и действующих переменных, оценивание степени и формы влияния входных переменных на выходные, выбор информативных переменных и др. К настоящему времени накоплен большой опыт решения задач идентификации в „узком“ смысле. Методы же решения задач идентификации в „широком“ смысле начали разрабатываться только в последние годы, и здесь результаты значительно более скромные, что в первую очередь можно объяснить чрезвычайной трудностью задачи» [1]. В данной статье рассматривается задача идентификация в широком смысле.



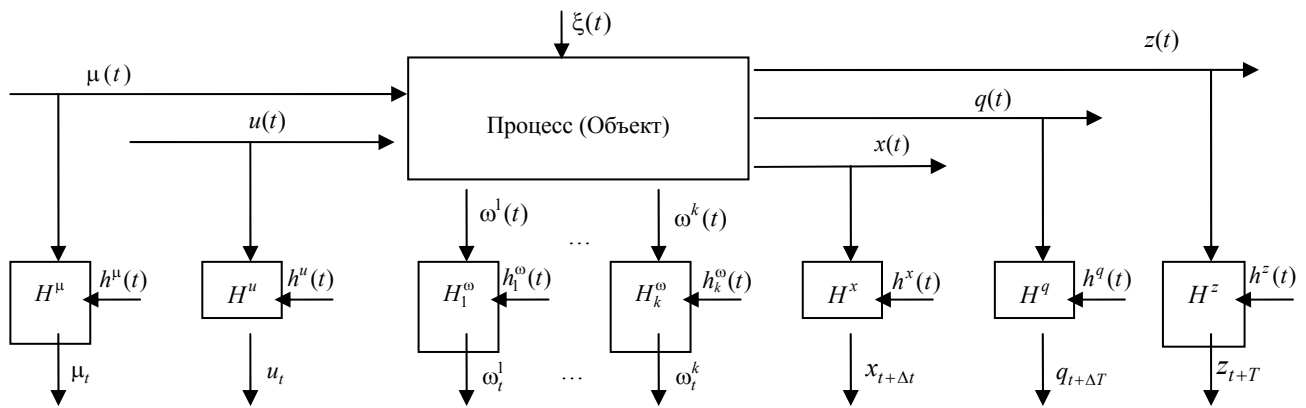


Рис. 1. Общая схема многомерного стохастического процесса  
(обозначения см. в тексте)

**Постановка задачи идентификации стохастического объекта.** При моделировании и управлении дискретно-непрерывными процессами целесообразно использовать все поддающиеся измерению переменные, но это требует тщательного анализа не только самого объекта, но и средств и технологии контроля всех доступных переменных, а также априорной информации, которая может соответствовать различным уровням [2]. Неучет тех или иных переменных, характера измерения и контроля, априорной информации, а также некоторая вольность при принятии тех или иных допущений, неизбежных при математической постановке задачи, может привести в конечном счете к негативным последствиям. Все эти вопросы часто обходятся при исследовании проблемы моделирования с теоретической точки зрения. При решении же прикладных задач это просто невозможно. Представляется уместным сделать акцент на формулировке проблемы идентификации реального процесса на самой начальной стадии. Ниже приводится новая схема многомерного стохастического объекта для задачи идентификации (рис. 1) [2].

На рис. 1 приняты следующие обозначения:  $z(t)$ ,  $q(t)$ ,  $x(t)$  – векторные выходные переменные процесса;  $u(t)$  – векторное управляющее воздействие;  $\mu(t)$  – векторная входная переменная процесса;  $\xi(t)$  – векторное случайное воздействие;  $\omega^i(t)$ :  $i = 1, 2, \dots, k$  – переменные процесса, контролируемые в том числе по длине объекта, и представляющие собой дополнительную информацию о процессе, в этом случае  $x(t)$  определяется не только значениями входных переменных, но и  $\omega^i(t)$ ;  $H^\omega$  – каналы связи, соответствующие различным переменным, включающие в себя средства контроля, приборы для измерения наблюдаемых переменных;  $\mu_t$ ,  $u_t$ ,  $\omega_t$ ,  $x_t$ ,  $q_t$ ,  $z_t$  – измерение соответствующих переменных в дискретное время  $t$ ;  $h(t)$  – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса.

Отметим также существенное отличие выходных переменных  $z(t)$ ,  $q(t)$  и  $x(t)$ . Выходные переменные  $x(t)$  контролируются через интервалы времени  $\Delta t$ ,  $q(t)$  – через существенно большие интервалы времени  $\Delta T$ ,  $z(t)$  – через  $T$  ( $T \gg \Delta T \gg \Delta t$ ) (здесь  $\Delta t$ ,  $\Delta T$  и  $T$  – дискретность, с которой происходят измерения). С прак-

тической точки зрения для исследуемого процесса наиболее важным часто является контроль переменных  $z(t)$ . Например, выходные переменные  $x(t)$  контролируются с помощью индукционных, емкостных и других датчиков,  $q(t)$  – на основе лабораторных анализов, а  $z(t)$  – в результате длительного химического анализа, физико-механических испытаний и др. Этим и обусловлено существенное отличие дискретности контроля выходных переменных  $x(t)$  и  $z(t)$ . Особенностью здесь является то, что измеренное значение выхода станет известным только через определенные промежутки времени. Этим и объясняется запаздывание в измерениях выходных переменных объекта.

При моделировании подобных процессов, учитывая различную дискретизацию измерений  $z(t)$ ,  $q(t)$  и  $x(t)$ , при прогнозировании  $z(t)$  и  $q(t)$  естественно использовать не только входные переменные  $x(t)$ , но и весь набор переменных, влияющих на прогноз  $z(t)$  и  $q(t)$ :

$$q(t) = A(u(t), \mu(t), \omega(t), x(t), \xi(t), t), \quad (1)$$

$$z(t) = A(u(t), \mu(t), \omega(t), x(t), q(t), \xi(t), t). \quad (2)$$

Отличающиеся средства контроля даже для одних и тех же процессов приводят к различным формулировкам задач идентификации. Главное, что следует выделить в этой проблеме, состоит в том, что нередко динамический объект мы вынуждены рассматривать как статический с запаздыванием из-за длительной процедуры контроля некоторых переменных, существенно превышающей постоянную времени объекта.

**Идентификация комбинированных многосвязных систем.** Часто при наблюдении реального процесса можно столкнуться с ситуацией отсутствия информации о виде его некоторых каналов связей и вследствие этого – большой трудоемкости получения их параметрических моделей. Вместе с тем часть связей подчиняется известным физическим, химическим законам, и, как справедливо замечено в [3], «не требуется, однако, специальной математической теории, чтобы понять, что пренебрежение законами природы и общества (будь то закон тяготения, закон стоимости или необходимость обратной связи), падение компетентности специалистов и отсутствие

личной ответственности за принимаемые решения приводят рано или поздно к катастрофе». Таким образом, объекты системы могут быть изучены в разной степени, т. е. априорная информация может принадлежать к разным уровням, что приводит к появлению различных математических постановок задач с точки зрения математической строгости.

Потребность в получении моделей таких систем возникает часто, и тратить годы на то, чтобы выявить и учесть все факторы, влияние которых может иметь значение, ждать появления новых измерительных комплексов для получения достоверных данных, нет возможности. Вследствие этого возникают допущения, предположения и гипотезы об объекте, которые зачастую имеют отдаленное отношение к реальности. Здесь имеются в виду процессы, основные черты которых состоят в недостатке априорной информации, воздействии случайных факторов, характеристики которых нам не известны, несовершенстве средств контроля переменных, непредставительности отбора проб для измерений и многом другом. Наше незнание приходится, к сожалению, заменять, говоря «Пусть...». Если наши допущения достаточно близки к реальности, то в итоге можно рассчитывать на успех при решении той или иной задачи, если же нет, то неудача неизбежна. Действительно, многие процессы и объекты, в основе функционирования которых лежат фундаментальные законы физических, химических, электрических, механических и других явлений, могут быть описаны с высокой степенью точности. Соответственно для них могут создаваться и модели и системы управления достаточно высокого качества, что во многих случаях имеет место.

Если же допущения слишком грубые, то, видимо, есть два пути. Первый путь – это восполнение нашего незнания о процессе, когда можно будет сделать адекватную с математической точки зрения постановку задачи. В данной работе мы будем придерживаться второго пути, который состоит в развитии математического подхода, адекватного тому уровню априорной информации, которым мы реально располагаем. Проблема заключается в том, как совместить в модели разные уровни априорной информации о внутренних

процессах, учесть связи между объектами и одновременно рассматривать систему как единое целое.

Математические модели процессов, которые строятся в условиях, когда априорная информация об исследуемом объекте может одновременно принадлежать к нескольким уровням, и базируются на триаде «фундаментальные законы, параметризованные зависимости и качественные связи, представленные с точностью до переменных», будем называть *K*-моделями [2].

Рассмотрим задачу построения *K*-моделей производственных комплексов с непрерывным характером технологического процесса. Сложность объекта представляется не только в большой размерности вектора переменных, но и в присутствии обратных и перекрестных потоков в технологическом комплексе, что предопределяет зависимость некоторых выходных переменных не только от входа объекта, но и от других выходных переменных. Многосвязным объектом будем называть объект, который описывается некоторой системой неявных функций от входных и выходных переменных. Это могут быть агрегаты внутри цеха, совокупность цехов на предприятии, предприятия, объединенные в производственные комплексы, торговые и банковские сети и пр. (рис. 2).

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, 5$  – входные переменные (и приведенные к ним);  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, 8$  – выходные переменные (и приведенные к ним);  $\xi$ ,  $h$  – случайные помехи с нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией, действующие на объекты и в каналах измерения.

Как видно, наличие обратных связей приводит к тому, что некоторая часть компонент вектора выхода зависит от других его компонент и исследуемый класс объектов описывается не в традиционной форме «вход – оператор связи – выход», а в виде некоторой системы уравнений, определяющих соответствующие неявные функции. Сложный характер внутренних связей приводит нас к составным векторам – векторам, составленным из различных компонент соответствующих векторов входных и выходных переменных, участвующих в описании интересующей нас связи [2]. Например, для объекта 1 на рис. 2 составными векторами будут  $x^{(1)} = (x_1, x_2, x_3)$  и  $y^{(1)} = (y_1, y_2)$ .

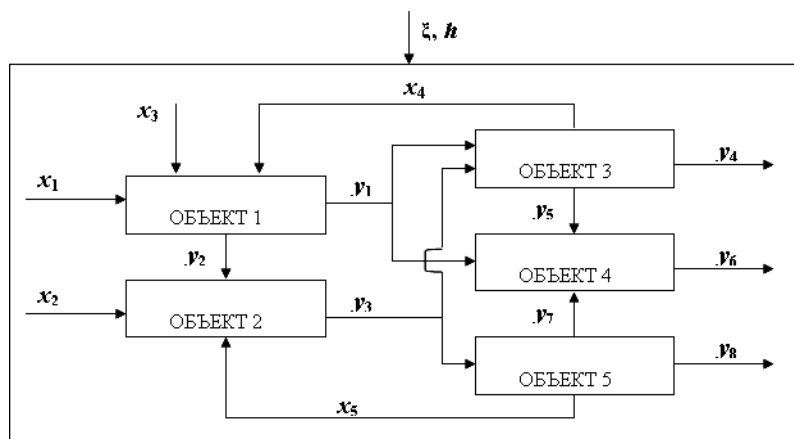


Рис. 2. Условная блок-схема многосвязного объекта (обозначения см. в тексте)

Сформулируем задачу. Пусть для многомерного статического объекта, подверженного действию неконтролируемых возмущений, со случайными ошибками, имеющими нулевое математическое ожидание и ограниченную дисперсию, могут быть проведены наблюдения  $\{X[t], Y[t]\}$ ,  $t = 1, 2, \dots, N$  вектора состояний  $\{X, Y\}$ . Плотности вероятностей  $p(X)$ ,  $p(Y)$  неизвестны, но существуют для  $X \in \Omega(X)$  и  $Y \in \Omega(Y)$ , являющихся элементами некоторых замкнутых ограниченных областей в соответствующих пространствах, причем  $p(X) \neq 0 \forall X \in \Omega(X)$ . Известно, что переменные  $\{X, Y\}$  на объекте связаны соотношениями, некоторые из которых известны точно (на основании фундаментальных законов), другие известны с точностью до набора параметров, а некоторые в силу недостатка априорной информации о структуре не могут быть параметризованы и представлены качественными соотношениями «вход–выход».

Тогда, имея выборку наблюдений  $\{X[t], Y[t]\}$ ,  $t = 1, 2, \dots, N$ , требуется найти такое значение выходной величины  $Y \in \Omega(Y)$ , которое соответствует заданному входному воздействию  $X = \tilde{X} \in \Omega(X)$ , т. е. осуществить прогноз выхода системы по заданному входному воздействию.

#### Алгоритм прогноза комбинированной системы.

В данной статье будем рассматривать класс нелинейных статических объектов, никакие из внутренних связей которых не могут быть описаны фундаментальными законами (частный случай  $K$ -моделей). В соответствии с этим представим модель системы в виде [4]

$$F_N(X, Y) = \begin{cases} F_{Nj}(X^{(j)}, Y^{(j)}) = 0, j = \overline{1, m}, m \leq l, \\ y_j - \varphi_{Nj}(X^{(j)}, Y^{(j)}) = 0, j = \overline{m+1, l}, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\varphi_{Nj}(X^j, Y^j) = \frac{\sum_{t=1}^N y_j[t] \Phi\left(\frac{X^j - X^j[t]}{C_{X^j}}\right) \Phi\left(\frac{Y^j - Y^j[t]}{C_{Y^j}}\right)}{\sum_{t=1}^N \Phi\left(\frac{X^j - X^j[t]}{C_{X^j}}\right)} \quad (4)$$

– непараметрические оценки качественных зависимостей по наблюдениям вектора состояний объекта;  $F_{jN}(\dots)$  – параметризованные компоненты соответствующих вектор-функций.

Для получения прогноза в интересующей нас точке необходимо решить систему (3) при заданном входном воздействии  $X = \tilde{X}$ . Рассмотрим метод, который позволяет получать прогноз выхода комбинированных многосвязных систем и учитывать при этом то, что система представлена неявными функциями.

На первом этапе была получена модель исследуемой системы в виде (3). Далее нам необходимо найти решение системы в заданной прогнозной точке. Но тут мы сталкиваемся с высокой сложностью решения, из которой вытекают, следующие проблемы [5]: недостаточная точность получаемого решения; неоднозначность корня; трудоемкость настройки параметров размытости самой модели.

Рассмотрим частный случай. Первые две проблемы были решены использованием системы специального вида [5]:

$$F = \begin{cases} (x_1 - y_1) \cdot (x_2 - y_2) \cdot (x_3 - y_3) \cdot (x_4 - y_4) + (x_5 - y_5) = 0, \\ (x_1 - y_1) \cdot (x_2 - y_2) \cdot (x_3 - y_3) \cdot (x_5 - y_5) + (x_4 - y_4) = 0, \\ (x_1 - y_1) \cdot (x_2 - y_2) \cdot (x_5 - y_5) \cdot (x_4 - y_4) + (x_3 - y_3) = 0, \\ (x_1 - y_1) \cdot (x_5 - y_5) \cdot (x_3 - y_3) \cdot (x_4 - y_4) + (x_2 - y_2) = 0, \\ (x_5 - y_5) \cdot (x_2 - y_2) \cdot (x_3 - y_3) \cdot (x_4 - y_4) + (x_1 - y_1) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

которая не только позволила избежать необходимости решения нелинейной системы на этапе генерации выборки, но и обеспечила наличие единственного изолированного корня в области существования решения.

Тем не менее вопрос получения качественной модели оставался открытым. Сложность настройки параметров размытости требовала максимального упрощения и отказа от оптимизационных процедур. Рассматривалось максимально небольшое число точек пространства, что приводило к некачественной настройке модели и в свою очередь вело к недопустимым погрешностям в прогнозе.

На рис. 3 приведен фрагмент выхода многомерной модели в сечении: зависимость выходной переменной  $y_1$  от входных переменных  $x_1$  и  $x_2$ . Крестиками показан выход модели при заданных значениях входных переменных, точки выборки обозначены на рисунке кружками. Расхождение полученной модели с выборочными данными наблюдалось и по другим сечениям. Ошибки моделирования, возникшие вследствие отказа от оптимизации параметров модели из-за высокой сложности, негативно сказываются на качестве прогноза.

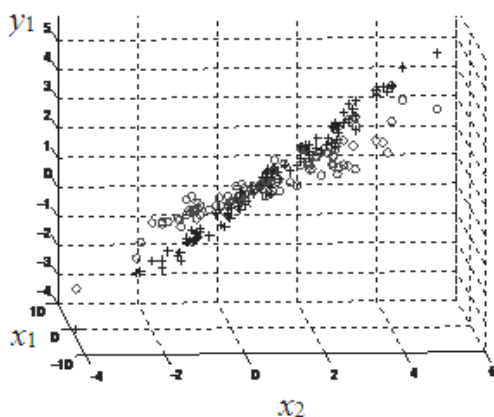


Рис. 3. Пример расхождения модели с выборочными данными

Таким образом, стандартный подход, использующий решение системы нелинейных уравнений, в данной задаче оказался неприменим.

В качестве оценки решения замкнутых алгебраических систем нелинейных уравнений (3) было решено использовать непараметрическую статистику, которая бы позволяла работать не с решением систем, а с отклонением системы от нуля [2; 4]:

$$y_{jN} = \frac{\sum_{t=1}^N y_j[t] \prod_{j=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{C_{\varepsilon_j}}\right)}{\sum_{t=1}^N \prod_{j=1}^l \Phi\left(\frac{0 - \varepsilon_j[t]}{C_{\varepsilon_j}}\right)}, \quad j = \overline{1, l}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_j[t]$ ,  $j = \overline{1, l}$ ,  $t = \overline{1, N}$  – некоторая рабочая выборка невязок системы (3), специальным образом сгенерированная на основе исходной выборки «вход–выход»:

$$\varepsilon_j[t] = F_{jN}(\tilde{X}, Y[t]), \quad j = \overline{1, m}, \quad t = \overline{1, N}. \quad (7)$$

Использование непараметрической статистики (6) при получении прогноза позволяет, во-первых, избежать сложности решения нелинейных систем, а во-вторых, учесть их многосвязность.

**Численные исследования.** В качестве объекта моделирования выбрана система (5). Первоначально была исследована зависимость ошибки прогноза\* от степени неопределенности системы – числа уравнений в системе, не поддающихся параметризации и представленных непараметрической оценкой вида (4). Рассматривались случаи от систем, состоящих только из параметрических уравнений (в модели (3)  $m = l$ ), до систем, все связи которых описаны качественно (в модели (3)  $m = 0$ ). Для каждого случая проводилась серия из десяти опытов, фиксировалось среднее время вычисления и средняя ошибка в серии (табл. 1).

В работе [5] путем проверки статистической гипотезы об однородности с использованием непараметрических тестов было показано, что работоспособность алгоритма не зависит от степени неопределенности системы. Однако, как и в [5], обратим внимание, что данный результат получен в случае отсутствия помехи. Значительная помеха, являясь причиной ухудшения качества непараметрической оценки, может сказываться на качестве непараметрических оценок и, вследствие этого, на точности прогноза. В этом случае степень неопределенности системы будет иметь прямое влияние на ошибку прогноза.

Следующим этапом стало исследование зависимости точности получаемого прогноза от объема выборочных данных. Этот момент весьма актуален: высокая размерность задачи требует в общем случае выборки большого объема, а следовательно, привлечения кадровых, финансовых и временных ресурсов, а также значительного времени для осуществления расчетов и получения конечного результата. Поэтому представляет интерес исследование влияния объема выборочных данных на качество прогноза, получаемого с помощью модели (3).

В результате проведения экспериментов и последующей статистической обработки полученных данных [5] было установлено, что в случае отсутствия помехи наблюдается тенденция к повышению точности прогноза с ростом объема выборочных данных, при этом степень влияния этого фактора не значительна (табл. 2).

Наконец, рассмотрим степень влияния аддитивной помехи, действующей в каналах измерения на точность прогноза (табл. 3). В данном случае помеха вводилась по среднеквадратичному отклонению от точки, в которой дается прогноз (напомним, что выбрана система специального вида (5), которая обращается в ноль при равенстве входных и соответствующих выходных сигналов).

Таблица 1

Влияние степени неопределенности системы на ошибку прогноза\*\*

| Число уравнений – 5, объем выборки – 300, интервал изменения входов – $[-2; 2]$ , помеха отсутствует |          |          |          |          |          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Количество непараметрических уравнений в системе                                                     | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        |
| Средняя ошибка в серии                                                                               | 0,178 28 | 0,228 66 | 0,194 13 | 0,227 31 | 0,207 61 |
| Время вычисления                                                                                     | 10       | 18       | 25       | 32       | 40       |

Таблица 2

Зависимость ошибки прогноза выхода от объема выборочных данных\*\*

| Число уравнений – 5, непараметрических – 3, интервал изменения входов – $[-2; 2]$ , помеха отсутствует |          |          |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Объем выборки                                                                                          | 10       | 50       | 100      | 200      | 300      | 400      | 500      |
| Средняя ошибка                                                                                         | 1,150 00 | 0,558 22 | 0,310 48 | 0,231 00 | 0,182 05 | 0,159 60 | 0,169 58 |
| Время вычисления                                                                                       | 1        | 2        | 4        | 12       | 25       | 40       | 57       |

Таблица 3

Влияние уровня помехи на ошибку прогноза выхода системы\*\*

| Число уравнений – 5, непараметрических – 3, интервал изменения входов – $[-2; 2]$ , объем выборки – 500 |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Помеха                                                                                                  | 0        | 0,001    | 0,01     | 0,05     | 0,1      | 0,2      | 0,5      | 1        |
| Средняя ошибка                                                                                          | 0,182 05 | 0,227 88 | 0,210 76 | 0,160 17 | 0,233 70 | 0,194 73 | 0,229 25 | 0,280 59 |

\*Под ошибкой прогноза здесь понимается суммарное абсолютное отклонение по всем компонентам выхода.

\*\*Полную таблицу экспериментов см. в [5].

Результаты экспериментов показывают, что с ростом величины помехи прогноз выхода ухудшается, что вполне естественно. При этом стоит отметить, что даже при больших помехах отклонение по компоненте в среднем было не больше 7 % [5].

В данной статье рассмотрен случай, когда наличие обратных связей в системе приводит к тому, что некоторая часть компонент вектора выхода зависит от других его компонент. При этом часть соотношений, описывающих внутренние каналы связи, на основе априорных сведений (например, законов сохранения, физико-химических закономерностей) может быть задана полностью. Другая часть этих соотношений неизвестна и определяется качественным образом с точностью до переменных. Другой сложностью данной ситуации является нелинейный характер зависимостей, а также то, что уравнения системы в силу многосвязности представляют собой неявные функции. Для получения прогноза в случае, когда априорная информация о процессе принадлежит нескольким уровням, предлагается использование непараметрического подхода, базирующегося на нахождении отклонений модели системы от нуля. Установлена слабая чувствительность алгоритма к степени неопределенности системы, что позволяет применять его даже в том случае, когда нет какой-либо информации о структуре системы и входящих в нее объектах. Открытыми остались вопросы неединственности решения многосвязной системы, а также наличия неточностей в параметрической и непараметрической частях модели. Кроме того, нерешенной осталась проблема

сложности вычислений, что предполагает возможность создания различных модификаций алгоритма.

### Библиографические ссылки

1. Райбман Н. С. Что такое идентификация? М. : Наука, 1970.
2. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (31). С. 4–9.
3. Арнольд В. И. Теория катастроф. М. : Наука, 1990.
4. Красноштанов А. П. Комбинированные многосвязные системы. Новосибирск : Наука, 2001.
5. Мальцева Т. В. Исследование алгоритма прогноза выхода комбинированной многосвязной системы // Молодой ученый. 2011. Вып. 6. С. 73–79.

### References

1. Raibman N. S. *Chto takoe identifikatsiya?* (What is identity?). Moscow, Nauka, 1970, 345 p.
2. Medvedev A. V. *Vestnik SibGAU*. 2010, № 4 (30), pp. 4–9.
3. Arnold V. I. *Teoriya katastrof* (Catastrophe theory). Moscow, Nauka, 1990, 128 p.
4. Krasnoshtanov A. P. *Kombinirovannye mnogosvyaznye sistemy* (Combined multiply the system). Novosibirsk, Nauka, 2001, 176 p.
5. Maltseva T. V. *Molodoy ucheniy*. 2011, no. 6, pp. 73–79.

© Мальцева Т. В., Медведев А. В., 2013

УДК 62.501

## ТЕОРИЯ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ. УПРАВЛЕНИЕ-I

А. В. Медведев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: Saor\_medvedev@sibsau.ru

*Излагаются некоторые сведения о параметрической теории управления дискретно-непрерывными процессами, в частности, теории дуального управления и параметрической теории адаптивных систем. Обсуждается вопрос о месте теории непараметрических систем в общей теории управления. Предлагаются новые замкнутые схемы построения непараметрических систем управления. Основная идея состоит в построении И-регуляторов, представляющих собой прообраз обратного оператора объекта. Особенность отыскания его обусловлена тем, что вид оператора объекта неизвестен. Он восстанавливается на основании наблюдений «входных-выходных» переменных процесса. Приведены непараметрические алгоритмы дуального управления. Обсуждаются проблемы математических постановок задач моделирования и управления в условиях непараметрической неопределенности. А также специально анализируется вопрос о контроле переменных, характеризующих состояние процесса. Рассматриваются некоторые непараметрические алгоритмы управления и приводятся результаты вычислительных экспериментов.*

*Ключевые слова:* априорная информация, дискретно-непрерывный процесс, дуальное управление, непараметрические алгоритмы управления, адаптивное управление.

## THEORY OF NONPARAMETRIC SYSTEMS. CONTROL-I

A. V. Medvedev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: Saor\_medvedev@sibsau.ru

*The author presents the information about the nonparametric control theory of discrete-continuous processes, in particular, the theory of control duality and nonparametric theory of adaptive systems. The question about the place of the nonparametric systems theory in the general theory of control is discussed. The paper offers new closed schemes of non-parametrical control systems. The main idea is in  $H$ -regulators design, that represents a prototype of the inverse operator of the object. The peculiarity of its search is motivated with the fact that a type of the object is unknown. It is restored on the basis of the «input-output» observations of the variables process. The nonparametric algorithms of dual control are given. The problems of the mathematical problems statements of modeling and control in the conditions of non-parametric uncertainty are discussed. The problems of variables control characterizing the state of the process are specially are analyzed. Some control algorithms are discussed and the computational results of experiments are presented.*

**Keywords:** *priori information, discrete and continuous process, dual control, nonparametric algorithms of control, adaptive control.*

Теория – в виду практики.

Девиз конгрессов IFAC

Строго говоря, действенность любого конкретного метода зависит от истинности имеющейся информации.

K. P. Pao

Современная теория управления в значительной степени относится к классу параметрических. Это означает, что на этапе формулировки задачи идентификации и управления предполагается каким-то образом выбранная параметрическая структура, описывающая процесс, или некоторое уравнение, известное с точностью до параметров. Ранее [1] были описаны непараметрические алгоритмы управления, которые тесно связаны с имеющейся априорной информацией. Часто априорной информации бывает недостаточно для обоснованного выбора параметрического класса моделей. Это один из камней преткновения как в теории моделирования, так и в теории управления. Основное внимание в дальнейшем мы уделим задачам непараметрического дуального управления. Более того, нас будет интересовать прежде всего управление в условиях непараметрической неопределенности, а также случай, когда дискретно-непрерывный процесс может быть отнесен к классу как безынерционных с запаздыванием, так и динамических.

**Теория дуального управления.** Феномен дуализма в системах управления был открыт в 1962 г. А. А. Фельдбаумом и в последующем существенно развит им и его последователями. Сущность дуализма состоит в том, что управляющие воздействия носят двойственный характер. Они, как замечает А. А. Фельдбаум, «должны быть в известной мере изучающими, но, в известной мере, направляющими» [2]. Приведем схему дуального управления (рис. 1) [2].

Введем следующие обозначения:  $x_s^*$  – задающее воздействие, которое смешивается с шумом  $h_s^*$  и поступает в качестве  $y_s^*$  в регулятор; выход объекта  $x_s$  также смешивается с шумом  $h_s$  в виде  $y_s$  и поступает в регулятор; управляющее воздействие  $u_s$  смешивается с помехой  $g_s$  и поступает в виде  $v_s$  на объект, который находится под воздействием помехи  $\xi_s$ ;  $s$  – дискретное время;  $H^*$ ,  $H$ ,  $G$  – каналы связи.

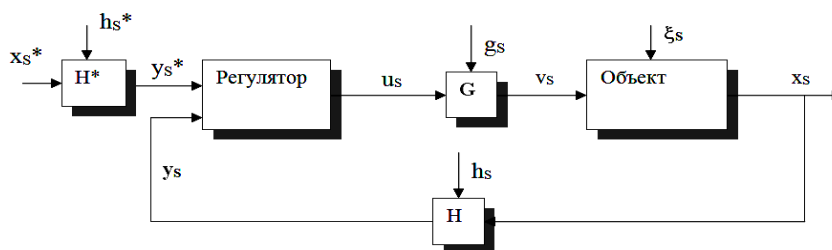


Рис. 1. Общий вид системы управления

Далее предполагается следующее:

– рассматриваемая задача – байесова,  $h_s^*$ ,  $h_s$ ,  $g_s$  – последовательности независимых случайных величин с неизменными плотностями вероятности  $P(h_s^*)$ ,  $P(h_s)$ ,  $P(g_s)$ ;  $\xi_s = \xi(s, \mu)$ , где  $\mu$  – случайный вектор с известной априорной плотностью вероятности  $P(\mu)$ . Аналогично полагаем  $x_s = x(\lambda, s)$ , где  $\lambda$  – случайный вектор с заданной плотностью вероятности  $P(\lambda)$  и все внешние воздействия –  $\xi_s$ ,  $h_s^*$ ,  $h_s$ ,  $g_s$ ,  $x_s^*$  – статистически независимы;

– объект не имеет памяти и описывается уравнением  $x_s = F(\xi_s, v_s)$ , где  $F$  – ограничена, однозначна и дифференцируема;

– способы комбинации сигнала и шума считаются известными и неизменными, т. е.  $y_s^* = y^*(x_s^*, h_s)$ ,  $v_s = v(u_s, g_s)$ ,  $y_s^* = y^*(x_s^*, h_s)$  вместо которых и вероятностных характеристик шумов можно сразу задать условные плотности вероятности  $P(v_s / u_s)$ ,  $P(y_s / x_s)$ ,  $P(y_s^* / x_s^*)$ .

Введем удельную функцию потерь  $W_s = W(s, x_s, x_s^*)$ , тогда общая функция потерь  $W$  имеет вид [2]

$$W = \sum_{s=0}^n W_s(s, x_s, x_s^*). \quad (1)$$

Назовем оптимальной систему, для которой полный риск минимален,  $R_S$  – удельный риск:

$$R = M\{W\} = \sum_{s=0}^n M\{W_s(s, x_s, x_s^*)\} = \sum_{s=0}^n R_s. \quad (2)$$

Будем считать, что регулятор в общем случае обладает памятью и характеризуется случайной стратегией. Введем временные векторы  $\vec{u}_s = (u_0, \dots, u_s)$ ,  $\vec{x}_s = (x_0, \dots, x_s)$  и по аналогии  $\vec{v}_s, \vec{x}_s^*, \vec{y}_s^*, \vec{y}_s, 0 \leq s \leq n$ .

Теперь поставим задачу отыскания оптимальной случайной стратегии регулятора, т. е. оптимальных плотностей вероятности [2]

$$P_s(u_s) = \Gamma_s(u_s / \vec{u}_{s-1}, \vec{y}_{s-1}, \vec{y}_s^*), \quad 0 \leq s \leq n, \quad (3)$$

при которых полный риск  $R$  минимален.

Поскольку  $\Gamma_s$  суть плотность вероятности, то

$$\Gamma_s \geq 0, \quad \int_{\Omega(u_s)} \Gamma_s(u_s) d\Omega = 1. \quad (4)$$

Здесь  $\Omega(u_s)$  – область возможных значений  $u_s$ , а  $d\Omega$  – ее бесконечно малый элемент.  $\Gamma_s$ ,  $s = 0, \dots, n$  называются удельными стратегиями, а их совокупность – полной стратегией. В подобной постановке задача управления была рассмотрена в [2]. Несколько иная трактовка теории дуального управления была дана Я. З. Цыпкиным в [3].

**Непараметрическое дуальное управление.** В теории дуального управления [2] и теории адаптивных

систем [3] предполагается математическое описание объекта с точностью до вектора параметров. В большинстве случаев априорной информации недостаточно, чтобы обоснованно выбрать параметрическую модель исследуемого процесса. Поэтому приходится проводить серию экспериментов на объекте (часто длительных и дорогостоящих), чтобы качественно, с практической точки зрения, решить задачу идентификации.

В условиях непараметрической неопределенности [4] уравнение процесса с точностью до вектора параметров не известно, но известны свойства объекта качественного характера, например однозначность характеристик или неоднозначность для безынерционных процессов; линейность или тип нелинейности для динамических. Если вид уравнения, описывающего процесс, не известен, то известные параметрические методы теории управления [2; 3] не применимы для решения задач идентификации и управления.

Введем оператор объекта  $A$ , описывающий процесс, т. е.

$$x(t) = A < u(t) >, \quad (5)$$

где  $u(t)$  – управляющее воздействие,  $x(t)$  – выходная переменная объекта.

Если существует оператор, обратный  $A$ , т. е.  $A^{-1}$ ,  $A^{-1}A = I$  – единичный оператор, то

$$A^{-1}x(t) = A^{-1}A < u(t) >, \quad u(t) = A^{-1}x(t). \quad (6)$$

Задавая теперь траекторию  $x(t) = x^*(t)$ , находим из (6) идеальное значение  $u^*(t)$ . Таким образом (6) может быть отнесен к категории идеальных регуляторов. В дальнейшем будем его называть И-регулятором, чтобы отличить от многих известных. Однако проблема состоит в том, что в большинстве случаев его построить нельзя, тем более что оператор  $A$  – неизвестен. Попытка, как-то, хотя бы частично, решить эту проблему введением в УУ корректирующих цепочек, компенсирующих звеньев предпринимались. В некоторых технических системах это приводило к успеху.

Рассмотрим частный случай. Пусть объект описывается линейным дифференциальным уравнением неизвестного порядка. В этом случае при нулевых начальных условиях  $x(t)$  определится формулой [5]:

$$x(t) = \int_0^t h(t-\tau)u(\tau)d\tau, \quad (7)$$

где  $h(t-\tau)$  – весовая функция системы, является производной переходной функции  $k(t)$ , т. е.  $h(t) = k'(t)$ . Известно, что обратным оператором (7) является оператор [5]

$$u(t) = \int_0^t v(t-\tau)x(\tau)d\tau, \quad (8)$$

где  $v(t)$  – весовая функция объекта в направлении «выход-вход» и  $v(t) = w'(t)$ , где  $w(t)$  – переходная

функция системы в том же направлении. В этом случае  $A$  представлен оператором (7), а  $A^{-1}$  – выражением (8). Следовательно, теперь проблема состоит в отыскании весовых функций  $h(t)$ ,  $v(t)$ . Один из возможных путей решения этого вопроса состоит в решении уравнения Винера–Хопфа. Другой – в снятии переходной характеристики на реальном объекте с последующей оценкой его весовой функции по результатам измерений  $\{x_i = k_i, t_i, i = \overline{1, s}\}$ .

Непараметрическая модель (7) будет иметь вид

$$x_s(t) = \int_0^t h_s(t - \tau, \vec{k}_s, \vec{t}_s) u(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где  $\vec{k}_s$ ,  $\vec{t}_s$  – временные векторы  $\vec{k}_s = (k_1, \dots, k_s)$ ,  $\vec{t}_s = (t_1, \dots, t_s)$ , а  $h_s(\cdot)$  равна

$$h_s(t) = \frac{1}{sc_s} \sum_{i=1}^s k_i H' \left( \frac{t - t_i}{c_s} \right), \quad (10)$$

$H(\cdot)$  – колоколообразные (ядерные) функции,  $c_s$  – параметр размытости, удовлетворяющие некоторым условиям сходимости [4].

Весовую функцию  $v(t)$  в направлении «выход-вход», а также переходную  $w(t)$  на объекте «снять» нельзя. Было предложено переходную функцию  $v(t)$  снять на модели в направлении «выход-вход», т. е. «вспять». По-видимому, впервые это было сделано в [6]. Таким образом, из соотношения

$$x_s(t) = l(t) = \int_0^t h_s(t - \tau, \vec{k}_s, \vec{t}_s) u(\tau) d\tau \quad (11)$$

можно получить выборки  $\{u_j, t_j, j = \overline{1, s}\}$ . Тогда непараметрический алгоритм управления линейной динамической системой примет вид

$$u_s^*(t) = \int_0^t \left( \frac{1}{sc_s} \sum_{j=1}^s w_j H' \left( \frac{t - \tau - t_j}{c_s} \right) \right) x^*(\tau) d\tau, \quad (12)$$

где  $x^*(\tau)$  – задающее воздействие, интегрирование выражений (11)–(12) осуществляется численно. Регулятор (8) и его численный аналог (12) назовем И-регулятором.

Ясно, что объемы выборок при «снятии» переходных характеристик на реальном объекте и на модели могут не совпадать. Фрагмент работы алгоритма (12) будет представлен ниже.

Поскольку операторы  $A$  и  $A^{-1}$  по реальным данным будут оценены не точно, то возникает необходимость несколько изменить схему «включения» на входе объекта блок  $A_s^{-1}$ , добавив обратную связь (рис. 2).

Отметим, что неизвестные операторы  $A$  и  $A^{-1}$  оценивались по исходным переходным характеристикам процесса (уравнение процесса было неизвестно) в классе непараметрических статистик [4].

На рис. 2:  $A_s^{-1}$  – непараметрическая оценка обратного оператора объекта,  $u_s^*$  – выход (оценка  $A^{-1}$ ), помеха  $h_x^t$  действует в канале обратной связи. Непараметрический алгоритм дуального управления имеет вид

$$u_{s+1} = u_s^* + \Delta u_{s+1}, \quad (13)$$

здесь  $u_s^*$  определяется по формуле (12), а  $\Delta u_{s+1} = \varepsilon(x_{s+1}^* - x_s)$  – поисковые шаги. Таким образом, в  $u_s^*$  сосредоточены «знания» об объекте, а  $\Delta u_{s+1}$  – «изучающие» поисковые шаги. В этом и состоит дуализм алгоритма (13).

Поясним его на примере безынерционного объекта  $x = f(u, \mu)$ , в качестве оценки которого примем непараметрическую оценку функции регрессии по наблюдениям  $\{x_i, u_i, \mu_i, i = \overline{1, s}\}$ , где  $\mu$  – контролируемое, но неуправляемое входное воздействие [4]:

$$x_s(u, \mu) = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \Phi \left( \frac{u - u_i}{c_s} \right) \Phi \left( \frac{\mu - \mu_i}{c_s} \right)}{\sum_{i=1}^s \Phi \left( \frac{u - u_i}{c_s} \right) \Phi \left( \frac{\mu - \mu_i}{c_s} \right)}, \quad (14)$$

где колоколообразные функции  $\Phi(\cdot)$  и параметр размытости  $c_s$  удовлетворяют некоторым условиям сходимости [4]. Аналогом выражения (8) в этом случае будет  $u = f^{-1}(x, \mu)$ , где  $f^{-1}(x, \mu)$  – функция, обратная  $f(u, \mu)$ , а  $u_s^*$  из (13) будет равно

$$u_s^* = \frac{\sum_{i=1}^s u_i \Phi \left( \frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s} \right) \Phi \left( \frac{\mu_{s+1} - \mu_i}{c_s} \right)}{\sum_{i=1}^s \Phi \left( \frac{x_{s+1}^* - x_i}{c_s} \right) \Phi \left( \frac{\mu_{s+1} - \mu_i}{c_s} \right)}, \quad (15)$$

где  $x_{s+1}^*$  – задающее воздействие.

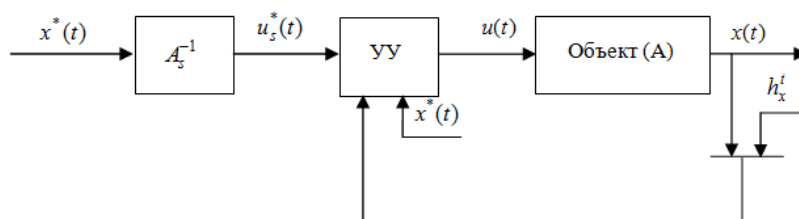


Рис. 2. Система дуального управления с обратной связью



Ясно, что класс функций  $x = f(u, \mu)$  – взаимнооднозначные и непрерывные.

Проанализируем характер дуализма алгоритма (13). На начальной стадии управления основная роль принадлежит второму слагаемому  $\Delta u_{s+1}$  формулы (13). Это случай активного накопления информации в системе дуального управления, который начинается с появления первого наблюдения входной и выходной переменных объекта. По мере процесса обучения (накопления информации) все возрастающую роль при формировании управляющего воздействия  $u_{s+1}$  начинает играть первое слагаемое, т. е.  $u_s^*$ . Таким образом, в процессе дуального управления объектом фигурируют как этап изучения объекта, так и этап приведения его к цели.

Более общая схема непараметрического дуального управления представлена на рис. 3. Здесь в результате функционирования замкнутого контура управления происходит уточнение оценки обратного оператора объекта.

**Вычислительные эксперименты.** Приведем некоторые результаты вычислительных экспериментов, которые носят иллюстративный характер. Поэтому ниже не приводятся сведения о выборе параметра размытости на каждом этапе эксперимента, поискового шага, а показаны только итоговые результаты, из соображений краткости изложения. На рис. 4 показан случай, когда на вход объекта действуют управляемая переменная  $u(t)$  и неуправляемая, но контролируемая переменная  $\mu(t)$ . Обучение управляющей системы, включающей в себя блоки  $A_s^{-1}$  и УУ, может начинаться с первой триады наблюдения, т. е. выработка управляющего воздействия осуществляется при наличии триады  $(u_1, \mu_1, x_1)$ . На рис. 4 показано обучение непараметрической системы дуального управления

при изменяющихся задающих воздействиях  $x^*$  и  $\mu$ . На начальной стадии управления I необходимо некоторое время (накопление выборки) для приведения объекта в заданное состояние. На этапе II задающее значение  $x^*$  выбиралось вне имеющихся наблюдений выхода объекта  $x$ , поэтому требовалось некоторое время для приведения объекта в заданное состояние  $x^*$ . На этапе III задающее воздействие представляло собой траекторию, а на этапе IV – случайную величину. Как видно, на этапах III и IV процесс управления достаточно высокого качества. Приведенные выше результаты имеют иллюстративный характер, как и было отмечено выше, поскольку из соображений краткости не приводятся конкретные сведения о настройке параметров размытости, поисковых шагов.

Результаты управления линейным динамическим объектом (было взято дифференциальное уравнение третьего порядка), представлены на рис. 5. Задающее воздействие  $x_t^*$  – случайная величина, генерируемая датчиком равномерно распределенных случайных чисел. Были проведены многочисленные эксперименты, один из которых и приведен.

Эксперимент осуществлялся по следующей схеме: сначала на объекте (уравнения объектов были неизвестны) снимались переходные характеристики, и с использованием их оценивался оператор  $A$  по формуле (9) и обратный оператор  $A^{-1}$  по формуле (12). Из рисунков видно удовлетворительное качество управления даже в таком «экзотическом» случае. С подобной задачей не справится ни один из известных регуляторов.

Приведем переходную и весовую функции объекта (рис. 6, 7), с которым проводился эксперимент, проиллюстрированный на рис. 4, 5.

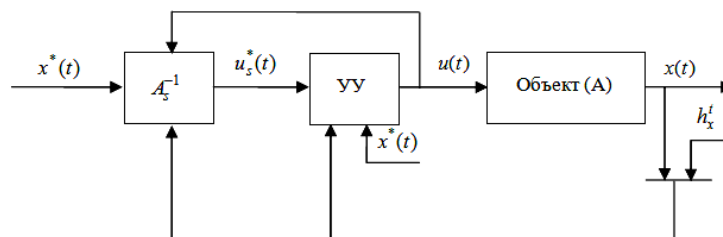


Рис. 3. Обучающаяся система дуального управления с обратной связью

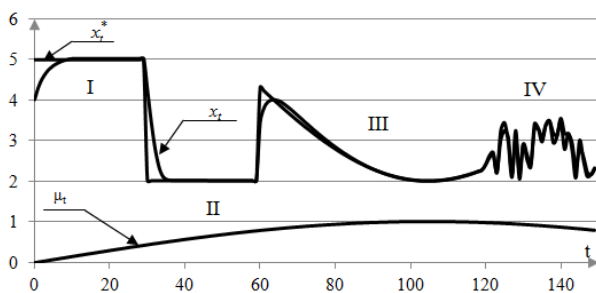


Рис. 4. Управление статической системой при наличии  $\mu(t)$

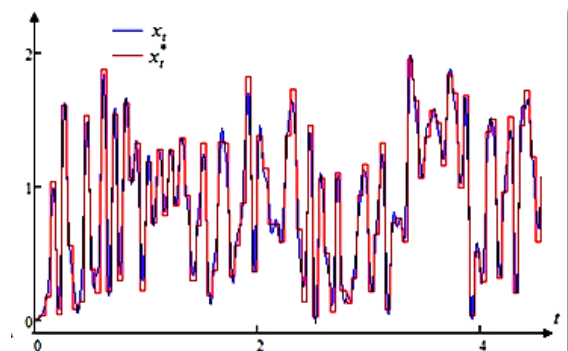


Рис. 5. Управление динамической системой



Рис. 6. Переходная характеристика



Рис. 7. Весовая характеристика



Рис. 8. «Обратная» переходная характеристика

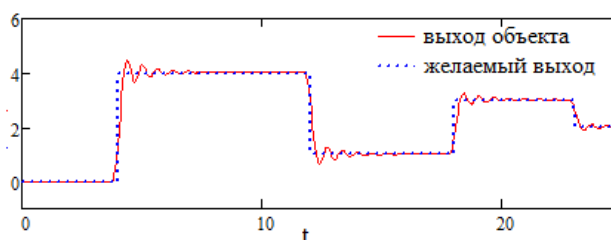


Рис. 9. Результат работы регулятора

Как видно, оценки переходной и весовой функции системы вполне удовлетворительные при наличии помех, действующих в каналах связи.

На рис. 8 представлена переходная характеристика объекта, полученная в направлении «выход-вход» на имеющейся неparamетрической модели, т. е. переходная функция «вспять». Рис. 9 иллюстрирует работу И-регулятора при ступенчатых задающих воздействиях.

**Математические постановки задач моделирования и управления.** При математической постановке задачи определяющим является объем априорной информации об исследуемом процессе. Как следствие этого – различные математические постановки задач, с точки зрения математической строгости. Одним из основных камней преткновения на этом пути является несоответствие наших предположений об исследуемом объекте самому объекту. После традиционно произносимого «Пусть процесс...» следуют такие предположения, гипотезы, которые, к сожалению, часто имеют отдаленное отношение к реальности. Наше незнание об исследуемом процессе приходится, к сожалению, заменять, говоря «Пусть...». Ясно, что если наши допущения достаточно близки к реальности, то в итоге можно рассчитывать на успех при решении той или иной задачи, если же нет, то неудача неизбежна. Действительно, многие процессы и объекты в основе функционирования которых лежат фундаментальные законы физических, химических, электрических, механических и других явлений, могут быть описаны с высокой степенью точности. Соответственно для них могут создаваться и модели, и системы управления достаточно высокого качества, что во многих случаях имеет место.

Из этого следует, что возможно возникнет необходимость ухода от общепринятых на сегодняшний день методов исследования стохастических систем и систем управления стохастическими процессами.

**Контроль переменных, измерения.** Здесь мы подчеркнем важность проблемы измерения «входных-выходных» переменных исследуемого объекта, процесса. Ясно, что отличающиеся средства контроля даже для одних и тех же процессов приводят к различным формулировкам задач идентификации. Главное, что следует выделить в этой проблеме, состоит в том, что нередко динамический объект мы вынуждены рассматривать как статический с запаздыванием из-за длительной процедуры контроля (измерения, анализа) некоторых переменных, существенно превышающей постоянную времени объекта.

Безусловно, при моделировании и управлении дискретно-непрерывными процессами, целесообразно использовать все переменные объекта, доступные для измерения, но это требует тщательного анализа не только самого конкретного объекта, но и средств и технологии контроля всех доступных переменных, а также априорной информации, которая одновременно по различным каналам измерения переменных многомерной системы объекта может соответствовать различным уровням априорной информации. Неучет тех или иных переменных, параметров, характера измерения и контроля, априорной информации, а также некоторая «вольность» при принятии тех или иных допущений, неизбежных при математической постановке задачи, может привести в конечном счете к негативным последствиям. Вся эта сумма вопросов часто обходится при исследовании проблемы моделирования с теоретической точки зрения. При решении же прикладных задач, построении моделей конкретных

процессов это просто невозможно, ибо «истина ничуть не страдает от того, если кто-либо ее не признает» (И. Ф. Шиллер).

Если же допущения при математической постановке задачи управления слишком «грубые», то, видимо, есть два пути. Первый – восполнение нашего «незнания» о процессе, когда можно будет сделать аккуратную, с математической точки зрения, постановку задачи. Второй путь состоит в развитии математического подхода? адекватного тому уровню априорной информации, которым мы реально располагаем.

#### **Замечания о теории непараметрических систем.**

Термин «непараметрическая идентификация», «непараметрические методы обработки данных» встречаются в монографиях по идентификации и управлению, но непараметрических алгоритмов идентификации и управления, как правило, не приводятся. Обычно непараметрическую идентификацию линейных динамических процессов связывают с отысканием весовых или переходных функций системы в результате решения интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода, в частности уравнения Винера–Хопфа.

Вышеизложенное позволяет несколько иначе посмотреть и на определение адаптивной системы. Общепринятое определение: «Адаптивные автоматические системы – это управляющие устройства, функционирование которых изменяется в зависимости от неизвестных заранее характеристик объекта управления и внешних воздействий. Процесс обучения адаптивной системы определяется принятым алгоритмом обучения и состоит в приспособлении работы устройства к поступающей на его вход информации об объекте. Результат обучения – это способ функционирования, осуществляющий успешное или наилучшее в каком-либо смысле управление объектом, которое зависит не только и не столько от принятого алгоритма обучения, сколько от той информации, которая поступила в систему. В этом смысле адаптивная система может выполнять действия по правилам, не заложенным в нее конструктором заранее». Представляется необходимым отметить следующее: при создании адаптивной системы того или иного назначения целесообразно базироваться на триаде: первое – максимальный учет имеющейся разнотипной априорной информации и формулировка на ее основе постановки задачи; второе – всесторонний анализ текущей информации, необходимой для организации процесса адаптации и обучения и, наконец, третье – аккуратное применение теории адаптивных систем. Естественно ожидать, что несоблюдение любого из трех перечисленных выше этапов приведет к тому, что построенная система вряд ли будет адаптивной или обучающаяся.

Вышеизложенное охватывает некоторые задачи управления при параметрической и непараметрической априорной информации. В отличие от хорошо

развитой параметрической теории, непараметрическая теория управления ориентирована на уровень меньшей априорной информации об исследуемых объектах и процессах. Обращается специальное внимание на построение непараметрических систем дуального управления и подчеркиваются их отличия от систем байесового или параметрического типов. Введен новый тип регуляторов (И-регуляторы), базирующихся на восстановлении обратного оператора исследуемого процесса по наблюдениям «входа-выхода» объекта. Приводятся некоторые результаты вычислительных экспериментов.

#### **Библиографические ссылки**

1. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4 (30). С. 4–10.
2. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М. : Физматгиз, 1963.
3. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М. : Наука, 1968.
4. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983.
5. Куликовский Р. Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического регулирования. М. : Наука, 1967.
6. Medvedev A. V. Identification and control for linear dynamic System of unknown order // Optimization techniques IFIP Technical Conference. Berlin : Heidelberg : New-York : Springer-Verlag, 1975. P. 48–56.

#### **References**

1. Medvedev A. V. *Vestnik SibGAU*. 2010, № 4 (30), pp. 4–10.
2. Feldbaum A. A. *Osnovy teorii optimal'nykh avtomaticheskikh sistem* (Fundamentals of the optimal automatic systems theory). Moscow, Fizmatgiz, 1963, 552 p.
3. Tsypkin Ya. Z. *Adaptatsiya i obucheniye v avtomaticheskikh sistemakh* (The adaptation and learning in automatic systems). Moscow, Nauka, 1968, 320 p.
4. Medvedev A. V. *Neparametricheskiye sistemy adaptatsii* (Nonparametric systems of adaptation). Novosibirsk, Nauka, 1983, 174 p.
5. Kulikovskiy R. *Optimal'nyye i adaptivnyye protsessy v sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniya* (Optimal and adaptive processes in the systems of automatic control). Moscow, Nauka, 1967, 397 p.
6. Medvedev A. V. Identification and control for linear dynamic System of unknown order. Optimization techniques IFIP Technical Conference. Berlin-Heidelberg-New-York: Springer-Verlag, 1975, pp. 48–56.

УДК 519.62

# КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, ПОДАТЛИВОЙ ПРИ ТРАНСВЕРСАЛЬНОМ СДВИГЕ

В. А. Нестеров

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: misternester@gmail.com

*Рассматривается новый конечный элемент оболочки, в расчетах которой учитывается трансверсальный сдвиг. При этом в каждом из узлов конечного элемента в качестве основных кинематических параметров присутствуют осредненные по толщине углы трансверсального сдвига. Представлены результаты численного исследования, демонстрирующие отсутствие эффекта сдвигового запирания в новой оболочечной конечно-элементной модели.*

*Ключевые слова:* балка, трансверсальный сдвиг, метод конечных элементов, эффект сдвигового запирания.

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE SHEAR FLEXIBLE CYLINDRIC SHELL

V. A. Nesterov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: misternester@gmail.com

*The finite element of a shell with low value of transverse shear stiffness is considered. As the basic kinematic variables transverse shear strains are in evidence. The results of numerical analysis showing urgency of the model are presented.*

*Keywords:* shell, finite element method, transverse shear strains.

Композитные конструкции, обладающие высокими удельными механическими характеристиками, находят широкое применение в производстве авиационной и ракетно-космической техники. Ряд особенностей композитных материалов резко выделяет их из ряда традиционных конструкционных материалов, что вынуждает разрабатывать новые расчетные модели, в которых адекватным образом учитываются эти особенности. Главная среди них – низкая сдвиговая жесткость по отношению к трансверсальным напряжениям. Учет данного обстоятельства приводит к повышению порядка разрешающих уравнений за счет введения в рассмотрение углов трансверсального сдвига.

В настоящей работе рассматривается новый четырехугольный конечный элемент оболочки, среди основных узловых переменных которого присутствуют углы трансверсального сдвига. Разработанная модель основывается на математической теории пластин Рейсснера–Мидлина. Вывод основополагающих уравнений и матриц теории метода конечных элементов выполняется вариационным методом, который предполагает использование в качестве исходного выражения полной потенциальной энергии для элемента оболочки. Основные преобразования при этом касаются выражения потенциальной энергии деформации, которое в геометрически нелинейной постановке для сдвиговой модели имеет вид

$$U = \frac{1}{2} \iint \left\{ N_{\alpha} \left( \varepsilon_{\alpha} + \frac{1}{2} \omega_{\alpha}^2 \right) + N_{\beta} \left( \varepsilon_{\beta} + \frac{1}{2} \omega_{\beta}^2 \right) + N_{\alpha\beta} (\varepsilon_{\alpha\beta} + \varepsilon_{\beta\alpha} + \omega_{\alpha} \omega_{\beta}) + M_{\alpha} \chi_{\alpha} + M_{\beta} \chi_{\beta} + M_{\alpha\beta} (\chi_{\alpha\beta} + \chi_{\beta\alpha}) + Q_{\alpha} \psi_{\alpha} + Q_{\beta} \psi_{\beta} \right\} d\alpha d\beta, \quad (1)$$

где  $N$ ,  $Q$ ,  $M$  – внутренние погонные усилия;  $\varepsilon$ ,  $\chi$  – обобщенные деформации начальной поверхности,  $\omega$  – углы поворота бесконечно малого элемента оболочки.

Рассмотрим цилиндрическую оболочку радиусом  $R$ , нагруженную давлением  $p$ . Криволинейную систему координат свяжем с начальной поверхностью, где ось  $x$  направлена вдоль образующей цилиндра, ось  $y$  – по окружности начальной поверхности, ось  $z$  – по нормали к ней. Запишем функционал Лагранжа для задачи статического расчета в геометрически нелинейной постановке. Выражение потенциальной энергии деформации (1) в данном случае примет следующий вид:

$$U = \frac{1}{2} \iint (N_x \varepsilon_x + N_y \varepsilon_y + N_{xy} \varepsilon_{xy} + M_x \chi_x + M_y \chi_y + M_{xy} \chi_{xy} + Q_x \psi_x + Q_y \psi_y) dx dy, \quad (2)$$

где внутренние погонные усилия связаны с обобщенными деформациями начальной поверхности с помощью следующих физических соотношений:

$$\begin{aligned} N_x &= B_{11} \varepsilon_x + B_{12} \varepsilon_y + C_{11} \chi_x + C_{12} \chi_y, \\ N_y &= B_{21} \varepsilon_x + B_{22} \varepsilon_y + C_{21} \chi_x + C_{22} \chi_y, \\ N_{xy} &= B_{33} \varepsilon_{xy} + C_{33} \chi_{xy}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$M_x = C_{11} \varepsilon_x + C_{12} \varepsilon_y + D_{11} \chi_x + D_{12} \chi_y$$

$$M_y = C_{21} \varepsilon_x + C_{22} \varepsilon_y + D_{21} \chi_x + D_{22} \chi_y,$$

$$M_{xy} = C_{33} \varepsilon_{xy} + D_{33} \chi_{xy}, \quad Q_x = K_x \psi_x, \quad Q_y = K_y \psi_y,$$

где  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $K$  – жесткостные параметры:  $B$  определяют мембранную жесткость оболочки,  $C$  – так называемая смешанная жесткость,  $D$  – изгибная жесткость,  $K$  – жесткость оболочки при трансверсальном сдвиге.

Обобщенные деформации определяются следующими геометрическими соотношениями:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \\ \chi_x &= \frac{\partial \theta_x}{\partial x}, \quad \chi_y = \frac{\partial \theta_y}{\partial y}, \quad \chi_{xy} = \frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x}, \quad (4) \\ \theta_x &= \psi_x - \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \theta_y = \psi_y + \frac{v}{R} - \frac{\partial w}{\partial y}.\end{aligned}$$

В выражении (4) фигурируют следующие кинематические параметры:  $\theta_x$  и  $\theta_y$  – углы наклона сечений, измеряемые в плоскостях  $xz$  и  $yz$  соответственно,  $u$  и  $v$  – перемещения точек начальной поверхности вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно,  $w$  – прогибы точек начальной поверхности,  $\psi_x$  и  $\psi_y$  – углы сдвига или осредненные по высоте сечения деформации трансверсального сдвига, вычисляемые по следующим формулам [1]:

$$\psi_x = \frac{1}{h} \int_{-s}^{h-s} e_{xz} dz, \quad \psi_y = \frac{1}{h} \int_{-s}^{h-s} e_{yz} dz, \quad (5)$$

где  $h$  – толщина оболочки,  $(h-s)$  и  $(-s)$  – координаты по высоте верхней и нижней поверхности оболочки соответственно.

С учетом соотношений (4) для углов наклона сечений ( $\theta_x$  и  $\theta_y$ ) представим выражения для кривизн в виде

$$\begin{aligned}\chi_x &= \frac{\partial \psi_x}{\partial x} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \chi_y = \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \\ \chi_{xy} &= \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.\end{aligned} \quad (6)$$

Подставим физические (3) и геометрические (4), (6) соотношения в подынтегральное выражение (2). В результате получим

$$\begin{aligned}U &= \frac{1}{2} \iint_{a,c}^{b,d} \left\{ B_{11} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2C_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial x} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \right. \\ &+ D_{11} \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial x} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + 2B_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R} \right) + \\ &+ B_{22} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R} \right)^2 + 2C_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \left( \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \\ &+ 2C_{12} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R} \right) \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial x} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \\ &+ 2D_{12} \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial x} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \\ &+ 2C_{22} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R} \right) \left( \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \\ &+ D_{22} \left( \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + B_{33} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \\ &+ 2C_{33} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) + \\ &+ D_{33} \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 + \\ &+ K_x \psi_x^2 + K_y \psi_y^2 \Big\} dx dy.\end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}&+ D_{22} \left( \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + B_{33} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \\ &+ 2C_{33} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) + \\ &+ D_{33} \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 + \\ &+ K_x \psi_x^2 + K_y \psi_y^2 \Big\} dx dy.\end{aligned}$$

Здесь  $a$  и  $b$  определяют границы элемента оболочки вдоль оси  $x$ , а  $c$  и  $d$  – вдоль оси  $y$ .

Потенциал внешних сил для цилиндрической оболочки, нагруженной давлением  $p$ , определяется следующим интегралом:

$$\Pi = \iint_{a,c}^{b,d} p w dx dy. \quad (8)$$

Выражение полной потенциальной энергии цилиндрической оболочки имеет вид

$$E = U + \Pi. \quad (9)$$

Здесь потенциальная энергия деформации задается интегралом (7), а потенциал внешних сил – интегралом (8).

Функционал (9) позволяет получить разрешающие уравнения теории МКЭ. Будем рассматривать модель с сеткой прямоугольных конечных элементов с внутренней нумерацией узлов, осуществляемой при обходе контура против часовой стрелки.

Вектор узловых кинематических параметров  $\delta_e$  имеет следующий вид:

$$\delta_e = \{\delta_1 \delta_2 \delta_3 \delta_4\}^T, \quad (10)$$

где  $\delta_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) – вектор кинематических параметров  $i$ -го узла:

$$\delta_i = \left\{ w_i \quad \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_i \quad \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_i \quad \psi_{xi} \quad \psi_{yi} \quad u_i \quad v_i \right\}^T. \quad (11)$$

Кинематические параметры можно выразить через их узловые значения следующим образом:

$$\begin{aligned}w &= p_{11} w_1 + p_{12} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_1 + p_{13} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_1 + p_{18} w_2 + \\ &+ p_{19} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_2 + p_{1,10} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_2 + p_{1,15} w_3 + p_{1,16} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_3 + \\ &+ p_{1,17} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_3 + p_{1,22} w_4 + p_{1,23} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_4 + p_{1,24} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_4; \\ \frac{\partial w}{\partial x} &= p_{21} w_1 + p_{22} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_1 + p_{23} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_1 + p_{28} w_2 + \\ &+ p_{29} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_2 + p_{2,10} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_2 + p_{2,15} w_3 + p_{2,16} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_3 + \\ &+ p_{2,17} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_3 + p_{2,22} w_4 + p_{2,23} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_4 + p_{2,24} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_4;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial w}{\partial y} &= p_{31}w_1 + p_{32}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_1 + p_{33}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_1 + p_{38}w_2 + \\
&+ p_{39}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_2 + p_{3,10}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_2 + p_{3,15}w_3 + p_{3,16}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_3 + \\
&+ p_{3,17}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_3 + p_{3,22}w_4 + p_{3,23}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)_4 + p_{3,24}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)_4; \\
\Psi_x &= p_{44}\Psi_{x1} + p_{4,11}\Psi_{x2} + p_{4,18}\Psi_{x3} + p_{4,25}\Psi_{x4}; \\
\Psi_y &= p_{55}\Psi_{y1} + p_{5,12}\Psi_{y2} + p_{5,19}\Psi_{y3} + p_{5,26}\Psi_{y4}; \\
u &= p_{66}u_1 + p_{6,13}u_2 + p_{6,20}u_3 + p_{6,27}u_4; \\
v &= p_{77}v_1 + p_{7,14}v_2 + p_{7,21}v_3 + p_{7,28}v_4,
\end{aligned}
\quad (12)$$

где  $p_{ij}$  – компоненты матрицы преобразования  $\mathbf{P}$  размерностью  $7 \times 28$  со следующими ненулевыми компонентами:

$$\begin{aligned}
p_{11} &= 1 - \frac{xy}{ab} + \frac{3x^2y}{a^2b} + \frac{3xy^2}{ab^2} - \frac{2x^3y}{a^3b} - \\
&- \frac{2xy^3}{b^3a} - \frac{3x^2}{a^2} - \frac{3y^2}{b^2} + \frac{2x^3}{a^3} + \frac{2y^3}{b^3}; \\
p_{12} &= \frac{2x^2y}{ab} - \frac{x^3y}{a^2b} - \frac{xy}{b} + \frac{x^3}{a^2} - \frac{2x^2}{a} + x; \\
p_{13} &= \frac{2xy^2}{ab} - \frac{xy^3}{ab^2} - \frac{2y^2}{b} + \frac{xy}{a} - \frac{y^3}{b^2} + y; \\
p_{18} &= \frac{xy}{ab} + \frac{3x^2y}{a^2b} - \frac{3xy^2}{ab^2} + \frac{2x^3y}{a^3b} + \frac{2xy^3}{b^3a} + \frac{3x^2}{a^2} - \frac{2x^3}{a^3}; \\
p_{19} &= \frac{x^2y}{ab} - \frac{x^3y}{a^2b} + \frac{x^3}{a^2} - \frac{x^2}{a}; \quad p_{1,10} = -\frac{2xy^2}{ab} + \frac{xy^3}{ab^2} + \frac{xy}{a}; \\
p_{1,15} &= -\frac{xy}{ab} + \frac{3x^2y}{a^2b} + \frac{3xy^2}{ab^2} - \frac{2x^3y}{a^3b} - \frac{2xy^3}{b^3a}; \\
p_{1,16} &= -\frac{x^2y}{ab} + \frac{x^3y}{a^2b}; \quad p_{1,17} = -\frac{xy^2}{ab} + \frac{xy^3}{ab^2}; \\
p_{1,22} &= \frac{xy}{ab} - \frac{3x^2y}{a^2b} - \frac{3xy^2}{ab^2} + \frac{2x^3y}{a^3b} + \frac{2xy^3}{b^3a} + \frac{3y^2}{b^2} - \frac{2y^3}{b^3}; \\
p_{1,23} &= -\frac{2x^2y}{ab} + \frac{x^3y}{a^2b} + \frac{xy}{b}; \quad p_{23} = \frac{2y^2}{ab} - \frac{y^3}{ab^2} - \frac{y}{a}; \\
p_{1,24} &= \frac{xy^2}{ab} - \frac{xy^3}{ab^2} - \frac{y^2}{b} + \frac{y^3}{b^2}; \\
p_{21} &= -\frac{6x^2y}{a^3b} + \frac{6xy}{a^2b} - \frac{y}{ab} + \frac{3y^2}{ab^2} - \frac{2y^3}{b^3a} - \frac{6x}{a^2} + \frac{6x^2}{a^3}; \\
p_{22} &= 1 + \frac{4xy}{ab} - \frac{3x^2y}{a^2b} + \frac{3x^2}{a^2} - \frac{4x}{a} - \frac{y}{b}; \\
p_{28} &= \frac{6x^2y}{a^3b} - \frac{6xy}{a^2b} + \frac{y}{ab} - \frac{3y^2}{ab^2} + \frac{2y^3}{b^3a} + \frac{6x}{a^2} - \frac{6x^2}{a^3};
\end{aligned}
\quad (13)$$

$$\begin{aligned}
p_{29} &= \frac{2xy}{ab} - \frac{3x^2y}{a^2b} + \frac{3x^2}{a^2} - \frac{2x}{a}; \quad p_{2,10} = -\frac{2y^2}{ab} + \frac{y^3}{ab^2} + \frac{y}{a}; \\
p_{2,15} &= -\frac{6x^2y}{a^3b} + \frac{6xy}{a^2b} - \frac{y}{ab} + \frac{3y^2}{ab^2} - \frac{2y^3}{b^3a}; \\
p_{2,16} &= -\frac{2xy}{ab} + \frac{3x^2y}{a^2b}; \quad p_{2,17} = -\frac{y^2}{ab} + \frac{y^3}{ab^2}; \\
p_{2,22} &= -\frac{6x^2y}{a^3b} - \frac{6xy}{a^2b} + \frac{y}{ab} - \frac{3y^2}{ab^2} + \frac{2y^3}{b^3a}; \\
p_{2,23} &= -\frac{4xy}{ab} + \frac{3x^2y}{a^2b} + \frac{y}{b}; \quad p_{2,24} = \frac{y^2}{ab} - \frac{y^3}{ab^2}; \\
p_{31} &= -\frac{6xy^2}{b^3a} - \frac{x}{ab} + \frac{3x^2}{a^2b} - \frac{2x^3}{a^3b} - \frac{6y}{b^2} + \frac{6y^2}{b^3} + \frac{6xy}{ab^2}; \\
p_{32} &= \frac{2x^2}{ab} - \frac{x^3}{a^2b} - \frac{x}{b}; \\
p_{33} &= 1 + \frac{4xy}{ab} - \frac{3xy^2}{ab^2} + \frac{3y^2}{b^2} - \frac{x}{a} - \frac{4y}{b}; \\
p_{38} &= \frac{6xy^2}{b^3a} + \frac{x}{ab} - \frac{3x^2}{a^2b} + \frac{2x^3}{a^3b} - \frac{6xy}{ab^2}; \\
p_{39} &= \frac{x^2}{ab} - \frac{x^3}{a^2b}; \quad p_{3,10} = -\frac{4xy}{ab} + \frac{3xy^2}{ab^2} + \frac{x}{a}; \\
p_{3,15} &= -\frac{6xy^2}{b^3a} - \frac{x}{ab} + \frac{3x^2}{a^2b} - \frac{2x^3}{a^3b} + \frac{6xy}{ab^2}; \\
p_{3,16} &= -\frac{x^2}{ab} + \frac{x^3}{a^2b}; \quad p_{3,17} = -\frac{2xy}{ab} + \frac{3xy^2}{ab^2}; \\
p_{3,22} &= \frac{6xy^2}{b^3a} + \frac{x}{ab} - \frac{3x^2}{a^2b} + \frac{2x^3}{a^3b} + \frac{6y}{b^2} - \frac{6y^2}{b^3} - \frac{6xy}{ab^2}; \\
p_{3,23} &= -\frac{2x^2}{ab} + \frac{x^3}{a^2b} + \frac{x}{b}; \\
p_{3,24} &= \frac{2xy}{ab} - \frac{3xy^2}{ab^2} + \frac{3y^2}{b^2} - \frac{2y}{b}; \quad p_{44} = 1 + \frac{xy}{ab} - \frac{x}{a} - \frac{y}{b}; \\
p_{4,11} &= -\frac{xy}{ab} + \frac{x}{a}; \quad p_{4,18} = \frac{xy}{ab}; \quad p_{4,25} = -\frac{xy}{ab} + \frac{y}{b}; \\
p_{55} &= 1 + \frac{xy}{ab} - \frac{x}{a} - \frac{y}{b}; \quad p_{5,12} = -\frac{xy}{ab} + \frac{x}{a}; \\
p_{5,19} &= \frac{xy}{ab}; \quad p_{5,26} = -\frac{xy}{ab} + \frac{y}{b}; \quad p_{66} = 1 + \frac{xy}{ab} - \frac{x}{a} - \frac{y}{b}; \\
p_{6,13} &= -\frac{xy}{ab} + \frac{x}{a}; \quad p_{6,20} = \frac{xy}{ab}; \quad p_{6,27} = -\frac{xy}{ab} + \frac{y}{b}; \\
p_{77} &= 1 + \frac{xy}{ab} - \frac{x}{a} - \frac{y}{b}; \quad p_{7,14} = -\frac{xy}{ab} + \frac{x}{a}; \\
p_{7,21} &= \frac{xy}{ab}; \quad p_{7,28} = -\frac{xy}{ab} + \frac{y}{b}.
\end{aligned}$$

Подставляя разложения (12) в выражения потенциальной энергии деформации (7) и потенциала внешних сил (8) и минимизируя их сумму (9) по компонентам вектора узловых кинематических параметров  $\delta_e$  (10), (11), получим систему алгебраических уравнений равновесия

$$\mathbf{K}_e \delta_e = \mathbf{F}_e, \quad (14)$$

где  $\mathbf{K}_e$  – матрица жесткости конечного элемента цилиндрической оболочки;  $\mathbf{F}_e$  – вектор эквивалентных узловых сил.

Вектор эквивалентных узловых сил удобно представить в блочном виде:

$$\mathbf{F}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix}, \quad (15)$$

где подвекторы  $F_1, F_2, F_3, F_4$ , состоящие из 7 компонентов каждый (в случае нагрузки равномерным давлением) имеют вид

$$\begin{aligned} F_1 &= \{f_1 \ f_2 \ f_3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T; \\ F_2 &= \{f_8 \ f_9 \ f_{10} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T; \\ F_3 &= \{f_{15} \ f_{16} \ f_{17} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T; \\ F_4 &= \{f_{22} \ f_{23} \ f_{24} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T; \\ f_1 &= p \frac{ab}{4}; \quad f_2 = p \frac{a^2b}{24}; \quad f_3 = p \frac{ab^2}{24}; \quad f_8 = p \frac{ab}{4}; \\ f_9 &= -p \frac{a^2b}{24}; \quad f_{10} = p \frac{ab^2}{24}; \quad f_{15} = p \frac{ab}{4}; \\ f_{16} &= -p \frac{a^2b}{24}; \quad f_{17} = -p \frac{ab^2}{24}; \quad f_{22} = p \frac{ab}{4}; \\ f_{23} &= p \frac{a^2b}{24}; \quad f_{24} = -p \frac{ab^2}{24}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь  $p$  – величина давления.

В общем случае матрица жесткости конечного элемента цилиндрической оболочки  $\mathbf{K}_e$ , размерность которой  $28 \times 28$ , имеет плотное заполнение, т. е. в ней немного нулевых элементов. Для ее вывода разработана специальная программа [2].

Вывод разрешающих уравнений при реализации вариационного подхода МКЭ для оболочек предполагает получение выражения полной потенциальной энергии для всего ансамбля конечных элементов модели:

$$E_\Sigma = \sum_{i=1}^N (U_i + \Pi_i), \quad (17)$$

где  $N$  – число элементов в модели;  $U_i$  – потенциальная энергия деформации  $i$ -го элемента;  $\Pi_i$  – потенциал внешних сил  $i$ -го элемента.

Минимизация (17) по узловым неизвестным каждого узла системы приведет к глобальным уравнениям равновесия

$$\mathbf{K}_\Sigma \Delta = \mathbf{F}_\Sigma, \quad (18)$$

где  $\mathbf{K}_\Sigma$  – глобальная матрица жесткости пластины;  $\mathbf{F}_\Sigma$  – глобальный вектор эквивалентных узловых сил всей пластины;  $\Delta$  – глобальный вектор узловых неизвестных:

$$\Delta = \{\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_i \ \dots \ \delta_N\}^T. \quad (19)$$

Следует иметь в виду, что при решении СЛАУ (18) необходимо учесть граничные условия.

Одной из самых распространенных конструкций, в расчетах которых необходимо учитывать трансверсальный сдвиг, является трехслойная оболочка с податливым заполнителем. Будем полагать, что жесткость несущих слоев существенно выше жесткости промежуточного слоя. В этом случае можно допустить, что параметры жесткости оболочки  $B, C$  и  $D$  обеспечены несущими слоями.

Будем полагать материалы несущих слоев и заполнителя изотропными. При совпадении начальной поверхности со срединной и при симметричной структуре слоистого пакета смешанные жесткости ( $C$ ) равны нулю. Остальные параметры жесткости вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} B_{11} &= B_{22} = \frac{2E_n t}{1-\mu_n^2}, \quad B_{12} = B_{21} = \mu_n B_{11}, \\ B_{33} &= 2G_n t, \quad D_{11} = D_{22} = \frac{E_n (H^3 - h^3)}{12(1-\mu_n^2)}, \\ D_{12} &= D_{21} = \mu_n D_{11}, \quad D_{33} = \frac{G_n (H^3 - h^3)}{12(1-\mu_n^2)}, \\ K_x &= K_y = \frac{H^2}{\frac{2t}{G_n} + \frac{h}{G_3}}, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $H$  – полная толщина пакета;  $h$  – толщина слоя заполнителя;  $t$  – толщина каждого из несущих слоев;  $E_n$  – приведенный модуль упругости материала несущих слоев;  $G_n$  и  $G_3$  – модули сдвига материалов несущих слоев и заполнителя соответственно.

Как известно, в последнее время получила распространение конечно-элементная модель податливых при трансверсальном сдвиге оболочек, в которой в качестве основных узловых переменных фигурируют перемещения точек начальной поверхности и углы поворота сечения ( $\theta_x$  и  $\theta_y$ ). Эта модель с пятью кинематическими параметрами в узле обладает определенным недостатком, который называется *эффектом сдвигового записания* (ЭСЗ).

Покажем, что наша КЭ модель с семью кинематическими параметрами в каждом узле лишена данного недостатка. Для этого проведем следующий численный эксперимент. Выполним две серии расчетов для оболочек различной толщины. В первой серии будет задействована рассматриваемая в настоящей работе модель с 7 узловыми кинематическими параметрами.

Во второй серии будем использовать конечно-элементную модель, основывающуюся на классической теории оболочек Кирхгофа. В этой классической модели в каждом узле присутствует 5 кинематических переменных: перемещения  $u$  и  $v$ , прогиб  $w$  и два изгибных угла поворота нормали ( $dw/dx$  и  $dw/dy$ ). Таким образом, вектор узловых неизвестных 4-узловой элемента оболочки в данном случае будет иметь вид (10) со следующим подвектором узловых параметров в каждом узле:

$$\delta_i = \left\{ w_i \quad \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_i \quad \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_i \quad u_i \quad v_i \right\}^T. \quad (22)$$

Процедура вывода разрешающих уравнений равновесия для одного конечного элемента точно такая же, что описана выше для модели, учитывающей трансверсальный сдвиг. Только во всех выражениях необходимо положить  $\psi_x = \psi_y = 0$  и, следовательно,  $\theta_x = -dw/dx$  и  $\theta_y = -dw/dy$ .

Выражение энергии деформации при этом будет иметь вид

$$U = \frac{1}{2} \iint_a^b \left\{ B_{11} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + D_{11} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \right. \\ + 2B_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R} \right) + 2D_{12} \left( -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \left( \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \\ + B_{22} \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{R} \right)^2 + D_{22} \left( \frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + \\ \left. + B_{33} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + D_{33} \left( \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy. \quad (23)$$

Размерность матрицы жесткости элемента сократится до 20. Вектор эквивалентных узловых сил сохранит блочный вид (15), но подвекторы (16) будут иметь размерность 5 с теми же значениями ненулевых компонентов.

Рассмотрим цилиндрическую панель, с защемленными торцевыми (искривленными) кромками и свободными прямыми (см. рисунок), нагруженную равномерным давлением на внешней поверхности. Радиус кривизны панели – 5 м. Размеры в плане 1 м на 1 м. Будем полагать оболочку изготовленной из однонаправ-

ленного композита с углами укладки  $\varphi = \pm 45^\circ$ . Зададим следующие механические свойства (углепластик):

- модуль упругости вдоль волокон  $E_1 = 180$  ГПа;
- модуль упругости поперек волокон  $E_2 = 6,2$  ГПа;
- модуль сдвига  $G_{12} = 5$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu_{12} = 0,007$ ;
- плотность  $\rho = 1500$  кг/м<sup>3</sup>.

Упругие параметры пластины, которую будем считать однослойной и условно однородной, вычислим по формулам

$$A_{11} = \bar{E}_1 \cos^4 \varphi + \bar{E}_2 \sin^4 \varphi + \\ + 2 \left( \bar{E}_1 \mu_{12} + 2G_{12} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi; \\ A_{22} = \bar{E}_1 \sin^4 \varphi + \bar{E}_2 \cos^4 \varphi + \\ + 2 \left( \bar{E}_1 \mu_{12} + 2G_{12} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi; \quad (24)$$

$$A_{12} = A_{21} = \bar{E}_1 \mu_{12} + \\ + \left( \bar{E}_1 + \bar{E}_2 - 2 \left( \bar{E}_1 \mu_{12} + 2G_{12} \right) \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi;$$

$$A_{33} = \left( \bar{E}_1 + \bar{E}_2 - 2 \bar{E}_1 \mu_{12} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + G_{12} \cos^2 2\varphi,$$

где  $\bar{E}_1$  и  $\bar{E}_2$  – приведенные модули упругости, вычисляемые по формулам

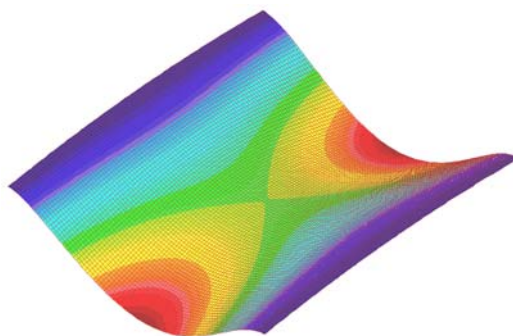
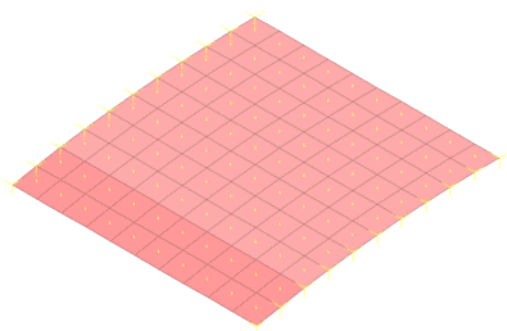
$$\bar{E}_{1(2)} = E_{1(2)} / (1 - \mu_{12} \mu_{21}), \quad (25)$$

а коэффициент Пуассона  $\mu_{21}$  определяется из условия симметрии упругих постоянных:

$$\mu_{21} = \frac{\mu_{12} E_1}{E_2}. \quad (26)$$

Модули трансверсального сдвига примем равными  $G_{12}$ . Коэффициенты жесткости пластины вычислим по формулам

$$B_{11} = A_{11} h; \quad B_{22} = A_{22} h; \quad B_{21} = A_{21} h; \\ B_{33} = A_{33} h; \quad D_{11} = \frac{A_{11} h^3}{12}; \quad D_{22} = \frac{A_{22} h^3}{12}; \\ D_{12} = \frac{A_{12} h^3}{12}; \quad D_{21} = \frac{A_{21} h^3}{12}; \quad D_{33} = \frac{A_{33} h^3}{12}; \quad (27) \\ K_x = K_y = G_{12} h.$$



Композитная панель и картина деформирования



Таблица 1

## Прогибы однородной композитной панели

| Толщина оболочки,<br>$h$ , мм | Прогиб в центральном узле, мм |                           | Расхождение, % | Давление, Па |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------|--------------|
|                               | Классическая модель           | Модель, учитывающая сдвиг |                |              |
| 50                            | 4,593                         | 5,070                     | 9,4            | 1000000      |
| 40                            | 8,579                         | 9,144                     | 6,18           | 1000000      |
| 30                            | 18,566                        | 19,219                    | 3,40           | 1000000      |
| 20                            | 4,993                         | 5,055                     | 1,23           | 100000       |
| 10                            | 1,7817                        | 1,7811                    | 0,034          | 10000        |
| 5                             | 2,8689                        | 2,8619                    | 0,24           | 10000        |
| 1                             | -0,522263                     | -0,522286                 | 0,0044         | 100          |

Таблица 2

## Прогибы трехслойной панели

| Толщина слоя за-<br>полнителя, $h$ , мм | Прогиб в центральном узле, мм |                           | Расхождение, % | Давление, Па |
|-----------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------|--------------|
|                                         | Классическая модель           | Модель, учитывающая сдвиг |                |              |
| 50                                      | 4,718                         | 10,717                    | 55,98          | 100000       |
| 40                                      | 7,302                         | 14,673                    | 50,24          | 100000       |
| 30                                      | 6,369                         | 11,119                    | 42,72          | 50000        |
| 20                                      | 2,778                         | 4,117                     | 32,52          | 10000        |
| 10                                      | 4,990                         | 6,101                     | 18,21          | 5000         |
| 5                                       | 1,610                         | 1,765                     | 8,78           | 500          |
| 3                                       | 0,675                         | 0,708                     | 4,66           | 100          |
| 1                                       | 2,02                          | 2,045                     | 1,22           | 100          |
| 0,5                                     | 1,4358                        | 1,4444                    | 0,595          | 50           |
| 0,1                                     | 0,39015                       | 0,39065                   | 0,128          | 10           |

Определим прогибы в центральном узле, вычисляемые по классической (Кирхгофа–Лява) и сдвиговой моделям для различных значений толщины панели. Результаты расчетов представим таблично (табл. 1). Анализ этих данных позволяет заключить, что по мере увеличения толщины оболочки классическое решение дает существенно заниженный прогиб. С другой стороны, по мере уменьшения толщины пакета решение по сдвиговой модели приближается к классическому.

Еще более рельефно отмеченные эффекты проявляются в расчетах по классической и сдвиговой моделям, выполненным для трехслойной панели. Длина панели (по образующей) – 1 м, ширина (в окружном направлении) – 0,2 м. Радиус кривизны – 5 м. Толщина стальных несущих слоев – 1 мм, толщина слоя заполнителя варьируется. Коэффициенты жесткости вычисляются по формулам (21).

С помощью специально разработанной программы [3] выполнена серия статических расчетов панели при нагрузке давлением. При этом оцениваются прогибы в центральном узле, полученные для трехслойной оболочки с различной толщиной слоя заполнителя. Параллельно выполняются расчеты по двух КЭ моделям: сдвиговой и без учета сдвига (Кирхгофа–Лява). Результаты представлены таблично (табл. 2). Данные таблицы показывают, что по мере уменьшения толщины слоя заполнителя результаты решения с использованием сдвиговой модели приближаются к ре-

зультатам, полученным на основе классического решения, что свидетельствует об отсутствии ЭСЗ в разработанной КЭ модели. Эти же результаты лишней раз подчеркивают необходимость применения сдвиговой модели для расчета конструкций, весьма податливых при трансверсальном сдвиге.

Разработана конечно-элементная модель цилиндрической оболочки, податливой при трансверсальном сдвиге. Разрешающие уравнения теории МКЭ получены вариационным способом. Вектор узловых неизвестных содержит семь независимых кинематических параметров, включая осредненные по высоте сечения углы трансверсального сдвига. В результате численного эксперимента на примерах расчетов монолитной композитной и трехслойной оболочек показано, что в КЭ модели с полным набором узловых кинематических параметров отсутствует эффект сдвигового за-  
пирания.

## Библиографические ссылки

1. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1988.
2. А. с. о гос. регистр. прог. для ЭВМ № 2010611594 / 26.02.2010. Комплекс программ для получения основных матриц и векторов теории МКЭ для конечных элементов балки, пластины и оболочки, податливых

при трансверсальном сдвиге / В. А. Нестеров. Заяв. № 2009617627 ; 31.12.2009.

3. А. с. о гос. регистр. прог. для ЭВМ № 2010611593 / 26.02.2010. Конечно-элементное исследование напряженно-деформированного состояния и собственных колебаний цилиндрической панели с учетом трансверсальной податливости / В. А. Нестеров. Заяв. № 2009617626 ; 31.12.2009.

#### Referens

1. Vasilyev V. V. *Mekhanika konstruktiv iz kompozitsionnykh materialov* (Mechanics of composite struc-

tures. M: Mechanical engineering). Moscow, Mashinostroyeniye, 1988, 272 p.

2. A set of programs for basic matrices and vectors of the theory of finite elements FEM for beams, plates and shells, stretch during transverse shear: Auth. of State. Register. prog. computer № 2010611594. 26.02.2010. Nesterov V. A. Stated. № 2009617627, 31.12.2009, 6 p.

3. Finite element study of the stress-strain state and the natural vibrations of cylindrical panels with the transversal compliance: Auth. of State. Register. prog. computer № 2010611593. 26.02.2010. Nesterov V. A. Stated. № 2009617626, 31.12.2009, 33 p.

© Нестеров В. А., 2013

УДК 62-506.1

### О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ И УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

В. И. Орлов<sup>1</sup>, Н. А. Сергеева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Испытательно-технический центр – НПО ПМ»

Россия, 662970, Железнодорожск, ул. Молодежная, 20. E-mail: itcnppm@atomlink.ru

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sergena@list.ru

*Рассматривается комплекс задач диагностики электрорадиоизделий (ЭРИ) по данным испытаний неразрушающего контроля. В частности, рассматриваются результаты диагностики некоторых видов интегральных микросхем, транзисторов и диодных матриц. В результате обработки диодных матриц выявлены различные группы годных изделий. Приводятся некоторые численные результаты обработки диагностических параметров. В этой связи анализируется задача ведения технологического процесса изготовления ЭРИ заданного качества. Приводятся непараметрические модели дискретно-непрерывных процессов для различных технологических этапов производства. Излагается также последовательность формирования управляющих воздействий для всего технологического цикла. Непараметрические оценки, модели, алгоритмы управления и принятия решений базируются на непараметрических статистиках Надарая–Ватсона. Приводятся конкретные непараметрические модели и алгоритмы, которые могут быть положены в основу при проектировании компьютерных систем диагностики ЭРИ по результатам испытаний неразрушающего контроля, а также при разработке компьютерных систем управления технологическим процессом при изготовлении ЭРИ.*

*Ключевые слова: непараметрические модели, априорная информация, дискретно-непрерывный процесс, диагностика, распознавание образов, оценка Надарая–Ватсона.*

### ON NONPARAMETRIC DIAGNOSIS AND CONTROL OF THE PROCESS OF ELECTRONICS MANUFACTURE

V. I. Orlov<sup>1</sup>, N. A. Sergeyeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>OJSC “Proof and Experimental Technical Centre – NPO PM”

20 Molodyezhnaya st., Zheleznogorsk, 662970, Russia. E-mail: itcnppm@atomlink.ru

<sup>2</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sergena@list.ru

*The paper examines the problems of electronics diagnosis according to the data of non-destructive control. In particular, the results of some types of integrated circuits diagnostics, transistors and diode matrices are considered. As a result of diode matrices processing, different groups of applicable items were revealed. Some numerical results of diagnostic parameters processing are given. In this context, the task analysis of the technological processes of electronics manufacture of the specified quality is analyzed. The non-parametrical models of discrete-continuous*

*processes for different technological stages of production are given. The sequence of control actions generation for the whole technological cycle is presented as well. The non-parametric estimations, models, algorithms of control and decision-making are based on nonparametric statistics of Nadaray-Watson. The specific non-parametric models and algorithms that can be used as a basis for design of computer systems of diagnostics electronics test results of non-destructive control, as well as in the development of computer control systems of technological process at manufacture of electronics are given.*

*Keywords: non-parametric model, priori information, discrete-continuous process, diagnostics, pattern recognition, electronics.*

Современный космический аппарат – это сложная электронная система, которая, находясь в космосе в течение 10–15 лет, должна сама себя диагностировать, проверять, принимать решение в рамках поставленных задач и выполнять различные возложенные на нее функции. Космос является агрессивной средой, которая обладает различными деструктивными характеристиками. В их числе глубокий вакуум, большой перепад температур, радиация, потоки заряженных частиц и т. д. Бортовая аппаратура в космическом пространстве не подлежит ремонту, именно поэтому она называется неремонтопригодной, и, соответственно, надежность такой аппаратуры должна быть максимальной. Требуемый уровень надежности обеспечивается за счет различных факторов, самым главным из которых является использование высоконадежных электронных компонентов. Космический аппарат (КА) содержит от 100 до 200 тыс. электронных компонентов (ЭКБ). К ним относятся микросхемы, транзисторы, диоды, конденсаторы, реле, кварцевые резонаторы, резисторы и т. д. С каждым годом габаритные размеры электронных компонентов становятся все меньше, а степень интеграции микросхем – все выше. Размеры безвыводных резисторов или конденсаторов достигают 1–2 мм, а вес – доли грамма. Интегральные микросхемы типа процессора обладают возможностями персонального компьютера, который упакован в корпус размерами 5×5 см.

Комплектация бортовой аппаратуры КА высоконадежной ЭКБ является одной из основных задач современной космической отрасли. В первую очередь следует предотвратить попадание в аппаратуру низкосортной фальсифицированной продукции, которая не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к надежности. В рамках решения этой проблемы необходимо обеспечить закупку ЭКБ у проверенных поставщиков, а также проведение входного контроля (ВК), дополнительных отбраковочных испытаний (ДОИ) и разрушающего физического анализа (РФА) ЭКБ.

Особое значение приобретает индивидуальная отбраковка компонентов. Для каждого компонента предусмотрено проведение следующих испытаний:

- электротермотренировки (ЭТТ) или термотренировки (ТТ) с последующим расчетом дрейфа электрических параметров;
- контроля наличия посторонних частиц в подкорпусном пространстве;
- диагностических испытаний (контроля вольт-амперных характеристик (ВАХ), побитовых токов,  $m$ -характеристик, токов потребления по шине питания в момент переключения и многих других).

От каждой партии компонентов берутся образцы, на которых проводится РФА. В его составе такие операции, как исследование на растровом электронном микроскопе (РЭМ), контроль подкорпусной влаги, испытания на сдвиг кристалла и обрыв выводов, проверка паяемости и др.

Одним из важнейших этапов комплектации бортовой аппаратуры КА является работа с заводами-изготовителями. Основные характеристики качества и надежности определяются в процессе производства на заводе-изготовителе. В России отсутствует специализированное производство ЭКБ для космической отрасли, как это организовано в США и Западной Европе. Требования к качеству и надежности ЭКБ, используемых в аппаратуре КА, выше, чем к ЭКБ, выпускаемой российскими заводами в настоящее время.

При диагностике электрорадиоизделий (ЭРИ) основное внимание уделяется видам диагностических испытаний и средствам контроля [1]. При проведении диагностического контроля проводятся измерения электрических характеристик при различных видах нагрузок на отдельные элементы и узлы ЭРИ. По результатам измерений вольт-амперных характеристик до и после электротермотренировки диодных матриц 2ДС627А и транзисторов Т866А аА0.339.431 ТУ были проведены компьютерные исследования ЭРИ, которые позволяют моделировать дискретно-непрерывный процесс производства ЭРИ в рамках установленного технологического регламента с целью оптимизации процесса изготовления ЭРИ.

**Обработка данных испытаний ЭРИ.** Были взяты результаты испытаний ЭРИ, производимые на ОАО ИТЦ НПО ПМ. При корреляционном анализе данных результатов испытаний до и после ЭТТ были построены гистограммы распределений различных электрических параметров. При этом была выявлена следующая тенденция: смещение моды и математического ожидания параметров партии изделий до и после ЭТТ, что привело к возникновению многомодальной (в основном двухмодальной, в отдельных случаях трехмодальной) оценки дрейфа параметров. Дрейф параметров оценивается как разница значений параметра «до» и «после» ЭТТ. При численной обработке проводилось предварительное центрирование и нормирование исходной выборки. Типичный пример гистограммы характеристик представлен на рис. 1.

Построены оценки плотности вероятности распределения измеряемых электрических характеристик (рис. 1, а, б показаны сплошной линией). Анализ результатов показал несогласованность с общепринятыми законами распределений, в частности,

на практике оказывается, что функции плотности вероятности распределения далеки от нормального. Ниже приведены графики оценок плотностей рас-

пределения по данным диагностических испытаний ужесточенного контроля статического коэффициента передачи тока (рис. 2).

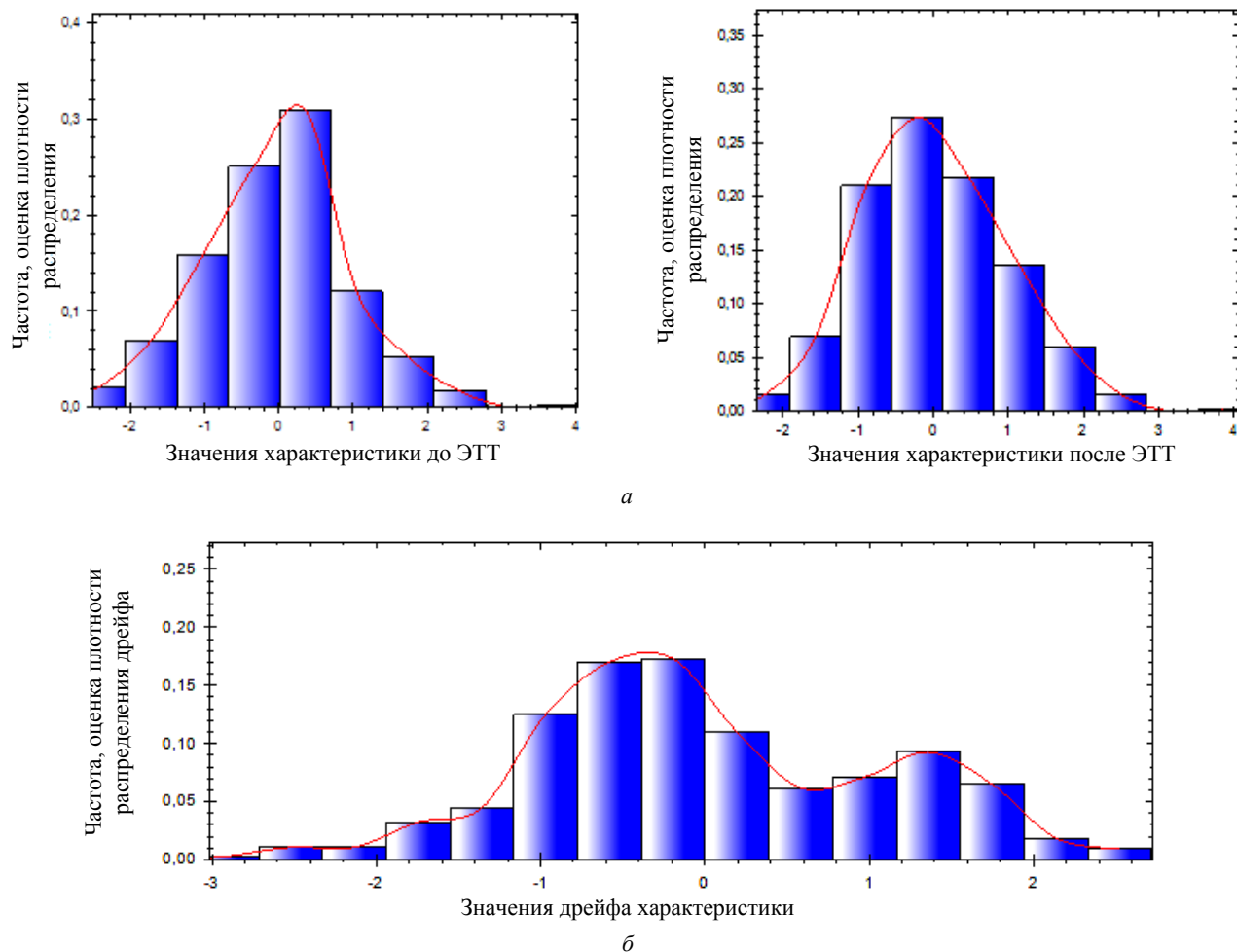


Рис. 1. Оценка плотности распределения прямой ВАХ (ДК, включая УН), режим измерения – 10 мкА (а) и оценка плотности распределения дрейфа (б)

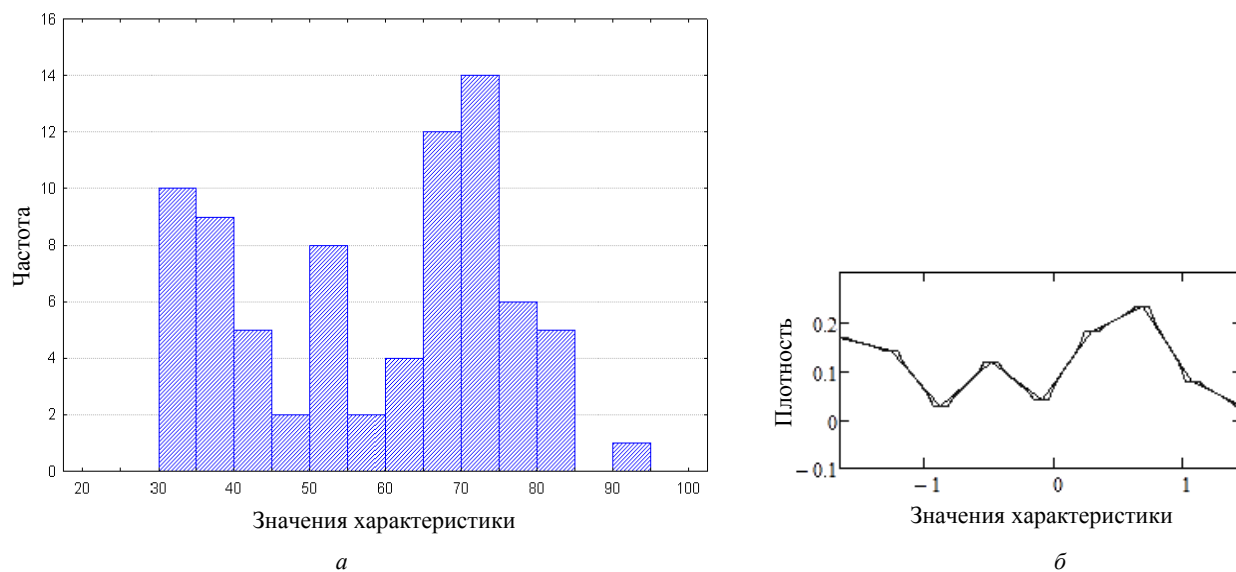


Рис. 2. Гистограмма (а) и оценка плотности распределения статического коэффициента передачи тока (б)

Выявлены зависимости различного характера между числовыми характеристиками. Ниже проиллюстрированы оценки линейного, нелинейного характеров (рис. 3, 4).

На рис. 3 и 4 представлена зависимость показателя напряжения насыщения база эмиттер при различных режимах подачи тока. Здесь по осям отложены значения замеров числовых характеристик центрированные и нормированные, восстановлены стохастические зависимости при использовании непараметрической оценки регрессии Надарая–Ватсона.

Результаты обработки данных и их анализ показывают, что между некоторыми переменными установлена как слабая, так и сильная стохастическая связь. Результаты восстановления зависимостей в отдельных случаях приближаются к линейным, а в других – к нелинейным. Наиболее значительный вывод состоит в том, что в группе «годных» изделий обнаружены отличающиеся классы ЭРИ. Последнее приводит к очень важной практической задаче, связанной с рациональным ведением технологического процесса при производстве ЭРИ.

**Моделирование и управления технологическим процессом производства ЭРИ.** Технологический процесс может быть представлен в виде схемы, представленной на рис. 5, а.

Весь технологический процесс можно разбить на несколько последовательных подпроцессов  $O_v$ ,  $v = \overline{1, N}$ , предусмотренных технологией производства.

Каждый подпроцесс можно рассматривать как отдельный объект и формировать для него контур управления. На каждом этапе определяется задающее воздействие –  $x_v^*$ , которое задается оператором. Далее значение задающего воздействия подается в соответствующее управляющее устройство –  $УУ_v$ . На каждый объект  $O_v$  подаются входные переменные следующих типов:

- 1) управляющее воздействие  $u_v$ , выработанное управляющим устройством  $УУ_v$ ;
- 2) переменная  $x_{v-1}$  с предыдущего этапа технологического процесса, является контролируемым, но неуправляемым входным воздействием для последующего  $v$ -го этапа;
- 3) неуправляемая контролируемая входная переменная, действующая на каждый конкретный объект  $O_v$ , обозначаемая через  $\mu_v$ ,  $v = \overline{1, N}$ .

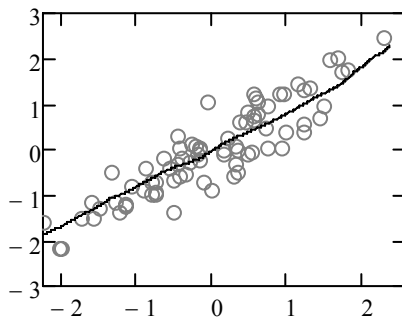


Рис. 3. Линейная зависимость показателей

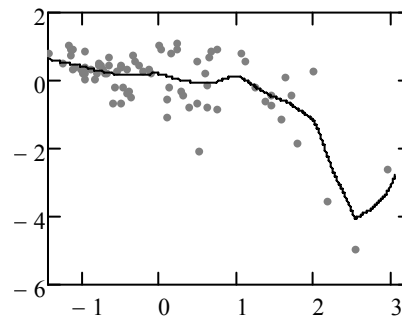


Рис. 4. Нелинейная зависимость показателей

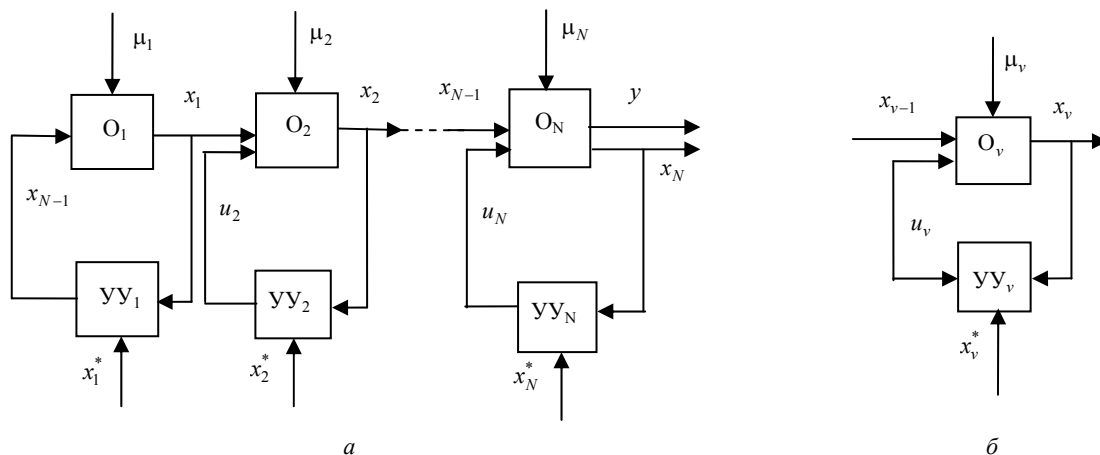


Рис. 5. Схема управления последовательным технологическим процессом (а); фрагмент схемы с обозначением переменных в векторной форме (б)

Входная переменная  $x_{v-1}$  является неуправляемой на  $v$ -м этапе процесса, по сути имеет смысл переменной  $\mu_v$ ,  $v = \overline{1, N}$ . Все переменные процесса в общем случае могут являться векторами с различным числом компонент (рис. 5, б):

$$x_{v-1} = (x_{v-1,1}, \dots, x_{v-1,l_{x_{v-1}}}), \quad \mu_v = (\mu_{v,1}, \dots, \mu_{v,l_{\mu_v}}),$$

$$x_v = (x_{v,1}, \dots, x_{v,l_{x_v}}), \quad u_v = (u_{v,1}, \dots, u_{v,l_{u_v}})$$

где  $l_{x_v}$ ,  $l_{\mu_v}$ ,  $l_{u_v}$  – размерности соответствующих векторов. Непараметрическая модель подпроцесса (рис. 1, б) при наличии выборки  $\{(x_{v-1}^i, x_v^i, u_v^i, \mu_v^i), i = \overline{1, s}\}$  запишется в виде статистики [2]:

$$x_v^s(x_{v-1}, u_v, \mu_v) = \frac{\sum_{i=1}^s x_v^i \cdot \omega(x_{v-1}^i, u_v^i, \mu_v^i; x_{v-1}, u_v, \mu_v)}{\sum_{i=1}^s \omega(x_{v-1}^i, u_v^i, \mu_v^i; x_{v-1}, u_v, \mu_v)}, \quad (1)$$

где принято обозначение:

$$\omega(x_{v-1}^i, u_v^i, \mu_v^i; x_{v-1}, u_v, \mu_v) = \prod_{j=1}^{l_{x_{v-1}}} \Phi\left(\frac{x_{v-1,j} - x_{v-1,j}^i}{C_{x_{v-1}}^s}\right) \times \\ \times \prod_{k=1}^{l_{u_v}} \Phi\left(\frac{u_{v,k} - u_{v,k}^i}{C_{u_v}^s}\right) \prod_{m=1}^{l_{\mu_v}} \Phi\left(\frac{\mu_{v,m} - \mu_{v,m}^i}{C_{\mu_v}^s}\right).$$

Здесь  $\Phi(\cdot)$  – ядерная функция, а  $C^s$  – параметры размытости, обладают известными свойствами сходимости непараметрических оценок [2].

В качестве контролируемых параметров исследуемого процесса могут выступать такие показатели, как прямая вольтамперная характеристика, постоянное прямое напряжение, напряжение насыщения базы эмиттера и т. п. На практике диапазоны значений переменных, фигурирующих в данном технологическом процессе, определяются технологическим регламентом, утвержденным для конкретного предприятия. В некоторых случаях даже соблюдение технологического регламента может привести к выпуску некачественной продукции и даже к браку.

Приведем более подробно возможный вариант «течения» конкретного технологического процесса изготовления ЭРИ для произвольной компоненты вектора  $x$  (рис. 6). Реальный технологический процесс будет «протекать» аналогично, только в много-

мерном пространстве, определяемом значениями всех компонент  $(x, u, \mu)$ .

Приведенная выше модель (1) строится при наличии соответствующих обучающих выборок для каждого объекта  $O_v$ ,  $v = \overline{1, N}$ . Подобные модели относятся к классу адаптивных и обучающихся [2] и корректируются по мере вновь поступающих измерений технологических переменных [3]. Практическое использование системы моделей может служить основанием для разработки системы управления и оптимизации дискретно-непрерывным процессом с идентификатором. Основная цель обучающейся системы состоит в том, чтобы найти задающие воздействия последовательности подпроцессов (рис. 5, а) и управляющих устройств  $УУ_v$ ,  $v = \overline{1, N}$ , обеспечивающих наиболее рациональное «течение» технологического процесса изготовления ЭРИ. Это открывает реальный путь изготовления ЭРИ заданного качества.

Непараметрический алгоритм управления на каждом цикле производства ЭРИ в общем виде может быть представлен следующим образом [2]:

$$u_v^s(x_{v-1}, x_v^*, \mu_v) = \frac{\sum_{i=1}^s u_v^i \cdot \omega(x_{v-1}^i, \mu_v^i; x_v^*, x_{v-1}, \mu_v)}{\sum_{i=1}^s \omega(x_{v-1}^i, \mu_v^i; x_v^*, x_{v-1}, \mu_v)}, \quad (2)$$

где принято обозначение:

$$\omega(x_{v-1}^i, \mu_v^i; x_v^*, x_{v-1}, \mu_v) = \\ = \prod_{j=1}^{l_{x_{v-1}}} \Phi\left(\frac{x_{v-1,j}^* - x_{v-1,j}^i}{C_{x_{v-1}}^s}\right) \prod_{m=1}^{l_{\mu_v}} \Phi\left(\frac{\mu_{v,m} - \mu_{v,m}^i}{C_{\mu_v}^s}\right).$$

Пусть управляемая переменная  $x_1$  технологического процесса приняла определенное значение из интервала  $r_1 \in [a_1^{\min}; a_1^{\max}]$ . Заметим, что область  $r_1$  много меньше всего интервала  $[a_1^{\min}; a_1^{\max}]$ . При этом переменная  $x_2$ , статистически зависящая от показателя  $x_1$ , также принимает определенное значение из области  $r_2 \in [a_2^{\min}; a_2^{\max}]$ . На рис. 6 стрелки иллюстрируют последовательность и малые диапазоны выбора значений управляющих переменных для конкретного процесса, эту последовательность вместе с указанием малых диапазонов можно интерпретировать как «путь» внутри технологического регламента.

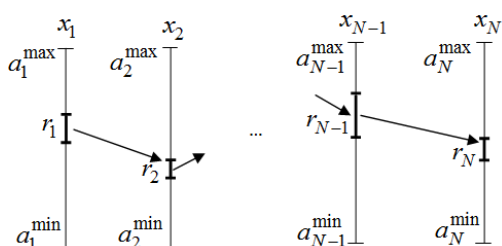


Рис. 6. Диапазоны значений параметров, определяемые технологическим регламентом:

$a_v^{\min}$ ,  $a_v^{\max}$  – минимальная и максимальная границы диапазона допустимых значений переменных, определяемые технологическим регламентом;  $r_v$  – фактическая область значения параметра,  $v = \overline{1, N}$

Для рационального ведения процесса необходимо для задающего воздействия  $x_v^*$  каждого подпроцесса определить значение  $x_v \in r_v \subset [a_v^{\min}; a_v^{\max}]$ ,  $v = \overline{2, N}$ . Представляется целесообразным ведение технологического процесса осуществлять следующим образом: если на  $v$ -м этапе изготовления получены значения переменных, принадлежащих интервалу  $r_v$ , то на  $(v+1)$ -м наиболее рационально, чтобы соответствующие технологические переменные принадлежали не всему интервалу  $[a_{v+1}^{\min}; a_{v+1}^{\max}]$ , а его подобласти  $r_{v+1} \subset [a_{v+1}^{\min}; a_{v+1}^{\max}]$ .

Для различных современных производств характерно, что диапазон значений технологических переменных достаточно широк во всех сечениях технологического процесса, хотя и соответствует технологическому регламенту. Поэтому возникает задача, связанная с оптимизацией технологического процесса в рамках технологического регламента.

Основная мысль вышесказанного состоит в обосновании оптимизации технологического процесса изготовления ЭРИ в рамках технологического регламента. Здесь возможны два пути.

Первый из них состоит в том, чтобы разработать на основе исследований, проведенных для каждого конкретного предприятия, более жесткий технологический регламент и, естественно, ему следовать. Естественно, это потребует приобретения соответствующего контрольно-измерительного оборудования и повлечет значительные затраты.

Второй путь состоит в том, чтобы следовать имеющемуся технологическому регламенту, но оптимизировать режим ведения процесса в данном технологическом объекте с учетом фактически проведенной технологической операции на предыдущем объекте. Такой путь значительно более реалистичен, поскольку не требует значительных затрат на создание системы с одной стороны, а с другой – позволяет существенно повысить качество выпускаемой продукции

и уменьшить потери при производстве тех или иных изделий. Для этого необходима разработка и внедрение интеллектуальных компьютерных систем (ИКС) оптимизации технологических режимов «внутри» технологического регламента.

Основные результаты работы состоят в следующем: установлено, что в классе годных изделий в результате диагностических испытаний явно выделяются две, а возможно, и более, группы, которые условно можно назвать «хорошими» и «очень хорошими». Исходя из этого, появляется возможность изготавливать ЭРИ того или иного заданного качества. Но для этого необходимо построение адаптивных и обучающихся моделей, описывающих подпроцесс при переходе из одного состояния в другое. Приведены соответствующие непараметрические модели и алгоритмы выбора управляющих воздействий на каждом этапе.

#### Библиографические ссылки

1. Данилин Н. С. Диагностика и контроль качества изделий цифровой микроэлектроники. М. : Изд-во стандартов, 1991.
2. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983.
3. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 2 (28). С. 4–9.

#### References

1. Danilin N. S. *Diagnostika i kontrol' kachestva izdeliy tsifrovoy mikroelektroniki* (Diagnostics and quality control of microelectronics units). Moscow, Izd-vo standartov, 1991, 176 p.
2. Medvedev A. V. *Neparametricheskiye sistemy adaptatsii* (Non-parametric systems of adaptation). Novosibirsk, Nauka, 1983, 174 p.
3. Medvedev A. V. *Vestnic SibGAU*. 2010, № 2 (28), pp. 4–9.

© Орлов В. И., Сергеева Н. А., 2013

УДК 62–50

### НОВЫЙ ГЕНЕРАТОР СЛУЧАЙНЫХ РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТОЧЕК

А. И. Рубан, А. В. Кузнецов

Сибирский федеральный университет  
Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: ai-rouban@mail.ru

*Предложена новая схема генерирования заданного числа равномерно распределенных точек в гиперкубе и исследованы главные свойства генератора. В генераторе реализовано дополнительное условие: упорядоченные значения каждой координаты всех генерируемых точек находятся на равном расстоянии друг от друга. Этим он отличается от обычного простейшего генератора, в котором каждая координата точки (вектора) определяется датчиком псевдослучайных равномерно распределенных чисел. Получаемые точки становятся более равномерно распределенными в пространстве? и более полно извлекается информация об исследуемых функциях. Генератор применен в алгоритмах поиска глобального экстремума функций многих непрерывных переменных и при статистическом исследовании этих алгоритмов.*

*Ключевые слова:* генератор, случайный, равномерно распределенные точки.

## THE NEW GENERATOR OF THE RANDOM UNIFORMLY DISTRIBUTED POINTS

A. I. Ruban, A. V. Kuznetsov

Siberian Federal University  
26 Kireskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: ai-rouban@mail.ru

*The new scheme for generation of a given number of uniformly distributed points in the hypercube is offered and the main properties of the generator are investigated. In the generator the additional condition is represented: the simply ordered values of each coordinate of all generated points are equidistant from each other. This makes it different from the usual simple generator in which each coordinate of point (vector) is determined by a pseudo random number evenly. The points deduced are more uniformly distributed in space and more full information about the research function is retrieved. Generator was applied in the algorithms of search of global optimization of functions of many continuous variables and in the case of statistical study of these algorithms.*

*Keywords: generator, random, uniformly distributed points.*

При решении многих задач (например, поисковой глобальной оптимизации функций непрерывных переменных) возникает необходимость изучения целевой функции на основе серии измерений (вычислений) ее в заданном количестве точек. Для генерирования этих точек в пространстве координат обычно используются случайные последовательности с равномерным законом распределения, регулярные сетки и регулярные ЛПт последовательности. Каждый из этих способов обладает как достоинствами, так и недостатками. Создание «хорошего» датчика, который обеспечивает равномерное распределение точек как в пространстве независимых переменных (координат), так и относительно каждой из координат, представляет собой нетривиальную задачу.

Для **обычного генератора случайных последовательностей** с равномерным законом распределения значений каждой из координат качество последовательностей целиком зависит от используемого датчика псевдослучайных чисел. Получаемая случайная последовательность точек обычно содержит локальные неоднородности, которые визуально выглядят как «сгустки точек» и «пустые места» как в пространстве всех переменных, так и по каждой из координат (или для групп координат). За счет этого осуществляется неравномерное изучение целевых функций. Однако это самый простой в реализации способ генерации равномерных последовательностей точек. Случайное размещение точек позволяет проводить статистический анализ свойств изучаемых функций и рассматриваемых алгоритмов.

**Регулярные сетки**, в отличие от случайных генераторов, не имеют локальных неоднородностей, и любой фрагмент регулярной сетки сохраняет свойство равномерности (т. е. тоже является регулярной сеткой). Однако количество пробных точек  $n$  в регулярной сетке для сохранения свойства равномерности должно быть равно  $v^m$ , где  $m$  – размерность пространства,  $v$  – количество точек вдоль каждой координаты. Количество пробных точек  $n$  может принимать только ряд фиксированных значений и с ростом размерности пространства число точек  $n$  сильно нарастает. Точки регулярной сеткой располагаются для  $m = 2$  на прямых линиях, параллельных осям координат, а для  $2 < m$  – на соответствующих параллель-

ных плоскостях. Это свойство сильно уменьшает количество извлекаемой информации об исследуемых функциях относительно части координат. Например, при  $m = 2$  и  $v = 10$  из  $n = 100$  точек двумерного пространства мы располагаем только 10 точками относительно каждой из координат. Регулярность сетки не позволяет также при каждом фиксированном  $n$  проводить соответствующие статистические исследования.

Равномерность размещения точек и в пространстве, и по каждой из координат обеспечивает **регулярный генератор ЛПт последовательностей**. Размещение точек детерминированное (как у регулярной сетки) и оптимальное: точки равномерно распределены в пространстве и по каждой координате (упорядоченные значения каждой из координат всех точек находятся на равном расстоянии друг от друга). При удобной для вычислений двоичной реализации алгоритма построения последовательности указанное оптимальное свойство справедливо для  $n = 2^q$  ( $q = 1, 2, 3, \dots$ ). При создании генератора возникают трудности удовлетворения обоим критериям оптимальности при произвольных значениях числа точек  $n$  и размерности  $m$  пространства. Сравнительно недавние исследования показали, что при возрастании  $m$  точки группируются в жгуты. Регулярность сетки также не позволяет при фиксированных  $n$  проводить соответствующие статистические исследования.

Идея **нового равномерного случайного распределения точек** кратко высказана в [1]. В представленной работе идея алгоритмизована и свойства генератора частично исследованы. В генераторе **псевдослучайных** равномерно распределенных точек реализовано дополнительное условие (второе условие оптимальности в ЛПт генераторе): упорядоченные значения каждой координаты всех генерируемых точек находятся на равном расстоянии друг от друга. За счет наличия этого свойства более полно извлекается информация об изучаемых относительно координат функциях (например, при оптимизации функций). Так, если в пространстве двух переменных размещено 100 пробных точек и в них вычислена исследуемая функция, то и вдоль каждой координаты мы располагаем значениями функции также в 100 точках, которые



расположены на одинаковом расстоянии (относительно координат) друг от друга. Случайное размещение точек в пространстве позволяет осуществлять статистический анализ свойств изучаемых функций и алгоритмов. Программная реализация генератора представлена в [2].

**Основной результат.** Опишем основную идею построения нового генератора случайных равномерно распределенных точек на примере получения значений по одной из координат (рис. 1). Заданное число точек равно  $n$ .

Идем от конечной цели. Помещаем в интервал изменения выбранной (первой) координаты (в нормированном случае это интервал  $[-1; 1]$ ) заданное число точек, например  $n$  точек, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 1, а). Последовательность  $n$  чисел обычного генератора  $R[-1; 1]$  псевдослучайных равномерно распределенных в интервале  $[-1; 1]$  преобразуем в последовательность чисел нового генератора. Берем первое случайное число первой последовательности и находим ближайшее к нему число из исходной последовательности равноудален-

ных друг от друга чисел. Это и будет значение выбранной координаты для первой точки (рис. 1, б). Данный элемент из исходной эталонной последовательности исключаем (рис. 1, в). Затем аналогично переходим к поиску значения той же самой выбранной координаты для второй точки, ориентируясь на скорректированную эталонную последовательность (рис. 1, г) и т. д. После завершения этой процедуры получено  $n$  случайных последовательных значений выбранной координаты. Аналогично случайно выбираем  $n$  последовательных значений для следующей (второй) фиксированной координаты. Первое значение для первой координаты и первое значение для второй координаты дают первую случайную точку в двумерном пространстве. Количество координат также может принимать любое конечное значение.

Реализации размещения точек на основе нового генератора в пространстве двух переменных при разном количестве точек  $n = 16, 40, 60, 80$  представлены на рис. 2.

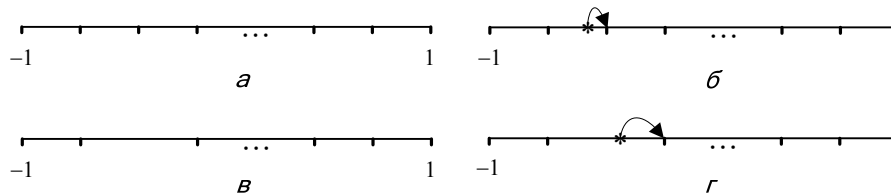


Рис. 1. Выбор значений каждой координаты в новом генераторе

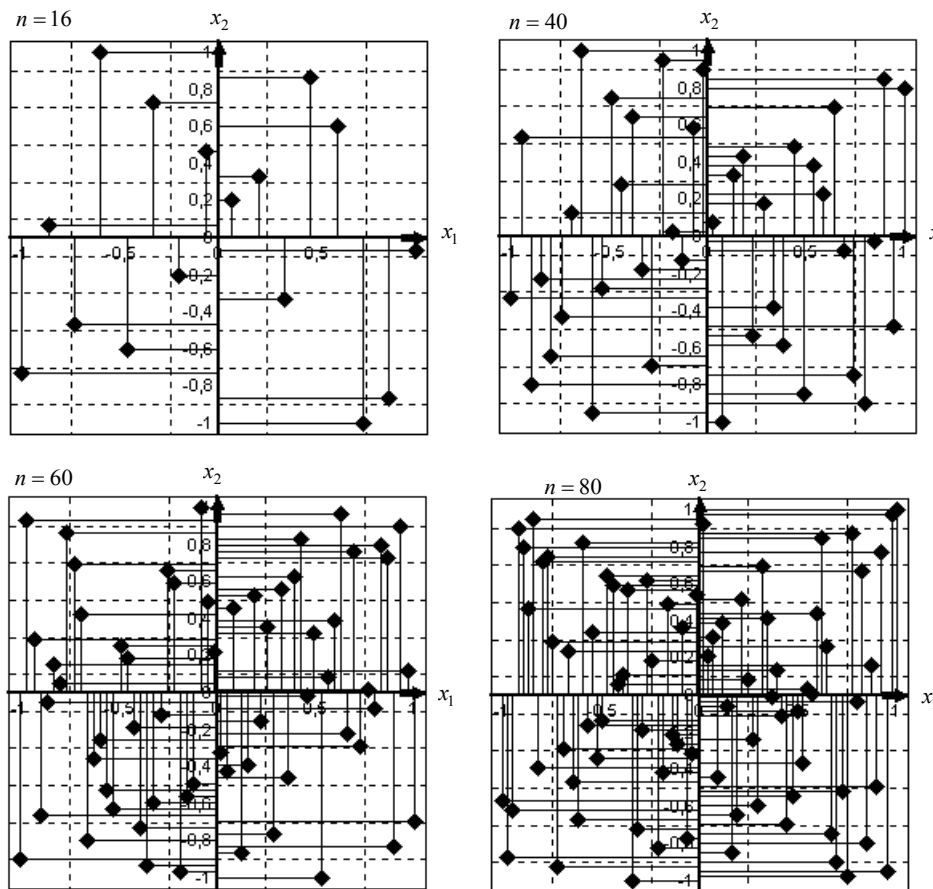


Рис. 2. Фрагменты размещения точек нового генератора при различном заданном количестве точек:  $n = 16, 40, 60, 80$

**Свойства генератора.** Проведем статистические испытания нового генератора на равномерность точек в **двумерном** пространстве и сравним получаемые характеристики с аналогичными характеристиками для обычного случайного генератора, а в конце – и с характеристиками для оптимальных ЛПТ последовательностей.

Для получения статистик (оценок математического ожидания  $\hat{m}_T$  и среднего квадратичного отклонения  $\hat{\sigma}_T$  количества точек, попадающих в выбранные подобласти рассматриваемой прямоугольной области) был разработан специализированный программный стенд. При расчете оценок каждый эксперимент повторялся 1 000 раз.

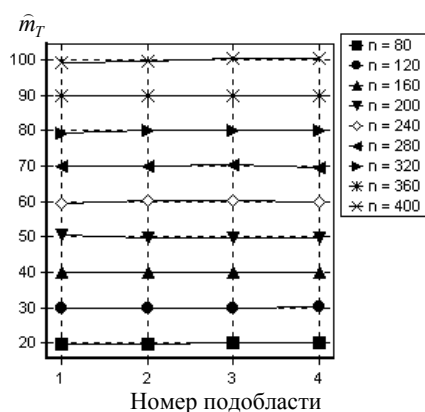
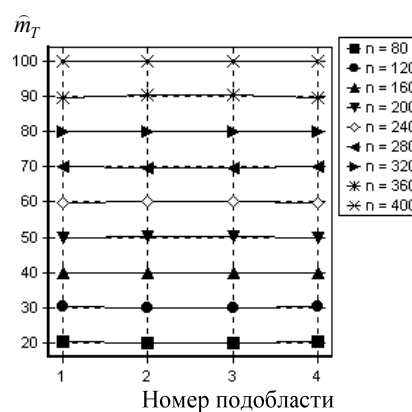
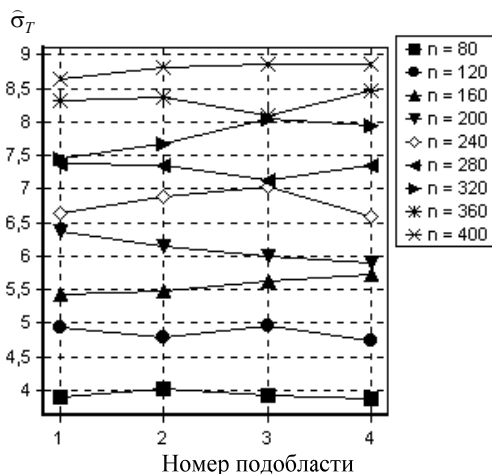
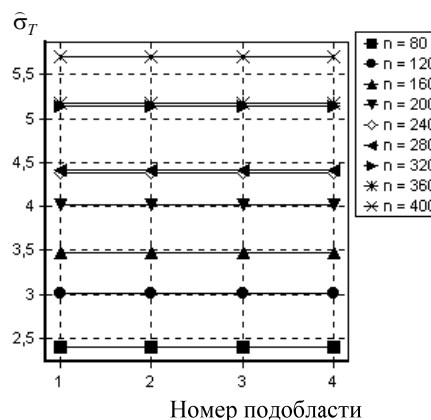
Прямоугольная область разбивается на соответствующее число прямоугольных подобластей:  $k = 4, 9, 16, 25, 36, \dots$  и подсчитываются оценки математического ожидания  $\hat{m}_T$  и среднего квадратичного отклонения  $\hat{\sigma}_T$  для количества точек, попадающих в каждую подобласть, при различных объемах  $n$  выборки или различном количестве точек  $s$ , попадающих в каждую подобласть (при этом  $n = s \cdot k$ ).

В качестве примера на рис. 3, 4 представлены графики для  $\hat{m}_T$  при разбиении области на четыре подобласти.

При этом для первого приведенного на графиках варианта на каждую подобласть приходится  $s = 20$  точек и тогда общий объем точек равен  $n = 80$  и т. д.

Для всех приведенных вариантов проверены гипотезы (при уровне значимости 0,01) о равенстве математического ожидания соответствующему числу  $s$ :  $m_T = 20$  при  $n = 80$ ;  $m_T = 30$  при  $n = 120$ ; ...;  $m_T = 100$  при  $n = 400$  для всех четырех подобластей. Все гипотезы приняты. Это говорит о среднем равномерном размещении точек в четырех подобластях. В указанном смысле оба генератора одинаково хороши. Такая же закономерность характерна и для  $k = 9, 16, 25, 36, \dots$ .

Второй характеристикой равномерности размещения точек в подобластях является  $\sigma_T$  – среднее квадратичное отклонение количества точек от математического ожидания. На рис. 5, 6 для  $k = 4$  даны соответствующие оценки  $\hat{\sigma}_T$  для  $\sigma_T$ . Среднее квадратичное отклонение количества точек в каждой подобласти для нового генератора в среднем в 1,55 раза меньше, чем для случайного генератора, что характеризует новый генератор как более «качественный».

Рис. 3.  $\hat{m}_T$  для обычного генератораРис. 4.  $\hat{m}_T$  для нового генератораРис. 5.  $\hat{\sigma}_T$  для обычного генератораРис. 6.  $\hat{\sigma}_T$  для нового генератора

На рис. 7 приведены графики зависимости  $\hat{\sigma}_T$  (среднего значения оценок  $\hat{\sigma}_T$  для всех подобластей выбранного варианта) от среднего количества точек  $s$ , приходящихся на каждую подобласть, при различном количестве  $k$  подобластей. С ростом среднего количества точек  $s$  (и соответственно с ростом  $n = k \cdot s$ ) возрастает средняя оценка  $\hat{\sigma}_T$  среднего квадратичного отклонения, но для нового генератора она всегда меньше, чем для обычного случайного генератора. Отношение  $\lambda$  оценок  $\hat{\sigma}_T$  (для обычного и нового генераторов) для каждого  $k$  остается на одном уровне (который находится внутри доверительного интервала) и с ростом  $k$  от 4 до 100 уменьшается от величины 1,58 до 1,045: 1,58 ( $k = 4$ ); 1,28 ( $k = 9$ ); 1,9 ( $k = 16$ ); 1,14 ( $k = 25$ ); 1,10 ( $k = 36$ ); 1,08 ( $k = 49$ ); 1,07 ( $k = 64$ ); 1,06 ( $k = 81$ ); 1,045 ( $k = 100$ ). В указанном смысле эффективность нового генератора всегда выше, чем обычного.

На рис. 8 для конкретности представлены графики зависимости величины  $\lambda$  отношения оценок  $\hat{\sigma}_T$  (обычного генератора и нового) при сравнительно малых и больших  $s$ . Параметр  $\lambda$  можно именовать коэффициентом эффективности нового генератора по отношению к обычному случайному генератору. Чем на большее число  $k$  подобластей разбивается рассматриваемая прямоугольная область, тем более тонкая структура используется для характеристики генераторов

и тем ближе  $\lambda$  к единице. Эффективность обоих генераторов становится примерно одинаковой.

Сравним для общности новый генератор случайно распределенных точек с оптимальным генератором ЛПТ неслучайных последовательностей.

Для каждого фиксированного  $s$  (среднего количества точек, приходящихся на каждую подобласть) и  $k$  (количества подобластей) в каждую подобласть попадает различное количество точек. Пример такого распределения точек при  $s = 3$  и  $k = 36$  (при этом общее количество точек  $n = s \cdot k = 108$ ) представлен на рис. 9. Так как ЛПТ генератор обеспечивает получение только одной реализации при любом фиксированном количестве точек, то для сравнения со случайными генераторами аналогом величины  $\hat{\sigma}_T$  – среднего значения оценки среднего квадратичного отклонения – будем считать обычную оценку среднего квадратичного отклонения (от среднего) для вышеуказанной реализации распределения точек по подобластям. Для ЛПТ генератора эта характеристика разброса точек существенно меньше соответствующей величины  $\hat{\sigma}_T$  для нового генератора. Их отношение так же, как и при сравнении случайных генераторов, обозначаем через  $\lambda$  и оно характеризует эффективность ЛПТ генератора по отношению к новому генератору. На рис. 10 приведены графики изменения  $\lambda$  как функции от  $s$  при различных  $k$ .

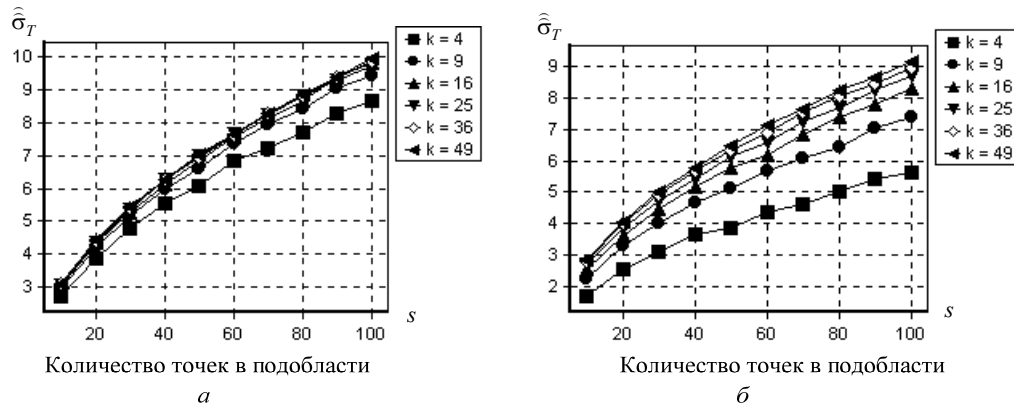


Рис. 7.  $\hat{\sigma}_T$  для обычного (а) и нового (б) генераторов

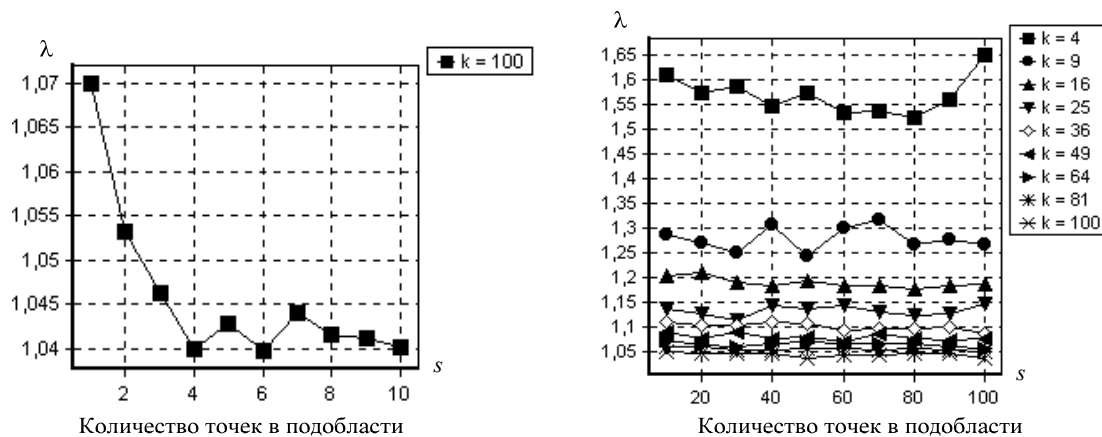


Рис. 8. Поведение коэффициента эффективности  $\lambda$  нового генератора по отношению к обычному генератору

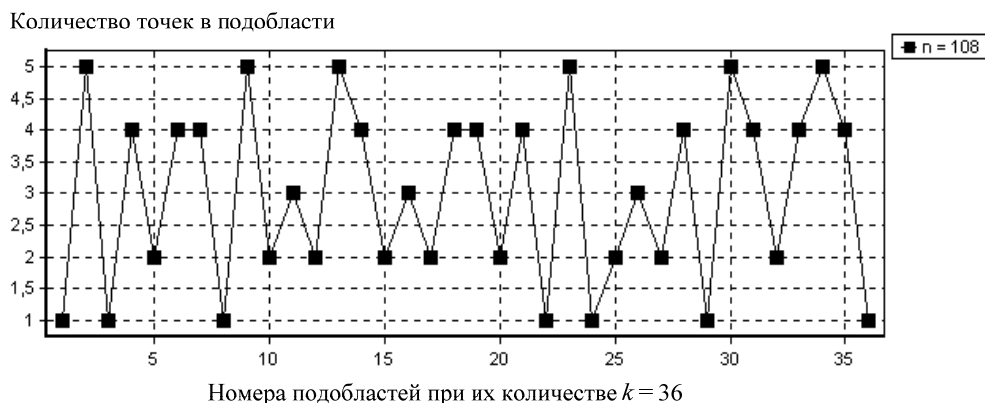


Рис. 9. Распределение количества точек по подобластям при  $s = 3$  и  $k = 36$  для ЛПГ генератора

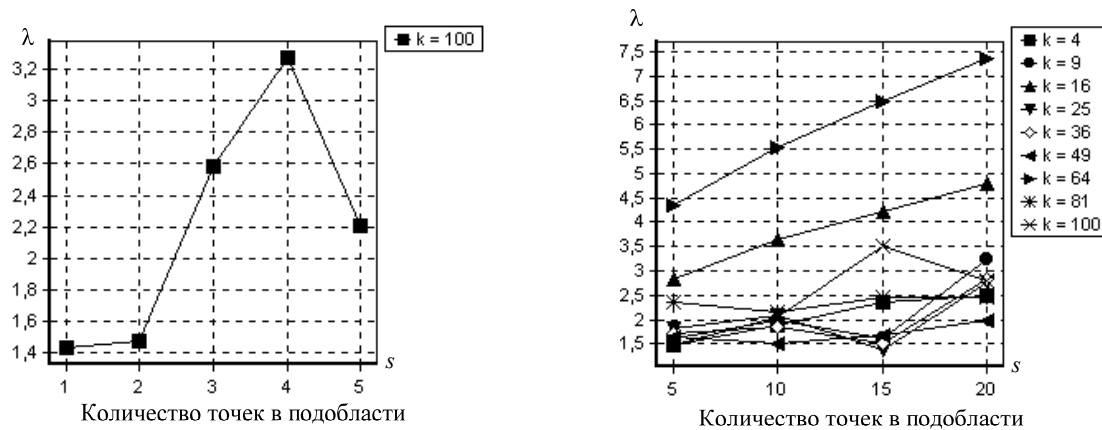


Рис. 10. Поведение коэффициента эффективности  $\lambda$  ЛПГ генератора по отношению к новому генератору

Таким образом, использование нового генератора при исследованиях алгоритмов поиска глобального экстремума функций непрерывных переменных (с селективным усреднением координат) подтвердило его преимущество по сравнению с простейшим датчиком случайных равномерно распределенных точек. Поясним этот факт. При поиске глобального экстремума перед совершением каждого рабочего шага проводится  $n$  пробных движений. Величина  $n$  обычно невелика и лежит в интервале  $[20; 200]$ . Часто  $n = 100$ . Для величины  $n$ , равной или максимально близкой к указанной, в таблице приведен коэффициент эффективности  $\lambda$  нового генератора при различных возможных сочетаниях  $s$  и  $k$ :

| $s$ | $k$ | $n$ | $\lambda$ |
|-----|-----|-----|-----------|
| 1   | 100 | 100 | 1,069     |
| 2   | 49  | 98  | 1,03      |
| 3   | 36  | 108 | 1,122     |
| 4   | 25  | 100 | 1,153     |
| 6   | 16  | 96  | 1,204     |
| 11  | 9   | 99  | 1,313     |
| 25  | 4   | 100 | 1,562     |

При числе областей  $k = 100$ , когда на каждую из 100 подобластей приходится в среднем одна точка, коэффициент эффективности  $\lambda = 1,069$ . Преимущество нового генератора совсем мало. Перед соверше-

нием первого рабочего шага вес каждого пробного движения велик. Надо хотя бы одной точкой попасть в окрестность искомого глобального экстремума. На следующих рабочих шагах осуществляется достаточно быстрое сокращение области поисковых движений и за счет этого на каждом следующем рабочем шаге область глобального экстремума (по отношению к области поисковых движений) увеличивается, а, следовательно, возрастает количество пробных точек, попадающих в эту область. Характеризовать область пробных движений можно все грубей, уменьшая количество подобластей вплоть до  $k = 4$ . При этом эффективность нового генератора с каждым шагом повышается. Последовательное изменение эффективности генератора отражено в таблице (при получении  $\hat{\sigma}_T$ , по которым рассчитывались  $\lambda$ , производилось 10 000 повторных испытаний). За счет отмеченного эффекта число итоговых рабочих шагов сокращается (по сравнению с использованием обычного генератора) на 1–2, т. е. вместо 5–7 шагов будет совершено 4–5 (при прочих равных условиях). В среднем время поиска глобального минимума сокращается на 25 %.

Новый генератор имеет некоторое преимущество и по отношению к генератору ЛПГ детерминированной последовательности точек, ибо для каждого фиксированного количества пробных точек  $n$  и заданной исходной

точки поиска обеспечивает получение различных случайных реализаций пробных точек, что необходимо при статистическом анализе свойств алгоритмов и обеспечении более надежного (за счет многократных запусков алгоритма) поиска положения глобального экстремума.

Все полученные закономерности выявлены при размерности пространства переменных, равной двум.

#### Библиографические ссылки

1. Рубан А. И. Глобальная оптимизация методом усреднения координат / Краснояр. гос. техн. ун-т. Красноярск, 2004.

2. Кузнецов А. В. Генераторы последовательностей равномерно распределенных точек // Вестн. Краснояр. гос. техн. ун-та. Мат. методы и моделирование. 2005. № 37. С. 148–155.

#### References

1. Ruban A. I. *Globalnaya optimizatsiya metodom usredneniya koordinat* (Global optimization by averaging coordinates). Krasnoyarsk, KGTU, 2004. 302 p.

2. Kuznetsov A. V. *Vestnik KGTU*, 2010, № 37, pp. 148–155.

© Рубан А. И., Кузнецов А. В., 2013

УДК 519.634

### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОИСКА МНОГОМЕРНЫХ СОЛИТОНОВ

Н. П. Савенкова, В. С. Лапонин

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Россия, 119991, ГСП-1 Москва, Ленинские горы. E-mail: lapvlad@mail.ru

*В последние годы в связи с развитием разработки оптических вычислительных систем стало активно развиваться математическое моделирование распространения лазерных фемтосекундных импульсов в нелинейных средах. Среди предложенных методов нахождения солитонов наибольшее распространение получили метод обратной задачи, спектральные методы и др. Ниже предлагаются два итерационных метода M1 и M2 для поиска солитонных решений в задаче распространения оптического излучения в среде с кубической нелинейностью в аксиально-симметричном случае.*

*Ключевые слова: солитонное решение, численный метод, сходимость.*

### NUMERICAL RESEARCH OF METHODS FOR MULTIDIMENSIONAL SOLITONS SEARCH

N. P. Savenkova, V. S. Laponin

Moscow State University named after M. V. Lomonosov  
GSP-1 Lenin Hills, Moscow, 119991, Russia. E-mail: lapvlad@mail.ru

*Over the last years, along with the development of optical computing systems, the mathematical modeling of laser femtosecond pulses in nonlinear media has been actively developing. Among the proposed methods for finding solitons the most widespread methods are the method of the inverse problem, spectral methods and other methods. The authors present two iterative methods, namely M1 and M2, for finding soliton solutions in the propagation of optical radiation in a medium with a cubic nonlinearity in the axially symmetric case.*

*Keywords: soliton solution, numerical method, convergence.*

В последние годы в связи с развитием оптических вычислительных систем стало активно развиваться математическое моделирование распространения лазерных фемтосекундных импульсов в нелинейных средах. Математическая постановка соответствующих моделей сводится к определению управляющих параметров, для которых нелинейная система уравнений в частных производных, кроме обычных решений, допускает существование решений солитонного вида [1–3].

Под солитонным решением [4] в работе подразумевается решение, локализованное в ограниченной области, быстро стремящееся к нулю вне этой области, сохраняющее свою конфигурацию со временем и имеющее один или несколько инвариантов.

Среди предложенных методов нахождения солитонов наибольшее распространение получили метод обратной задачи, спектральные методы и др. При этом лазерное излучение позволяет реализовать так называемые цветные солитоны, когда на нескольких

частотах одновременно существуют и распространяются вместе оптические волны вдоль нелинейной среды. Эволюция этих солитонов описывается системами связанных уравнений Шредингера. Интерес к этим солитонам в литературе постоянно сохраняется в связи с многочисленными потенциальными приложениями их в задачах передачи информации оптическими методами. Экспериментальные исследования [1–3], выполненные в различных лабораториях, показали практическую реализацию солитонов данного типа.

Ниже предлагаются два итерационных метода М1 и М2 для поиска солитонных решений, подробно описанные в [5] и [6] соответственно, которые хорошо себя зарекомендовали при нахождении солитонных решений одномерных уравнений таких, как уравнение Кортевега-де Фриза, уравнение Син-Гордона и нелинейного уравнения Шредингера. В настоящей работе методы М1 и М2 применяются к системе нелинейных уравнений Шредингера, описанной в [7], и приводится сравнение результатов, полученных с помощью предложенных методов, с результатами, полученными в работе [7].

**Математическая постановка задачи.** Распространение оптического излучения в среде с кубической нелинейностью в аксиально-симметричном случае описывается следующей системой нелинейных уравнений Шредингера [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial z} + i\bar{D}\Delta_r A + iD_1 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma A^* B e^{-ikz} + \\ + i\alpha A(|A|^2 + 2|B|^2) = 0, \\ \frac{\partial B}{\partial z} + i\frac{\bar{D}}{2}\Delta_r B + iD_2 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} + i\gamma A^2 e^{ikz} + \\ + 2i\alpha B(2|A|^2 + |B|^2) = 0, \\ 0 < r < R, \quad 0 < t < T, \\ 0 < z \leq Z, \quad k = k_2 - 2k_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $A(z, r, t), B(z, r, t)$  – комплексные амплитуды гармоник;  $z$  – нормированная на длину пучка основной волны продольная координата;  $r$  – безразмерная координата;  $t$  – безразмерное время в сопровождающей импульс основной волны системе координат;

$\Delta_r = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right)$  – оператор Лапласа по координате  $r$ ;

$D_j = -\frac{1}{2} \frac{\partial k_j}{\partial \omega_j}$  – коэффициенты, характеризующие дисперсию второго порядка  $j=1, 2$ ;  $\bar{D}$  – коэффициент, характеризующий дифракцию (в выбранной нормировке  $\bar{D}=1$ );  $k_j, \omega_j$  – волновое число и частота волны соответственно  $j=1, 2$ ;  $\gamma$  – коэффициент нелинейной связи взаимодействующих волн;  $\alpha_j$  – коэффициенты самовоздействия волн  $j=1, 2$ ;  $Z$  – безразмерная длина нелинейной среды;  $R$  – поперечный размер нелинейной среды;  $T$  – безразмерное время, в течение которого анализируется рассматриваемый процесс.

На входе в нелинейную среду задается распределение импульса:

$$A(t, r, z=0) = A^0(t, r),$$

$$B(t, r, z=0) = B^0(t, r).$$

Граничные условия имеют вид

$$A|_{t=0, T} = 0, \quad r \frac{\partial A}{\partial r}|_{r \rightarrow 0} = 0, \quad A|_{r=R} = 0,$$

$$B|_{t=0, T} = 0, \quad r \frac{\partial B}{\partial r}|_{r \rightarrow 0} = 0, \quad B|_{r=R} = 0.$$

**Обобщение итерационного метода М1 к решению многомерной задачи.** В системе (1) сделаем замену переменных  $C = B e^{-ikz}$  и получим нелинейную систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial z} + i\bar{D}\Delta_r A + iD_1 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i\gamma A^* C + \\ + i\alpha A(|A|^2 + 2|C|^2) = 0, \\ \frac{\partial C}{\partial z} + ikC + i\frac{\bar{D}}{2}\Delta_r C + iD_2 \frac{\partial^2 C}{\partial t^2} + i\gamma A^2 + \\ + 2i\alpha C(2|A|^2 + |C|^2) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Далее произведем замену переменных

$$\begin{cases} \xi_1 = r, \\ \xi_2 = t - vz, \end{cases} \quad (3)$$

и получим следующую систему уравнений

$$\begin{cases} -v \frac{\partial A}{\partial \xi_2} + i\bar{D}\Delta_{\xi_1} A + iD_1 \frac{\partial^2 A}{\partial \xi_2^2} + i\gamma A^* C + \\ + i\alpha A(|A|^2 + 2|C|^2) = 0, \\ -v \frac{\partial C}{\partial \xi_2} + ikC + i\frac{\bar{D}}{2}\Delta_{\xi_1} C + iD_2 \frac{\partial^2 C}{\partial \xi_2^2} + \\ + i\gamma A^2 + 2i\alpha C(2|A|^2 + |C|^2) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В системе (4) проинтегрируем первое и второе уравнение по  $\xi_2$  и получим систему

$$\begin{cases} vA = i\bar{D} \int \Delta_{\xi_1} A d\xi_2 + iD_1 \frac{\partial A}{\partial \xi_2} + \\ + i\gamma \int A^* C d\xi_2 + i\alpha \int A(|A|^2 + 2|C|^2) d\xi_2, \\ vC = i \int k C d\xi_2 + i\frac{\bar{D}}{2} \int \Delta_{\xi_1} C d\xi_2 + iD_2 \frac{\partial C}{\partial \xi_2} + \\ + i\gamma \int A^2 d\xi_2 + 2i\alpha \int C(2|A|^2 + |C|^2) d\xi_2. \end{cases} \quad (5)$$

Задачу (5) будем решать разностным методом в области  $G = \{-L < \xi_1 < L, -L < \xi_2 < L\}$ . Величина  $L$  подбирается экспериментально из соображений сохранения первого инварианта. Далее вводим равномерную сетку с числом узлов  $N \times N$ , а исходные начальные приближения размерности  $N \times N$  представляем в виде вектора размерности  $N^2$ , упорядо-

ченного по столбцам. Далее для системы (5) запишем итерационный процесс:

$$\begin{cases} A_j^{n+1} = A_j^n + \tau \left( i\bar{D} \sum_{k=1}^j \Delta_{\xi_1} A_k^n h_2 + iD_1 \frac{A_j^n - A_{j-1}^n}{h_2} + \right. \\ \left. + i\gamma \sum_{k=1}^j (A_k^n)^* C_k^n h_2 + i\alpha \sum_{k=1}^j A_k^n (|A_k^n|^2 + 2|C_k^n|^2) h_2 \right), \\ C_j^{n+1} = C_j^n + \tau \left( ik \sum_{m=1}^j C_m^n h_2 + i\frac{\bar{D}}{2} \sum_{k=1}^j \Delta_{\xi_1} C_k^n h_2 + \right. \\ \left. + iD_2 \frac{C_j^n - C_{j-1}^n}{h_2} + i\gamma \sum_{k=1}^j (A_k^{n+1})^2 h_2 + \right. \\ \left. + 2i\alpha \sum_{k=1}^j C_k^n (2|A_k^{n+1}|^2 + |C_k^n|^2) h_2 \right), \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\Delta_{\xi} A_j = \frac{1}{h^2} \frac{1}{\xi_j} (\xi_{j+0,5} A_{j+1} - (\xi_{j+0,5} + \xi_{j-0,5}) A_j + \xi_{j-0,5} A_{j-1}),$$

$\bar{A}^0, \bar{C}^0$  – задаются изначально,  $v^{n+1}$  вычисляется по следующей формуле:

$$v^{n+1} = \frac{1}{\tau} \left( \frac{(\bar{A}^{n+1}, \bar{A}^n)}{(\bar{A}^n, \bar{A}^n)} - 1 \right). \quad (7)$$

Итерационный процесс (6) прекращает свою работу, когда будет выполнено условие

$$\left| \frac{v^{n+1} - v^n}{v^n} \right| < \varepsilon.$$

**Результаты расчетов.** В качестве начальных приближений  $\bar{A}^0, \bar{C}^0$  для действительной и комплексной части брались функции вида «домик» (рис. 1) и функция «параллелепипед» (рис. 2) или функция «двойной домик» (рис. 3) для получения солитонного решения второй моды.

Расчеты производились при следующих значениях управляющих параметров:  $D_1 = 0,08$ ,  $D_2 = 0,14$ ,  $\bar{D} = 0,1$ ,  $\alpha = 5$ ,  $\gamma = 20$ . Шаг по пространству  $h_1 = h_2 = 0,02$ , параметр  $\tau$  подбирается экспериментально, в данном случае  $\tau = 10^{-5}$ . Результат работы метода изображен на рис. 4, а распределение фазы волны представлено на рис. 5. Время численного расчета составило 40 минут, число итераций  $n = 2521$ , невязка  $\psi = 0,04$ . Также на рис. 6 приведено солитонное решение второй моды, для которого шаг по пространству был взят  $h_1 = h_2 = 0,01$ , время расчета составило около 5 часов, число итераций  $n = 6725$ , невязка  $\psi = 0,02$ . Стоит отметить, что для получения солитонного решения второй моды можно использовать в качестве начального приближения функцию «двойной параллелепипед».

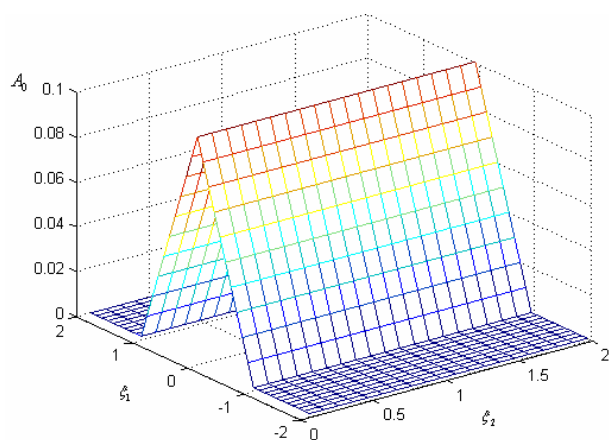


Рис. 1.

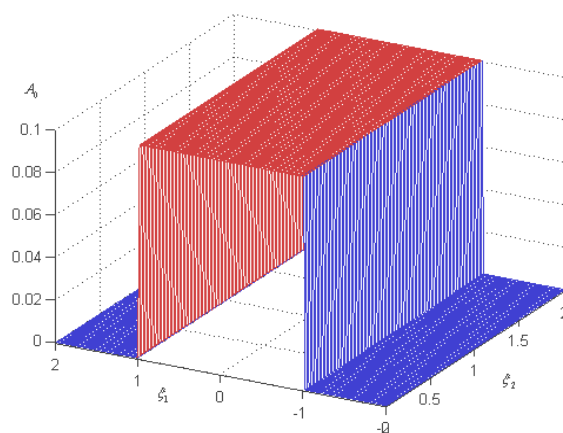


Рис. 2

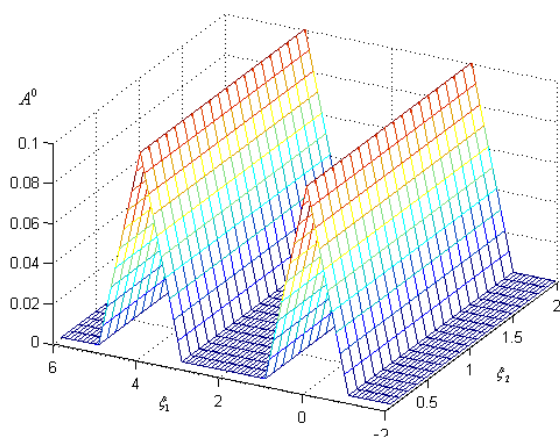


Рис. 3

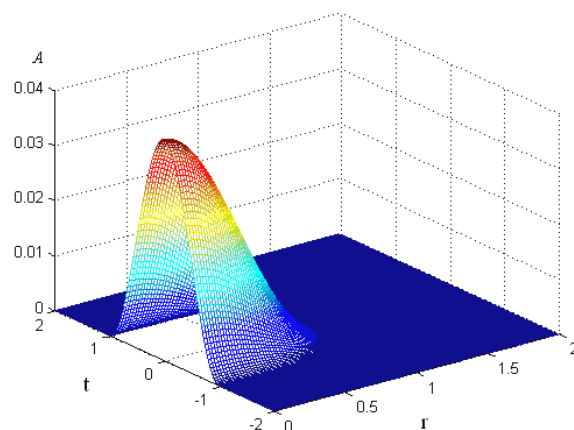


Рис. 4

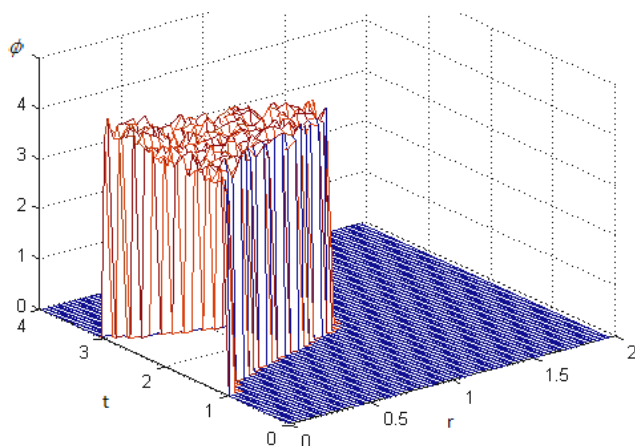


Рис. 5

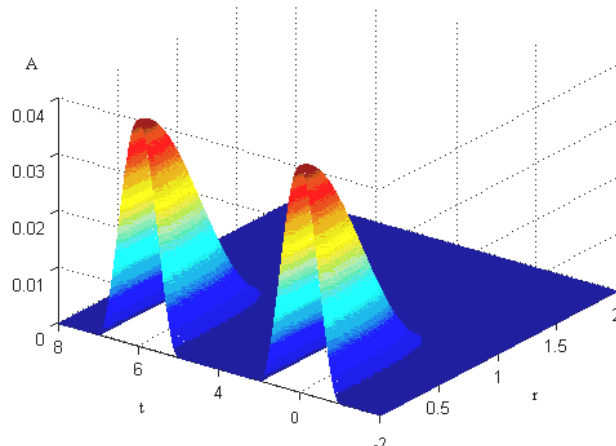


Рис. 6

Дальнейшие численные эксперименты показали, что уменьшение шага по пространству приводит к увеличению времени решения, но и к уменьшению невязки. Также на каждой итерации производится вычисление объема решения, начиная с некоторой итерации, когда солитон сформировался, объем сохраняется до прекращения работы метода, что подтверждает сохранение первого инварианта.

**Использование параллельных вычислительных систем.** Итерационный метод M1 обладает хорошими параллельными свойствами. Исходную дискретную область разбиваем на равные подобласти и рассылаем эти подобласти по процессорам, что позволяет получить почти 100%-й выигрыш в производительности.

Метод M1 был реализован на многопроцессорных компьютерах с использованием программного средства MPI. Решение исходной задачи методом M1 при  $h = 0,01$  на различных машинах дало следующие результаты:

ПК (1 процессор (1 ядро), общая память) – 140 мин.

ПК (2 процессора (4 ядра), общая память) – 45 мин.

Кластер (16 процессоров (32 ядра), разделенная память) – 8 мин.

Из результатов видно, что 100 % выигрыша в производительности не получается, в силу неравномерной загрузки процессоров и времени на пересылки данных между процессорами.

**Обобщение итерационного метода M2 к решению многомерной задачи.** По аналогии с применением метода M1, произведем замену переменных

$$\begin{cases} \xi_1 = r, \\ \xi_2 = t - vz, \end{cases}$$

а полученную систему нелинейных уравнений, используя конечно-разностную аппроксимацию, сведем к системе матричных уравнений вида

$$\begin{cases} v_k \bar{A}_k^{n+1} = P^n(\bar{A}_k^n, \bar{C}_k^n) \bar{A}_k^{n+1}, \\ v_k \bar{C}_k^{n+1} = Q^n(\bar{A}_k^{n+1}, \bar{C}_k^n) \bar{C}_k^{n+1}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $P^n$  и  $Q^n$  – матрицы размерности  $N^2 \times N^2$ , полученные из (6)  $\bar{A}_k^n$  –  $k$ -й собственный вектор длины  $N^2$ ;  $v_k^n$  – соответствующее собственное значение.

Алгоритм M2 для данной системы будет выглядеть следующим образом

- 1) по  $\bar{A}_k^n$  и  $\bar{C}_k^n$  строим матрицу  $P^n$ ;
- 2) находим собственное значение  $v_k^{n+1}$  и собственный вектор  $\bar{A}_k^{n+1}$  матрицы  $P^n$ ;
- 3) по  $\bar{A}_k^{n+1}$  и  $\bar{C}_k^n$  строим матрицу  $Q^n$ ;
- 4) находим собственное значение  $v_k^{n+1}$  и собственный вектор  $\bar{C}_k^{n+1}$  матрицы  $Q^n$ ;
- 5) сравниваем результаты на данной и предыдущей итерациях.

$\bar{A}^0, \bar{C}^0$  – задаются изначально. Метод прекращает свою работу, когда будет выполнено условие

$$|v_k^{n+1} - v_k^n| < \varepsilon.$$

**Результаты расчетов.** В качестве начальных приближений используются функции изображенные на рис. 1 и 2. Расчеты производились при следующих значениях управляющих параметров:  $D_1 = 0,08$ ,  $D_2 = 0,14$ ,  $\bar{D} = 0,1$ ,  $\alpha = 5$ ,  $\gamma = 20$ . Шаг по пространству  $h_1 = h_2 = 0,1$ , параметр  $\tau$  подбирается экспериментально, в данном случае  $\tau = 10^{-5}$ . Результат работы метода изображен на рис. 7. Метод завершил работу за 15 минут, произведя 27 итераций, невязка составила 0.13, распределение фазы волны соответствует рис. 5. Отметим также, что если в ходе итерационного метода M2 рассматривать второе собственное значение и соответствующий ему собственный вектор, то можно получить солитонное решение второй моды, аналогично для  $k$ -й моды.

Таким образом, в настоящей работе предложены два итерационных метода нахождения солитонных решений для системы двух нелинейных уравнений Шредингера, описывающей процесс генерации второй гармоники в среде с кубичным откликом в трехмерной постановке в аксиально-симметричном случае. В отличие от численного метода решения, описанного в [7], который подразумевает некоторые преобразования, обусловленные видом нелинейности, методы M1 и M2 не требуют никаких дополнительных



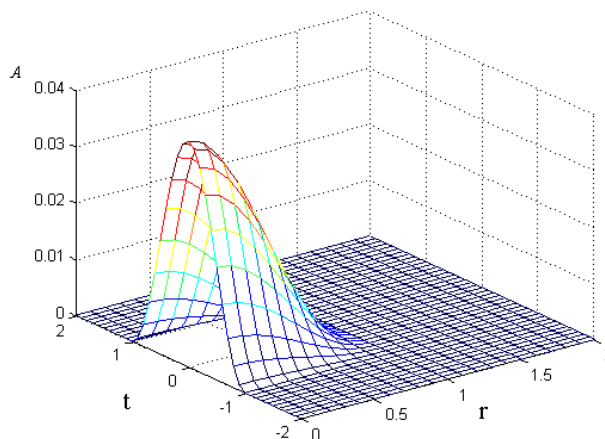


Рис. 7

преобразований и могут быть применимы по стандартной схеме, описанной в [5; 6], что значительно упрощает решение задачи. Особенностью методов М1 и М2 является сходимость к солитонному решению для любых начальных приближений, схожих с описанными выше, что позволяет обойти проблему выбора начального приближения, которую не удастся так легко избежать в работе [7].

Для решений задачи (1) на сетке, предложенной выше с шагом  $h = 0,01$  на ПК, методу М1 требуется около двух часов, а методу, предложенному в [7], требуется более суток. Метод выигрывает в 10 раз на ПК, а если использовать параллельные вычислительные системы, то можно добиться выигрыша в несколько сотен раз. Если учесть, что данную задачу необходимо решать для большого количества значений управляющих параметров  $\alpha, \gamma$ , чтобы найти область существования солитонных решений, то метод М1 с использованием параллельных вычислительных систем позволит найти область за несколько дней, в зависимости от области и шага.

В заключение отметим, что предлагаемые методы М1 и М2 можно успешно использовать при математическом моделировании оптических компьютеров. Возникающие при определенных значениях управляющих параметров солитонные решения, сохраняющие форму, соответствует сохранению формы сигнала [4]. Отсутствие солитонного решения (нарушение сходимости методов) соответствует потере сигнала, т. е. сбою передачи данных в оптическом компьютере.

#### Библиографические ссылки

1. Brull L., Lange H. Stationary, oscillatory and solitary wave type solution of singular nonlinear Schrodinger equations // *Math. Meth. in Appl. Sci.* 1986. Vol. 8, № 4. P. 559–575.
2. Rozanov N. N., Fedorov S. V., Shatsev A. N. Incoherent weak coupling of laser solitons // *Optics & Spectroscopy*. 2007. Vol. 102, № 1. P. 83–85.

3. Кернер Б. С., Осипов В. В. Автосолитоны. М. : Наука, 1991.

4. Кившарь Ю. С., Агравал Г. П. Оптические солитоны. М. : Физматлит, 2005. С. 622–634.

5. Лапонин В. С., Савенкова Н. П., Ильютко В. П. Численный метод поиска солитонных решений // *Прикладная математика и информатика* : сб. фак. ВМК. 2011. № 38. С. 69–80.

6. Дорохова Т. В., Савенкова Н. П., Трофимов В. А. Численное моделирование солитонных решений в задаче распространения фемтосекундного импульса в среде с кубической нелинейностью // *Прикл. математика и информатика* : сб. фак. ВМК. 1999. № 2. С. 63–68.

7. Матусевич О. В., Трофимов В. А. Численный метод нахождения 3D-солитонов нелинейного уравнения Шредингера в аксиально-симметричном случае // *Журн. вычисл. математики и мат. физики*. 2009. Т. 49, № 11. С. 1–12.

#### Referens

1. Brull L., Lange H. Stationary, oscillatory and solitary wave type solution of singular nonlinear Schrodinger equations. *Math. Meth. in Appl. Sci.* 1986, vol. 8, № 4, pp. 559–575.
2. Rozanov N. N., Fedorov S. V., Shatsev A. N. Incoherent weak coupling of laser solitons // *Optics & Spectroscopy*. 2007, vol. 102, № 1, pp. 83–85.
3. Kerner B. S., Osipov V. V. *Avtosolitony* (Autosolitons). Moscow, Nauka, 1991.
4. Kivshar Yu. S., Agraval G. P. *Opticheskiye solitony* (Optical solitons). Moscow, Fizmatlit, 2005, pp. 622–634.
5. Laponin V. S., Savenkova N. P., Ilyutko V. P. *Prikladnaya matematika i informatika*. 2011, № 38, pp. 69–80.
6. Dorokhova T. V., Savenkova N. P., Trofimov V. A. *Prikladnaya matematika i informatika*. 1999, № 2, pp. 63–68.
7. Matusevich O. V., Trofimov V. A. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*. 2009, vol. 49, № 11, pp. 1–12.

© Савенкова Н. П., Лапонин В. С., 2013

С. И. Сенашов<sup>1</sup>, Н. Ю. Юферова<sup>2</sup>

### АКТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ НЕДВИЖИМОСТИ В КРАСНОЯРСКЕ

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sen@mail.sibsau.ru

<sup>2</sup>Сибирский государственный технологический университет  
Россия, 660049, Красноярск, просп. Мира, 82. E-mail: NadinYu@yandex.ru

*Моделируется стоимость однокомнатных квартир в Красноярске. Показано, что построенные модели адекватно описывают стоимость жилья. Решена актуальная задача, которая позволяет рассчитывать налог на жилье на основе адекватных моделей. Модели построены для нескольких периодов: 1998, 1999, 2010, 2012 и 2013 гг. Изучена динамика изменения цен на жилье. Прослеживается изменение влияния различных факторов на стоимость недвижимости. Введены индикаторы, которые показывают состояние рынка недвижимости. Одним из таких индикаторов является нормальность распределения цен на недвижимость. Показано как изменяется этот индикатор в кризисные, послекризисные и стабильные годы.*

*Ключевые слова: эконометрические модели, стоимость жилья, индикаторы, нормальное распределение.*

### SIMULATION OF CURRENT PROPERTY VALUE IN KRASNOYARSK

S. I. Senashov<sup>1</sup>, N. Y. Yuferova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sen@sibsau.ru

<sup>2</sup>Sibirsky State Technological University  
82 Mira prosp., Krasnoyarsk, 660049, Russia. E-mail: NadinYu@yandex.ru

*The authors present the modeling of the cost of one-bedroom apartments in Krasnoyarsk and show that these models adequately describe the cost of housing. They solve the actual problem which allows to calculate the tax on housing on the basis of adequate models. The models are constructed for several periods: 1998, 1999, 2010, 2012 and 2013. The dynamics of changes in house prices is investigated. The change in the effect of various factors influence on the value of the property is traced. The indicators that show the state of the residential real estate market are introduced. One of such indicators is the normality of distribution of the real estate prices. It is shown how the indicator changed in crisis, after crisis and stable years.*

*Keywords: econometric models, cost of housing, indicators, normal distribution.*

С 2014 г. Минэкономразвития РФ предлагает обложить недвижимость граждан налогом, рассчитанным по ее рыночной стоимости. В газете «Коммерсант» опубликован проект приказа об утверждении нового порядка расчета инвентаризационной стоимости недвижимости физических лиц [1].

Сейчас стоимость жилья определяется государственной службой оценки недвижимости – бюро технической инвентаризации (БТИ). В отличие от рыночной стоимости инвентаризационная стоимость рассчитывается на основе восстановительной стоимости жилого здания, показателей физического износа здания и коэффициента дифференциации объектов.

По новому порядку, цена домов и квартир, из которой будет исчисляться нынешний налог на имущество, составит 3 % от их рыночной кадастровой стоимости.

При создавшихся условиях возникает вопрос о методике расчета кадастровой стоимости объектов недвижимости. В данном исследовании предложены методики расчета рыночной стоимости квартир на ос-

нове эконометрических моделей. Объект исследования – рынок однокомнатных квартир Красноярска. Предмет исследования – рыночная стоимость объектов недвижимости Красноярска.

Более 10 лет назад авторами статьи уже был проведен анализ ситуации на рынке жилых объектов Красноярска [2]. По результатам исследования были выявлены основные ценообразующие факторы на рынке однокомнатных квартир; выявлены индикаторы проявления кризисной ситуации на рынке недвижимости; предложены интегральные коэффициенты престижности каждого из районов Красноярска, учитывающие фактор местоположения жилого объекта в оценочной модели; предложены адекватные регрессионные модели для оценки стоимости объектов недвижимости.

В данной статье авторы поставили перед собой следующие задачи:

– установить, работают ли предложенные ранее индикаторы проявления кризисной ситуации на рынке недвижимости в современных условиях;

– выяснить возможности использования коэффициентов престижности районов Красноярска в эконометрических моделях, созданных в условиях текущей ситуации на рынке недвижимости;

– построить адекватные регрессионные модели для определения рыночной кадастровой стоимости однокомнатных квартир.

Одним из индикаторов проявления кризисной ситуации на рынке недвижимости был следующий: характер распределения стоимости жилых объектов в кризисный период значительно отличается от нормального. Был проведен анализ закономерностей распределения стоимости недвижимости для трех периодов (рис. 1–3): 1) до 17 августа 1998 г.; 2) после 17 августа 1998 г.; 3) 1999 г.; построены графики эмпирических и теоретических частот нормального распределения и рассчитаны критерии согласия Пирсона ( $\chi^2$ ), Колмогорова ( $c$ ) и Романовского ( $\lambda$ ) для проверки гипотезы о нормальном распределении

стоимости недвижимости. Объем выборки – около 3 000 жилых объектов.

Расчеты критериев согласия и график частот для данных докризисного периода (рис. 1) указали на выполнение гипотезы о нормальном распределении стоимости однокомнатных квартир. В кризисном периоде наблюдается существенное расхождение между эмпирическими частотами и частотами нормального распределения (рис. 2). Это связано с резкими изменениями, произошедшими в это время на рынке недвижимости: несбалансированностью спроса и предложения, хаотичным поведением продавцов и покупателей объектов недвижимости, кризисом банковской системы и т. д. Анализ цен посткризисного периода показал наличие нормального распределения стоимости недвижимости Красноярска (рис. 3). Исследователи ситуации, возникшей на рынке недвижимости России после 17 августа 1998 г., также отмечают, что уже в начале 1999 г. наблюдается стабилизация цен на жилье.



Рис. 1. Распределение стоимости однокомнатных квартир в докризисный период (до 17 августа 1998 г.)



Рис. 2. Распределение стоимости однокомнатных квартир в кризисный период (после 17 августа 1998 г.)



Рис. 3. Распределение стоимости однокомнатных квартир в посткризисный период (1999 г.)

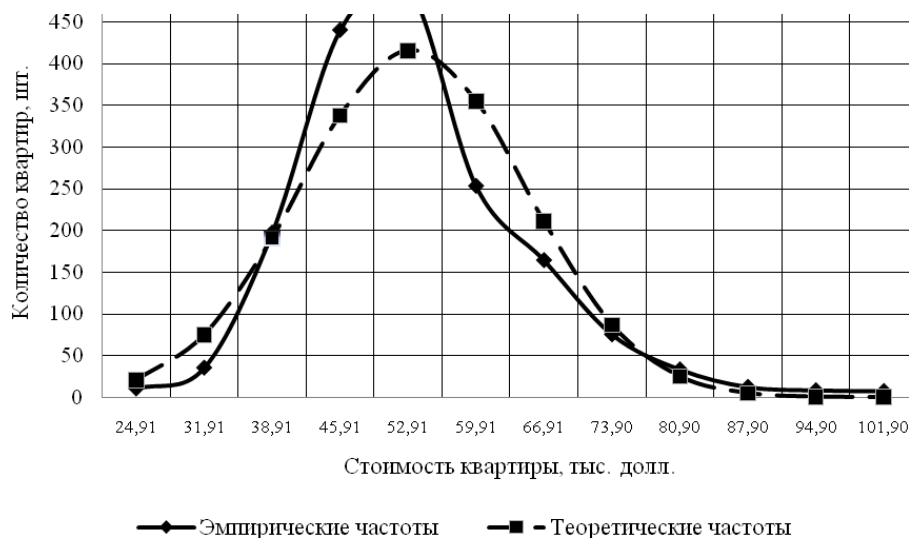


Рис. 4. Распределение стоимости однокомнатных квартир в 2009 г.

Таким образом, мы выявили, что характер распределения стоимости жилых объектов изменяется под влиянием внешних факторов, воздействующих на рынок жилой недвижимости. Можно предположить, что изменение характера распределения явления может указывать на появление кризисной ситуации и также является ее индикатором.

Одной из наших задач является проверка работоспособности выявленного индикатора в современных условиях. Для решения поставленной задачи была сформирована новая база данных однокомнатных квартир Красноярска. Каждая запись базы данных (квартира) содержит следующие параметры: 1) район; 2) общая площадь квартиры; 3) жилая площадь квартиры; 4) площадь кухни; 5) этаж; 6) материал постройки; 7) планировка квартиры.

В базу данных были включены жилые объекты, выставленные на продажу в 2009, 2010, и 2013 гг. Объем выборки составил около 3 500 жилых объектов.

На основе имеющейся информации были построены графики распределения стоимости объектов недвижимости (рис. 4–6) и рассчитаны критерии проверки гипотезы о нормальном распределении: модифицированный критерий Колмогорова, критерий Крамера–Мизеса, критерий Андерсона–Дарлинга, критерий коэффициента асимметрии и критерий эксцесса.

По данным аналитиков Российской гильдии риелторов, состояние рынка жилья в России в 2009 г. подобно остальным секторам экономики определялось весьма негативной динамикой макроэкономических и финансовых показателей, которая набрала силу еще с осени 2008 г. [3]. График распределения рыночной стоимости квартир и рассчитанные критерии проверки подтверждают высказывания аналитиков об острой ситуации на рынке недвижимости городов РФ, представленной на рис. 4.

В 2010 г. системных изменений рыночной ситуации к лучшему в части предложения в течение двух лет

с начала кризиса не произошло [4]. Рынок недвижимости вновь реагирует на данную ситуацию отсутствием нормального распределения стоимости квартир (рис. 5).

Аналитики утверждают, что рынок недвижимости России в 2013 г. может столкнуться с очередной фазой кризиса, если его не поддержат иностранные инвестиции, и прогнозируют снижение сделок с недвижимостью на национальном рынке на 8–10 % – до 7,6 млрд долл. в сравнении с 8,6 млрд долл. в 2012 г. [4].

Для анализа распределения стоимости недвижимости в 2013 г. была использована выборка размером 400 жилых объектов. График распределения представлен на рис. 6.

Результаты расчетов на данном этапе подтверждают прогнозы аналитиков: гипотеза о нормальном распределении рыночной стоимости недвижимости отвергается.

Таким образом, выявленный индикатор проявления кризисной ситуации на рынке недвижимости оказывается работоспособным и в современных условиях.

Для решения следующих задач исследования были выполнены некоторые преобразования базы данных. С помощью метода экспертных оценок все качественные параметры (материал стен, планировка, этаж) были переведены в количественные. На основе матрицы фиктивных переменных были рассчитаны коэффициенты престижности районов Красноярска и составлена карта с указанием ранга каждого района [2; 5].

Для трех указанных периодов 1998–1999 гг., на основе выборки из базы данных размером более 3 000 записей, были построены линейные (аддитивные) регрессионные модели. Результаты сведены в таблицу.

Для проверки качества моделей была оценена значимость оценок параметров уравнения регрессии с помощью критерия Стьюдента, рассчитаны  $F$ -статистики, коэффициенты детерминации и осуществлена проверка на соответствие остатков условиям Гаусса–Маркова.

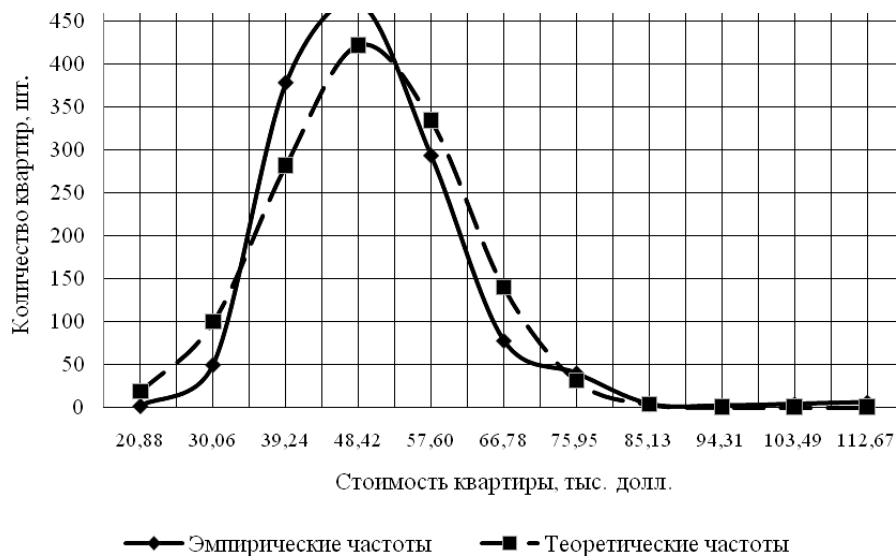


Рис. 5. Распределение стоимости однокомнатных квартир в 2010 г.

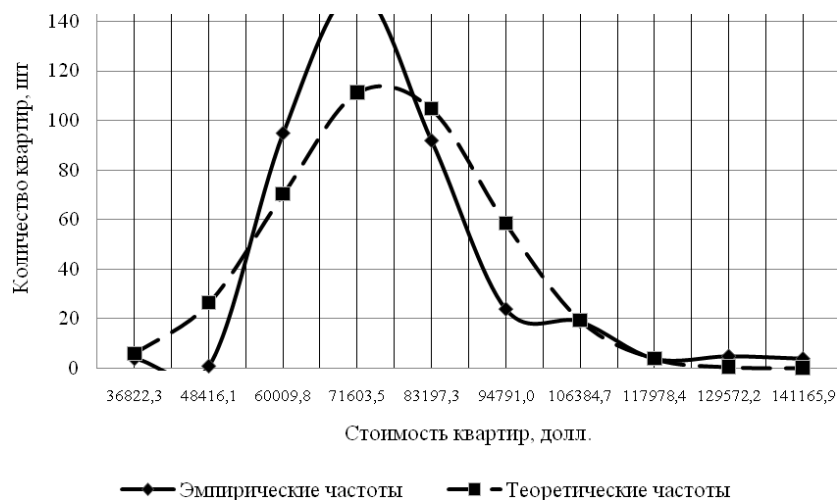


Рис. 6. Распределение стоимости однокомнатных квартир в 2013 г.

## Результаты моделирования

|                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Модель докризисного периода (до 17 августа 1998 г.)  | $S = 3,84 + 0,84X_1 + 0,09X_2 + 0,13X_3 + 0,17X_4 + 0,46X_5 + 0,29X_6 + 0,3X_7$ ,<br>где $S$ – цена квартиры; $X_1$ – район; $X_2$ – общая площадь квартиры; $X_3$ – жилая площадь; $X_4$ – площадь кухни; $X_5$ – этаж; $X_6$ – материал постройки; $X_7$ – планировка |
| Модель кризисного периода (после 17 августа 1998 г.) | $S = 3,31 + 0,33X_1 + 0,45X_5$                                                                                                                                                                                                                                          |
| Модель посткризисного периода (1999 г.)              | $S = 1,35 + 0,35X_1 + 0,047X_2 + 0,082X_3 + 0,11X_4 + 0,37X_5 + 0,26X_6 + 0,24X_7$                                                                                                                                                                                      |
| Модель 2009 г.                                       | $S = 14,096 + 1,01X_1 + 0,74X_2 + 0,75X_4 + 0,36X_6 - 0,78X_7$                                                                                                                                                                                                          |
| Модель 2010 г.                                       | $S = 0,21 + 0,92X_1 + 1,22X_2 - 0,13X_5 + 0,099X_7$                                                                                                                                                                                                                     |
| Модель 2013 г.                                       | $S = -1,69 + 2,15X_1 + 0,67X_2 + 1,51X_3 + 1,79X_4 - 0,54X_5 - 0,72X_6 - 0,24X_7$                                                                                                                                                                                       |

В ходе исследования обнаружено, что модели докризисного и посткризисного периодов являются адекватными, содержат только значимые переменные, их оценки параметров являются несмещенными, эффективными и состоятельными, т. е. обладают свойствами наилучших линейных оценок, и степень аппроксимации их довольно высока ( $R^2 = 0,81$  и  $R^2 = 0,85$  соответственно). Наиболее значимыми переменными являются район, общая площадь и жилая площадь квартиры.

При анализе модели кризисного периода выявлено следующее: 1) значимыми являются только коэффициенты при переменных района и этажа; 2) модель неадекватна опытным данным, а связь между ценой квартиры и предложенными факторами – несущественна; 3) остатки не удовлетворяют условиям Гаусса–Маркова, т. е. оценки параметров уравнения регрессии – смещенные, неэффективные и несостоятельные; 4) степень аппроксимации низкая ( $R^2 = 0,21$ ). Следовательно, в условиях кризиса невозможно построить адекватную регрессионную модель определения стоимости недвижимости.

Далее для сравнительной оценки авторами были построены линейные модели определения стоимости недвижимости на основе информации об однокомнатных квартирах, выставленных на продажу в 2009, 2010 и 2013 гг. (см. таблицу). Выборка составила более 3 500 наблюдений. Для каждой модели были рассчитаны  $t$ -статистики, критерий Фишера, коэффициент детерминации и проверена гипотеза на наличие гетероскедастичности с помощью теста Голдфелда–Кванда.

Во всех трех актуальных моделях коэффициент при переменной района является одним из самых значимых. Следовательно, несмотря на то что многие районы Красноярска изменили свою инфраструктуру, разработанная авторами таблица рангов престижности районов города остается работоспособной и актуальной в современных условиях. Остается значимым во всех актуальных моделях и параметр общей площади на фоне периодической изменчивости  $t$ -статистик других факторов (жилой площади, площади кухни, планировки, этажа). Возможно, это объясняется тем, что покупатели небольших квартир очень часто делают перепланировку жилья или уже покупают квартиры с так называемой индивидуальной планировкой, и их не интересуют размеры кухни и жилой площади.

Низкий коэффициент детерминации для модели 2009 г. ( $R^2 = 0,36$ ), на примере моделей 1998–1999 гг., свидетельствует об острой кризисной ситуации на рынке недвижимости. В 2010 и 2013 гг. степень аппроксимации значительно возросла ( $R^2 = 0,75$  и  $R^2 = 0,87$  соответственно), что говорит о том, что рынок вторичного жилья начал стабилизироваться. Расчеты  $F$ -статистики и проведение теста Голдфелда–Кванда показали, что представленные модели адекватны опытным данным и их оценки обладают свойствами наилучших линейных оценок. Данные расчетов показали, что как в условиях кризиса, так и в условиях стабилизационной фазы рынка недвижимости, актуальные модели пригодны для определения рыночной стоимости недвижимости.

Таким образом, в результате исследования решены следующие задачи:

- установлена работоспособность одного из индикаторов проявления кризисной ситуации на рынке недвижимости в современных условиях;
- коэффициенты «престижности» районов Красноярска имеют актуальное применение при построении моделей массовой оценки недвижимости;
- построенные аддитивные адекватные модели применимы для оценки рыночной стоимости вторичного жилья в целях налогообложения.

## Библиографические ссылки

1. Вислогузов В. Минэкономики пустило в ход кадастр // Коммерсант. 2012. № 217 (5002).
2. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Грошак Е. В. Моделирование стоимости жилья в Красноярске: монография / Сиб. гос. технол. ун-т. Красноярск, 2007.
3. Мальгинов Г. Н., Стерник Г. М. Российский рынок жилья в 2009 году: от кризисного падения к стагнации // Рос. экономика в 2009 г. Тенденции и перспективы. М.: ИЭПП. 2010. Вып. 31.
4. Стерник Г. М. Российский рынок жилья в 2011 г.: затянувшееся оживление [Электронный ресурс]. URL: <http://realtymarket.ru/analiti-eskie-materiali/> (дата обращения: 13.04.2013).
5. Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., Сурнина Е. В.. Информационная система оценки стоимости квартир на вторичном рынке жилья как инструмент управления инвестициями // Вестник СибГАУ. 2009. № 4 (25). С. 219–223.

## References

1. Visloguzov V. *Kommersant*. 2012. № 217 (5002).
2. Senashov S. I., Juferova N. Ju., Groshak E. V. *Modelirovanie stoimosti zhil'ja v Krasnojarske* (Modeling the cost of housing in the city of Krasnoyarsk). SibGTU. 2007, 204 p.
3. Senashov S. I., Juferova N. Ju., Surnina E. V. *Vestnik SibGAU*. 2009, № 4 (25), pp. 219–223.
4. Malginov G. N., Sternik G. M. *Rossijskaja jekonomika v 2009 godu. Tendencii i perspektivy*. Moscow, JePP, 2010, vol. 31.
5. Sternik G. M. *Rossijskij rynek zhil'ja v 2011 godu: zatjamvsheesja ozhivlenie* (Russian Housing Market in 2011: a prolonged recovery). Available at: <http://realtymarket.ru/analiti-eskie-materiali/>.

© Сенашов С. И., Юферова Н. Ю., 2013

УДК 621.391.8

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ OFDM В ТРОПОСФЕРНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ, СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

А. Ю. Строкова<sup>1</sup>, А. Н. Фролов<sup>1</sup>, А. М. Алешечкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь»

Россия, 660021, Красноярск, ул. Декабристов, 19. E-mail:Strokovaaloyna@mail.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail:AAleshechkin@sfu-kras.ru

*В настоящее время метод OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) набирает все большую популярность. Это основной из возможных методов для использования в будущих беспроводных сотовых системах, подобных 4G, а также данный метод стал популярен в использовании в современном цифровом радио- и телевидении. В связи с этим в настоящей работе рассмотрена целесообразность и эффективность использования OFDM в системах тропосферной связи, а также рассмотрены способы повышения помехоустойчивости таких систем. Показано, что в результате применения метода OFDM и псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ), что ранее не было использовано в тропосферных станциях связи (TPC), можно добиться уменьшения влияния быстрых замираний, увеличить показатели качества помехоустойчивости и скорость передачи информации.*

*Ключевые слова:* связь, модуляция, разделение каналов, помехоустойчивость, качество, каналы связи.

## EFFICIENCY OF USE OFDM IN THE TROPOSCATTER COMMUNICATION CHANNEL, WAYS OF NOISE STABILITY RISE

A. Yu. Strokova<sup>1</sup>, A. N. Frolov<sup>1</sup>, A. M. Aleshechkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC “Scientific production enterprise “Radiosvaz”

19 Dekabristov st. Krasnoyarsk, 660021, Russia. E-mail: Strokovaaloyna@mail.ru

<sup>2</sup>Siberian Federal University

79 Svobodny prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: aleshechkin.andrej@yandex.ru

*Today the OFDM method (orthogonal frequency-division multiplexing) gains the increasing popularity. It is basic of possible methods for use in the future wireless cellular systems similar 4G. Also the given method became popular in use in modern digital radio – and telecasting. In this case, in the present work the expediency and efficiency of use OFDM in the troposcatter communication systems are observed, and also ways of noise stability rise of such systems. It is shown that as a result of application OFDM – method and pseudo – casual operating frequency readjustment (PROF), that has not been used earlier in the troposcatter communication stations (TCS), it is possible to achieve decrease influence of short-term fading, to increase the quality indices of noise stability and speed of information transfer.*

*Keywords:* communication, modulation, frequency division, a noise stability, quality, communication channels.

Впервые метод модуляции на нескольких несущих был использован в военных высокочастотных радио-приемниках в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого столетия. Начиная с 90-х годов, модуляция на нескольких несущих стала использоваться во множестве различных проводных и беспроводных систем связи,

включая цифровое радио- и телевидение в Европе, цифровые абонентские линии DSL (digital subscriber line) с использованием дискретных многочастотных сигналов и в самом последнем поколении беспроводных локальных сетей [1].

К основным достоинствам OFDM относятся:

- устойчивость к многолучевым замираниям;
- противостояние межсимвольным помехам и интерференции между поднесущими;
- высокая спектральная эффективность;
- возможность увеличения пропускной способности;
- возможность применения различных схем модуляции для каждой поднесущей, что позволяет адаптивно варьировать помехоустойчивость и скорость передачи информации (повышению и анализу помехоустойчивости при передаче и приеме OFDM сигнала посвящено много работ, например, такие как [2–4]).

Благодаря вышеперечисленным положительным характеристикам, OFDM нашло свое применение в широко известных стандартах связи таких как LTE (Long-Term Evolution) – стандарт нового поколения беспроводной сотовой связи и DVB – стандарт цифрового телевидения (DVB – это набор спецификаций, охватывающий кабельное DVB-C (cable), спутниковое DVB-S (satellite) и наземное DVB-T (terrestrial) вещание). Известны работы, посвященные использованию OFDM в системах Wi-MAX, Wi-Fi, LTE и др. [5–8].

Необходимость в использовании метода OFDM в тропосферном канале связи, обусловлена особенностями распространения сигнала при его прохождении через слои тропосферы. К таким особенностям можно отнести замирания сигнала, обусловленные интерференцией нескольких волн, пришедших в точку приема с разным временем задержки.

Известно устройство модуляции-демодуляции тропосферной станции [9], в котором описан способ увеличения скорости передачи дискретной информации за счет выполнения блоков модулятора и демодулятора устройства многоканальными и обеспечения уплотнения линии с последующим объединением каналов в единый групповой поток. Однако данное устройство не обеспечивает борьбы с быстрыми замираниями [10] в тропосферном канале связи, которые могут существенно снизить качество передаваемой информации, вплоть до полной потери связи. Следовательно, цель данной работы – анализ эффективности использования OFDM в тропосферном канале связи и возможности повышения качества помехоустойчивости.

Основная идея, лежащая в основе метода модуляции OFDM – это разбиение цифрового потока с большей скоростью передачи информации  $R$  на несколько цифровых потоков (поднесущих) с меньшей скоростью  $R/n$ . Поднесущие между собой ортогональны, каждая поднесущая передается в своем частотном канале (на своей несущей частоте). Эта особенность определяет многие положительные качества технологии OFDM, указанные выше. Для наглядного представления на рис. 1, *а* изображен спектр одной поднесущей OFDM-сигнала, на рис. 1, *б* изображен спектр OFDM-сигнала в целом. Следовательно, спектральная плотность одного OFDM-символа есть сумма спектров всех поднесущих колебаний, например, на рис. 2 изображена спектральная плотность мощности OFDM-сигнала при 16 поднесущих колебаниях.

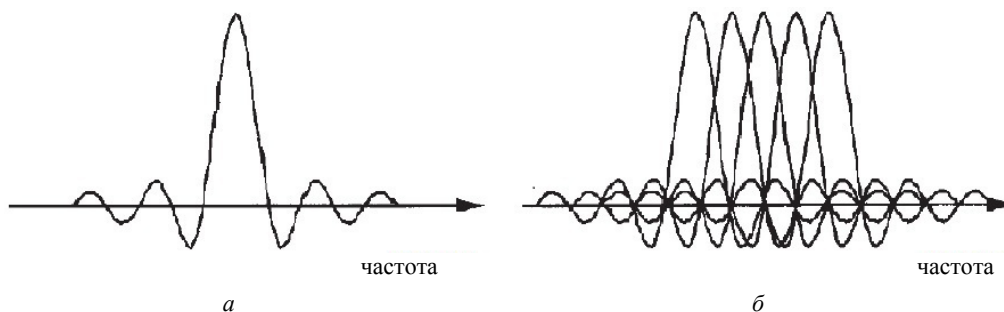


Рис. 1. Спектр одной поднесущей OFDM сигнала (*а*) и спектр OFDM сигнала (*б*)

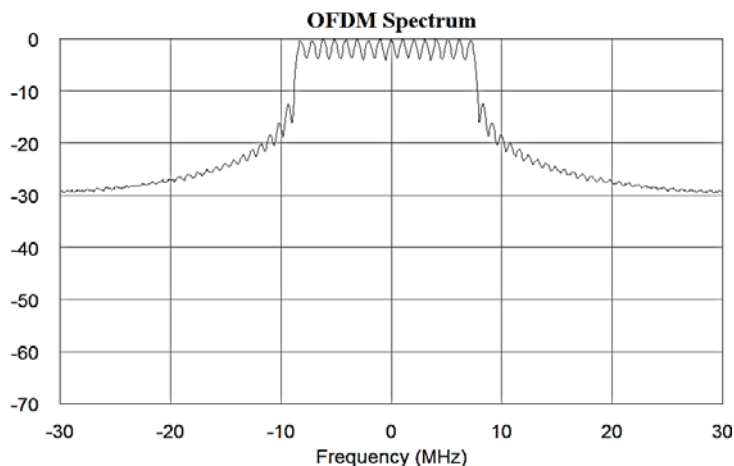


Рис. 2. Спектральная плотность мощности OFDM-сигнала при 16 поднесущих колебаний



Ортогональность цифровых потоков обеспечивается благодаря использованию циклического префикса (защитного интервала), являющегося копией окончания сигнала, размещенного впереди, что помогает избежать межсимвольной интерференции.

Важным путем достижения требуемой помехозащищенности тропосферных линий связи при воздействии преднамеренных помех является использование сигналов с ППРЧ.

Интенсивное развитие метода ППРЧ и его применение началось с 1941 г., что подробно описано в [11].

Для более эффективной борьбы с быстрыми замираниями сигнала и увеличения показателя качества помехоустойчивости предлагается использовать псевдослучайную перестройку рабочей OFDM-полосы.

Суть данного метода состоит в расширении спектра, при котором сигнал занимает полосу частот более широкую по сравнению с полосой, минимально необходимой для передачи информации. Расширение спектра обеспечивается путем скачкообразного изменения несущих частот в выделенном для работы диапазоне. Под скачкообразным изменением частот следует понимать периодическую перестройку нескольких частот, используемых для передачи сигнала [11]. Число перестраиваемых частот и порядок их чередования определяется алгоритмом перестройки, который известен приемнику и передатчику.

Минимальный шаг перестройки частот должен выбираться исходя из условия обеспечения отсутствия взаимной корреляции между сигналами соседних частот [12]. Для достижения максимального эффекта от псевдослучайной перестройки рабочей OFDM-полосы, скорость перестройки должна на порядок превышать частоту быстрых замираний, частота быстрых замираний описана в [13].

Использование режима ППРЧ позволяет увеличить помехоустойчивость связи. Если помехой поражена часть имеющегося диапазона, действие помехи будет только в течение того времени, когда сигнал по закону псевдослучайной перестройки попадает в пораженную полосу частот. Также для борьбы со случайными битовыми ошибками используется помехоустойчивое канальное кодирование, основанное на внесении дополнительной избыточности в передаваемый цифровой поток на стороне кодера с последующей коррекцией возникших в канале ошибок на стороне декодера. Для более эффективной защиты от возникновения ошибок при передаче символов на передающей стороне осуществляется так называемое перемежение, при котором каждый символ кодового пакета передается по отдельному частотному каналу. Перемежение превращает сигнал во временной области в бесструктурную форму, что позволяет бороться с быстрыми замираниями, а также затрудняет создание оптимальных помех. С целью восстановления исходного порядка символов на приемной стороне требуется операция деперемежения символов. Следовательно, применение кодирования и декодирования, перемежения и деперемежения символов как с медленной, так и быстрой перестройкой частоты

позволяет корректировать пакеты ошибок, вызываемых импульсными помехами на отдельных участках диапазона частот тропосферной радиосвязи.

Величина выигрыша в отношении сигнал/помеха  $G$ , при воздействии, например гармонической помехи, определяется коэффициентом расширения спектра используемого сигнала, определяемого как отношение полосы частот, используемых ТРС  $\Delta F$  к информационной полосе частот сигнала  $\Delta f_{\text{инф}}$  [14; 15]:

$$G = \Delta F / \Delta f_{\text{инф}}.$$

Например, при значениях полосы частот ТРС  $\Delta F = 600$  МГц и скорости передачи сообщений 2 048 кбит/с ( $\Delta f_{\text{инф}} = 2,048$  МГц), коэффициент расширения спектра составляет  $600/2,048 = 292$ , или около 23 дБ. Следовательно, выигрыш в отношении сигнал/помеха будет составлять 23 дБ.

Использование OFDM и ППРЧ в тропосферной связи более эффективно в условиях быстрых замираний по сравнению с классическими методами обработки сигналов (кратность принимаемых копий сигнала за счет частотного, пространственного и других способов разнесения сигнала) благодаря хорошему противостоянию межсимвольным помехам и интерференции между поднесущими, а также благодаря обеспечению необходимой степени помехоустойчивости, при этом происходит уменьшение влияния задержки сигналов при прохождении через тропосферный канал связи, что позволяет обеспечить максимальную скорость передачи информации.

Внедрение предложенных методов обработки и формирования сигналов позволит создать тропосферные станции связи качественно нового уровня.

### Библиографические ссылки

1. Голдсмит А. Мир радиоэлектроники. Беспроводные коммуникации / пер. с англ. Н. Л. Бирюкова, Н. Р. Триски; под ред. В. А. Березовского. М.: Техносфера, 2011.
2. RU 2336651, C2, МПК Н 04 L 27/26, опубл. 20.10.2008.
3. Повышение помехоустойчивости при передаче информации по OFDM-каналу в сложной помеховой обстановке / Андрианов М. Н. и др. // Электросвязь. 2010. № 7. С. 38–41.
4. Адаптивный разнесенный прием сигналов OFDM / Фалько А. И. и др. // Радиотехника. 2011. № 11. С. 13–19.
5. Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX путь к 4G. М.: Техносфера, 2009.
6. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневский и др. М.: Техносфера, 2005.
7. Вишневский В. М., Красилов А., Шахнович И. В. Технология сотовой связи LTE – почти 4G // Электроника: Н.Т.Б. 2009. № 1. С. 62–72.
8. Hermann Rohling. OFDM. Concepts for Future Communication Systems. Berlin: Springer, 2011. P. 268.

9. RU 2368062, C1, МПК Н 03 С 1/50, опубл. 20.09.2009.

10. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. 2-е изд., испр. и доп. М. : Сов. радио, 1970.

11. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов и др. М. : Радио и связь, 2000.

12. Давыденко Ю. И. Дальняя тропосферная связь. М. : Военное изд-во М-ва обороны СССР, 1968.

13. Дальняя тропосферная радиосвязь / И.А. Гусятинский и др. М. : Связь, 1968.

14. Диксон Р. К. Широкополосные системы. Выигрыш при обработке и запас помехоустойчивости / пер. с англ. под ред. В. И. Журавлева. М. : Связь, 1979. Гл. 1. С. 13–16.

15. Nard G. Geoloc: Spread spectrum concept applied in new accurate medium-long range radiopositioning system. France : Sercel, 1984. P. 18.

### References

1. Goldsmith A. *Besprovodnie kommunikatsii* (Wireless communications). Moscow, Tehnosfera, 2011. 904 p.

2. RU 2336651, C2, IPC Н 04 L 27/26, published 20.10.2008.

3. Andrianov M. N. et al. *Elektrosviaz*, 2010, № 7, pp. 38–41.

4. Falko A. I. et al. *Radiotekhnika*, 2011, № 11, pp. 13–19.

5. Vishnevskiy V. M., Portnoy S. L., Shahnovich I. V. *Entsiclopedia WiMAX put k 4G*. Moscow, Tehnosfera, 2009, 472 p.

6. Vishnevskiy V. M. et al. *Shirikopolosnie besprovodnie seti peredachi danih*. Moscow, Tehnosfera, 2005, 591 p.

7. Vishnevskiy V. M., Krasilov A., Shahnovich I. V. *Tehnologiya sotovoy svyazi LTE – pochti 4G*. Elektronika, N.T.B, 2009, № 1, pp. 62–72.

8. Hermann Rohling. OFDM. Concepts for Future Communication Systems. Berlin, Springer, 2011. 268 p.

9. RU 2368062, C1, IPC Н 03 С 1/50, published 20.09.2009.

10. Fink L. M. *Teoriya peredachi diskretnih soobcheniy*. Moscow, Sovetskoe radio, 1970, 728 p.

11. Borisov V. I. et al. *Pomehozashishennost system radiosvazi s rashireniem spectra signalov metodom psevdosluchaynoy perestroyki rabochey chastoti*. Moscow, Radio i sviaz, 2000, 384 p.

12. Davidenko Yu. I. *Dalniaya troposfernaya sviaz*. Moscow, Voennoe izdatelstvo Ministerstva Oboroni SSSR, 1968, 212 p.

13. Gusiatskiy I. A. et al. *Dalniaya troposfernaya sviaz*. Moscow, Sviaz, 1968, 248 p.

14. Dikson R. K. *Shirokopolosnie sistemi. Vygrish pri obrabotke i zapas pomehoustoychivosti*. Moscow, Sviaz, 1979, pp. 13–16.

15. Nard, G. Geoloc: Spread spectrum concept applied in new accurate medium-long range radiopositioning system. France, Sercel, 1984, 18 p.

© Строкова А. Ю., Фролов А. Н., Алешечкин А. М., 2013

УДК 62-97/-98

### АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ\*

А. А. Ступина<sup>1</sup>, А. А. Шигина<sup>2</sup>, А. О. Шигин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: saa55@rambler.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Россия, 660025, Красноярск, пер. Вузовский, 3. E-mail: shigina\_a@mail.ru, shigin27@rambler.ru.

Для оценки эффективности функционирования бурового станка необходимо рассматривать множество структурно взаимосвязанных и функционально взаимодействующих разнотипных систем. В данных условиях сложная система образована при взаимодействии всех систем бурового станка, предназначенных для бурения, и горной породы. Со стороны бурового станка особое влияние на процесс оказывают усилие подачи и частота вращения рабочего органа, а также устройство и свойства материалов бурового инструмента. Со стороны горной породы наиболее важное значение имеют прочностные характеристики, которые могут выражаться через показатель буримости, а также структура массива горной породы. Разработана методика определения стойкости шарошечного долота и скорости бурения в зависимости от прочностных характеристик и структуры массива горной породы. Представленная методика позволяет проанализировать соотношение производительности бурового станка шарошечного бурения и ресурса бурового долота при бурении пород, характеризующихся различными показателями буримости, количеством и размером трещин и слоями породы с различными физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: эффективность функционирования, буровой станок, горная порода, прочностные характеристики, структура массива, стойкость долот, скорость бурения.

\*НИР выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., грант 14.B37.21.0625.

# THE ANALYSIS OF FUNCTIONING EFFICIENCY OF THE MULTIPLE PARAMETER SYSTEM

A. A. Stupina<sup>1</sup>, A. A. Shigina<sup>2</sup>, A. O. Shigin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: saa55@rambler.ru

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
3 Vuzovskiy Lane, Krasnoyarsk, 660025. E-mail: shigina\_a@mail.ru, shigin27@rambler.ru.

*It is necessary to consider a set of structurally interconnected and functionally cooperating polytypic systems for estimation of functioning efficiency of the boring rig. In these conditions the difficult system is formed at interaction of all systems of the boring rig intended for boring, and rock. If to consider the boring ring, the greatest influence on the process has the feed force and rotation frequency of movable operating element, as well as the structure and properties of materials of the drilling tool. If to consider the rock massif, the most important are strength characteristics which can be registered through the boreability indicator, as well as the structure of the rock massif. The definition technique of a roller bit firmness and speed of boring depending on strength properties and structure of the rock massif is developed. The presented technique allows to analyse a ratio of productivity of the boring rig of roller-bit drilling and a resource of a drill bit when boring the rock, being characterized with various indicators of boreability, quantity and the size of crevices and beds of the rock with various physical and mechanical properties.*

**Keywords:** efficiency of functioning, boring rig, rock, strength characteristics, massif structure, firmness of the bore bit, speed of boring.

Проблема оценки эффективности функционирования системы «буровой станок – шарошечное долото – горная порода» в горной отрасли связана со взаимодействием большого количества элементов. Основными системами бурового станка, отвечающими за процесс бурения, являются вращательно-подающий механизм, мачта, энергетическая система и двигатели различного назначения, буровой став и буровой инструмент.

Эффективность функционирования буровых станков может оцениваться с точки зрения максимальной надежности, максимальной производительности и оптимального соотношения этих параметров [1]. Оценка надежности позволяет увеличить ресурс бурового станка, межремонтный период и снизить затраты на ремонт и эксплуатацию. Для объективной оценки надежности необходимо исследовать условия эксплуатации, диагностировать техническое состояние и моделировать отказы буровых станков. Оценка производительности позволяет максимально эффективно использовать время работы бурового станка. Для этого необходимо эффективно регулировать режимы бурения.

Для оценки эффективности функционирования бурового станка необходимо рассматривать множество структурно взаимосвязанных и функционально взаимодействующих разнотипных систем. В данных условиях сложная система образована при взаимодействии всех систем бурового станка, предназначенных для бурения, и горной породы. Со стороны бурового станка особое влияние на процесс оказывают усилие подачи и частота вращения рабочего органа, а также устройство и свойства материалов бурового инструмента. Со стороны горной породы наибольшую значимость имеют прочностные характеристики, которые могут выражаться через показатель буримости [2], а также структура массива горной породы. Массив горной породы может характеризоваться такими свойствами, как трещиноватость, слоистость и другие нарушения однородности горной породы. Проходка

буровым инструментом границ или областей с изменяющимися физико-механическими свойствами неизменно сопровождается ударами и толчками. Непрогнозируемые ударные нагрузки, как правило, не приводят к увеличению скорости бурения, но при этом негативно сказываются на ресурсе бурового инструмента и бурового станка в целом. В условиях неопределенности и неполной информации о свойствах породы при моделировании процессов необходимо использовать среднестатистические данные, включающие показатель буримости и его изменение, количество и размеры областей с изменяющимися физико-механическими свойствами на погонный метр скважины.

Наиболее сложным механическим узлом рабочего органа бурового станка является буровой инструмент. В 80 % случаев шарошечный буровой инструмент (ШД) отказывает в работе по причине разрушения подшипниковых узлов [3]. Подшипники качения шарошек испытывают сложную циклическую нагрузку: циклическую нагрузку на тело качения подшипника при качении шарошки по забою; циклическую нагрузку при перекачивании шарошки с зубка на зубок; циклическую нагрузку, характеризующуюся изменением физико-механических свойств горной породы.

1. Циклическая нагрузка на тело качения подшипника при качении шарошки по забою описывается уравнениями расчетного ресурса подшипника [4]:

$$L = 10^6 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^k, \quad (1)$$

где  $L$  – расчетный ресурс подшипника, об.;  $a_1$  – коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от надежности;  $a_2$  – коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от особых свойств подшипника;  $a_3$  – коэффициент, корректирующий ресурс в зависимости от условий работы подшипника;  $C$  – грузоподъемность подшипника, Н;  $P$  – нагрузка, Н;  $k$  – показатель степени, равный в соответствии с резуль-

татами экспериментов:  $k = 3$  для шариковых и  $k = 10/3$  для роликовых подшипников.

Для подшипника шарошки расчетный ресурс следует измерять числом циклов нагружения.

Согласно [5], максимальное напряжение в ролике подшипника качения:

$$\sigma_p^{\max} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}}. \quad (2)$$

Максимальное напряжение в шарике подшипника качения:

$$\sigma_{ш}^{\max} = 1800 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_{ш}^2}}, \quad (3)$$

где  $F_r$  – радиальное усилие, прилагаемое к подшипнику, Н;  $z$  – количество тел качения в подшипнике;  $D_p$  – диаметр ролика, мм;  $L_p$  – длина ролика, мм;  $D_{ш}$  – диаметр шарика, мм.

В связи с особенностями конструкции опор качения шарошки Р-Ш-Р, роликовые подшипники несут основную нагрузку, а шариковый подшипник служит замковым механизмом. Поэтому при учете осевых нагрузок особое внимание следует уделять расчету ресурса роликовых подшипников.

Указанные уравнения учитывают только циклическую нагрузку на тела качения подшипника за счет изменения геометрического положения тел качения. Ресурс опоры качения (1) не учитывает ударные нагрузки, возникающие при перекачивании зубьев шарошки по забою, и нагрузки, возникающие при переходе при бурении на горные породы с более высоким показателем буримости. Периодически возникающая ударная нагрузка требует оценки усталостной прочности. Достаточно надежной характеристикой усталостной прочности деталей машин является коэффициент запаса усталостной прочности  $n_r$  [6]. Эта величина также характеризует уменьшение количества циклов опоры качения в зависимости от дополнительной циклической нагрузки. Отсюда ресурс подшипника с учетом дополнительной циклической нагрузки:

$$L = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_H} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\sigma}} \cdot \sigma_m}, \quad (4)$$

где  $\sigma_1$  – предел выносливости материала, МПа;  $\sigma_a$  – амплитуда переменных напряжений цикла, МПа;  $\sigma_{\sigma}$  – предел прочности материала, МПа;  $\sigma_m$  – среднее напряжение цикла, МПа;

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  – максимальное и минимальное напряжение, возникающие при ударах при увеличении крепости горной породы, либо при перекачивании зубьев шарошки, МПа.

2. Циклическая нагрузка при перекачивании шарошки с зубка на зубок характеризуется ударными нагрузками, возникающими при ударе очередного зубка о поверхность забоя. Данный процесс характеризуется изменениями кинетической энергии и переходом последней в энергию механического удара. Изменения кинетической энергии бурового органа характеризуется изменением скорости. Средняя скорость движения бурового инструмента равна скорости бурения. Но при перекачивании шарошки в поверхность забоя поочередно ударяются зубки А, Б и В и шарошка вращается согласно направлению стрелки (рис. 1).

При перекачивании с зубка А на зубок Б, в первый полупериод высота  $h_1$  растет от 0 до  $x/2$ , а высота  $h_2$  убывает от  $x$  до  $x/2$ . В данный полупериод долото и буровой став относительно поверхности забоя перемещаются вверх и нагрузка на все узлы является пиковой. Во второй полупериод высота  $h_1$  растет от  $x/2$  до  $x$ , а высота  $h_2$  убывает от  $x/2$  до 0. В данный полупериод нагрузка снижается и мощность подающего привода преобразуется в кинетическую энергию. В конце второго полупериода кинетическая энергия преобразуется в энергию удара и нагрузка также является пиковой. В первый полупериод пиковая нагрузка передается плавно в течение всего полупериода. В конце второго полупериода кинетическая энергия преобразуется в энергию удара мгновенно и время передачи энергии равно времени внедрения зубка в поверхность забоя. Отсюда нагрузка, возникающая в конце второго полупериода, является максимальной за весь период перекачивания с одного зубка на другой.

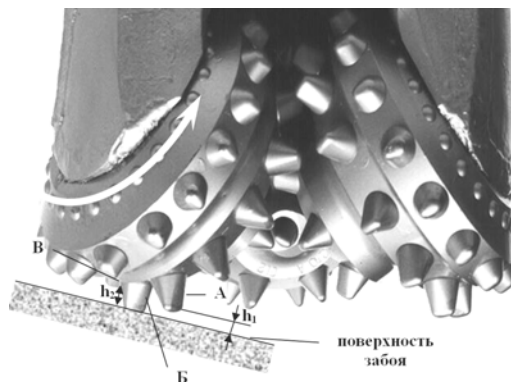


Рис. 1. Схема перекачивания шарошки по забою

Напряжение в роликах опор качения, с учетом ударных нагрузок, возникающих при перекачивании зубцов шарошки по забою [6]:

$$\sigma_{p.уд}^{max} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}} \cdot \frac{2(v_6 + v_s/2)}{2(v_6 + v_s/2) - v_s/2} \quad (7)$$

Напряжение в шарике подшипника качения шарошки, возникающее при ударе:

$$\sigma_{ш.уд}^{max} = 1800 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_{ш}^2}} \cdot \frac{2(v_6 + v_s/2)}{2(v_6 + v_s/2) - v_s/2} \quad (8)$$

где  $v_6$  – скорость бурения при имеющихся свойствах горной породы, усилием подачи и скоростью вращения бурового органа, м/с [2];  $v_s$  – скорость опускания зубца шарошки на забой, м/с.

3. Циклическая нагрузка, характеризующаяся изменением физико-механических свойств горной породы, имеет схожий механизм. И возникающее напряжение связано с переходом кинетической энергии бурового органа в энергию удара при увеличении показателя буримости горной породы. Различие заключается в источнике и механизме образования ударов.

Суммарное напряжение в опорах качения, возникающее при увеличении показателя буримости породы, включает также циклические нагрузки от ударов зубцов о поверхность забоя:

$$\sigma_{p.уд.}^{\Sigma} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}} \times \frac{2(v_6 + v_s/2)}{2(v_6 + v_s/2) - v_s/2} \cdot \frac{2\Pi_6^1 + 2\Delta\Pi_6}{2\Pi_6^1 + \Delta\Pi_6} \quad (9)$$

Напряжение в шарике подшипника качения шарошки, возникающее при ударе:

$$\sigma_{ш.уд}^{\Sigma} = 1800 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_{ш}^2}} \times \frac{2(v_6 + v_s/2)}{2(v_6 + v_s/2) - v_s/2} \cdot \frac{2\Pi_6^1 + 2\Delta\Pi_6}{2\Pi_6^1 + \Delta\Pi_6} \quad (10)$$

где  $\Pi_6$  – показатель буримости [2];  $\Delta\Pi_6$  – средняя разность показателя буримости смежных слоев в массиве горной породы.

При работе шарошки также важную роль играет форма зубца шарошки. Внедрение зубца шарошки способствует снижению величины ударных нагрузок. Форма зубца влияет на его проникающую способность в породу.

Напряжение в телах качения опор шарошек, с учетом ударных нагрузок, возникающих при перекачивании зубцов шарошки по забою, а также при увеличении показателя буримости породы с учетом формы индентора, находится из следующих выражений [6].

Напряжение в ролике опор качения:

$$\sigma_{p.уд.}^{\Sigma} = 600 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_p \cdot L_p}} \times \frac{2(v_6 + v_s/2)}{2(v_6 + v_s/2) - v_s/2} \cdot \frac{2\Pi_6^1 + 2\Delta\Pi_6}{2\Pi_6^1 + \Delta\Pi_6} \cdot k_{инд} \quad (11)$$

Напряжение в шарике опор качения:

$$\sigma_{ш.уд}^{\Sigma} = 1800 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_r}{z \cdot D_{ш}^2}} \times \frac{2(v_6 + v_s/2)}{2(v_6 + v_s/2) - v_s/2} \cdot \frac{2\Pi_6^1 + 2\Delta\Pi_6}{2\Pi_6^1 + \Delta\Pi_6} \cdot k_{инд} \quad (12)$$

где  $k_{инд}$  – коэффициент формы индентора.  $k_{инд} = 0,79$  для индентора, имеющего форму закругленного цилиндра;  $k_{инд} = 0,47$  для индентора, имеющего форму правильного конуса;  $k_{инд} = 0,7$  для индентора, имеющего форму выпуклого конуса.

Представленные выражения для расчета напряжений в телах качения шарошечных долот с использованием выражений (4–6) позволяют определить число циклов до разрушения тел качения при различных условиях нагружения.

При этом можно выделить три вида условий нагружения.

1. Бурение однородной породы без нарушений целостности с приблизительно одинаковыми свойствами или изменением показателя буримости в пределах  $\Delta\Pi_6 < 1$ . Бурение таких массивов горной породы сопровождается только циклической нагрузкой с максимальными напряжениями в телах качения, определяемыми с помощью выражений (7) и (8) с учетом коэффициента формы инденторов шарошек  $k_{инд}$ .

2. Бурение слоистой породы характеризуется значительными ударными нагрузками при прохождении шарошечным долотом границ между слоями породы с различными физико-механическими свойствами. Чтобы найти количество циклов нагружения при переходе границы между слоями породы с разными физико-механическими свойствами, необходимо учитывать количество слоев породы на один погонный метр. Значение этого показателя варьируется от 0 до 20 и более [7]. Максимальные напряжения для данных условий нагружения находятся из выражений (11) и (12).

3. Бурение трещиноватой породы характеризуется значительными ударными нагрузками при прохождении шарошечным долотом трещин или несплошностей в массиве горной породы. Количество трещин на один погонный метр скважины приблизительно находится в пределах от 0 до 20 [7]. Максимальные напряжения для данных условий нагружения также находятся из выражений (11) и (12), однако в отличие от бурения слоистой породы, прохождение трещины сопровождается более значительным ударом. Условно можно принять, что в данный момент показатель буримости снижается до нуля и возрастает до прежнего значения. В то время как прохождение границы между слоями сопровождается скачком показателя буримости  $\Delta\Pi_6 < \Pi_6$ .

Для определения стойкости шарошечного долота, работающего при бурении массива горной породы, характеризующегося всеми тремя условиями нагружения, необходимо определить доли от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы:

$$\eta_{сл} = \frac{n_{сл} \cdot n_{об}^{сл}}{n_{вр} \cdot \frac{D_1^{max}}{D_{ш}^{max}}} \cdot v_6; \quad \eta_{тр} = \frac{n_{тр} \cdot n_{об}^{тр}}{n_{вр} \cdot \frac{D_1^{max}}{D_{ш}^{max}}} \cdot v_6;$$

$$\eta_{од} = 1 - \eta_{сл} - \eta_{тр},$$

где  $\eta_{од}$ ,  $\eta_{сл}$ ,  $\eta_{тр}$  – доли от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы;  $n_{сл}$  – количество границ между слоями породы с разными физико-механическими свойствами на один погонный метр,  $m^{-1}$ ;  $n_{сл}$  – количество трещин в горной породе на один погонный метр,  $m^{-1}$ ;  $n_{об}^{сл}$  – число оборотов долота, необходимое для проходки границы между слоями породы;  $n_{об}^{тр}$  – число оборотов долота, необходимое для проходки трещины в массиве породы;  $v_б$  – скорость бурения при имеющихся свойствах горной породы, усилием подачи и скоростью вращения бурового органа,  $m/min$ ;  $n_{вр}$  – частота вращения шарошечного долота,  $об/min$ ;  $D_1$  – диаметр шарошечного долота,  $m$ ;  $D_{ш}^{max}$  – максимальный диаметр шарошки,  $m$ .

Число оборотов долота, необходимое для проходки границы между слоями или трещины в массиве породы, определяется из следующих выражений:

$$n_{об}^{сл} = \delta_{сл} \cdot \frac{n_{вр}}{v_б}; \quad n_{об}^{тр} = \delta_{тр} \cdot \frac{n_{вр}}{v_б},$$

где  $\delta_{сл}$  – толщина пограничного слоя или его размер вдоль оси бурового става,  $m$ ;  $\delta_{тр}$  – толщина трещины или ее размер вдоль оси бурового става,  $m$ .

Тогда доли от общего количества циклов нагружения тел качения шарошек, приходящиеся на бурение однородной, слоистой и трещиноватой породы:

$$\eta_{сл} = \frac{n_{сл} \cdot \delta_{сл}}{D_1^{max}}; \quad \eta_{тр} = \frac{n_{тр} \cdot \delta_{тр}}{D_1^{max}}; \quad \eta_{од} = 1 - \eta_{сл} - \eta_{тр}.$$

Таким образом, суммарное количество циклов до разрушения тел качения при различных условиях нагружения найдем из выражения:

$$L_{\Sigma} = L_{од} \cdot \eta_{од} + L_{сл} \cdot \eta_{сл} + L_{тр} \cdot \eta_{тр}. \quad (13)$$

Здесь  $L_{од}$  – количество циклов до разрушения тел качения при бурении однородной породы;  $L_{сл}$  – количество циклов до разрушения тел качения при таких условиях бурения, когда каждый цикл нагружения будет характеризоваться нагрузками, соответствующими преодолению границ между слоями породы с различными физико-механическими свойствами;  $L_{тр}$  – количество циклов до разрушения тел качения при таких условиях бурения, когда каждый цикл нагружения будет характеризоваться нагрузками, соответствующими преодолению трещин или несплошностей в массиве горной породы.

Для условий бурения однородной породы выражение (4) для ресурса роликовых опор качения примет вид

$$L_{од} = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{р.уд.}^{max}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_{р.уд.}^{max} - \sigma_p^{max}}{2} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\epsilon}} \cdot \frac{\sigma_{р.уд.}^{max} + \sigma_p^{max}}{2}}.$$

Для условий бурения слоистой породы выражение (4) примет вид

$$L_{сл} = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{р.уд.}^{\Sigma}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_{р.уд.}^{\Sigma} - \sigma_p^{max}}{2} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\epsilon}} \cdot \frac{\sigma_{р.уд.}^{\Sigma} + \sigma_p^{max}}{2}}.$$

Для условий бурения слоистой породы, поскольку минимальное напряжение цикла  $\sigma_{min} = 0$ , выражение (4) примет вид

$$L_{сл} = 10^6 \cdot \left( \frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{р.уд.}^{\Sigma}} \right)^{10/3} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\sigma_{р.уд.}^{\Sigma}}{2} + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\epsilon}} \cdot \frac{\sigma_{р.уд.}^{\Sigma}}{2}}.$$

С учетом представленных уравнений определения ресурса опор качения шарошек, можно определить расчетную стойкость буровых долот с коническими шарошками:

$$T = \frac{L_{\Sigma}}{2 \cdot n_{вр} \cdot \frac{D_1}{D_{ш}^{max}}} \cdot v_б, \text{ М},$$

где  $D_{ш}^{max}$  – максимальный диаметр шарошки.

Для трехшарошечных долот:

$$T = \frac{L_{\Sigma}}{2 \cdot n_{вр} \cdot 1,7} \cdot v_б, \text{ М},$$

Представленная методика позволяет проанализировать соотношение производительности бурового станка шарошечного бурения и ресурса бурового долота при бурении пород, характеризующихся различными показателями буримости, количеством и размером трещин и слоев породы с различными физико-механическими свойствами.

С использованием разработанной методики построено несколько зависимостей для пород со средним показателем буримости  $P_б = 10, 15, 20$ , значительно отличающихся по трещиноватости и слоистости (рис. 2). Вертикальными линиями разграничены участки кривых, соответствующие усилию подачи бурового става, в диапазоне, рекомендуемом заводом-изготовителем для шарошечных долот типа ОК-ПВ.

При анализе кривых при изменении количества трещин и слоев горной породы значительно изменяется стойкость долот. С экономической точки зрения, более оправданным является использование следующего соотношения:

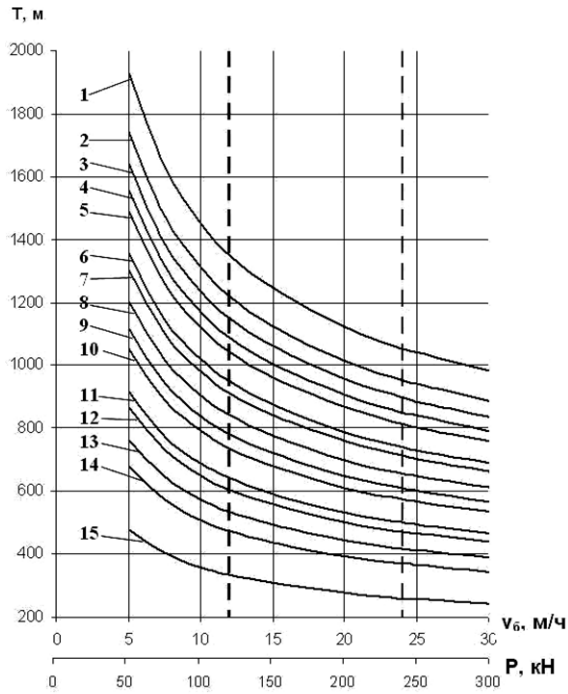
$$S = \gamma \cdot t_в + \gamma / v_б + C_d / T = f(T / v_б), \quad (14)$$

где  $S$  – удельные затраты на бурение,  $руб/м$ ;  $C_d$  – стоимость долота,  $руб$ ;  $t_в$  – удельные затраты времени на вспомогательные операции,  $мин/м$ ;  $\gamma$  – стоимость машино-часа производственной работы БС, выраженная соотношением  $\gamma = A / (T_c \cdot \eta)$ ;  $A$  – стоимость машино-смены,  $руб$ ;  $T_c$  – продолжительность смены,  $ч$ ;  $\eta$  – коэффициент эффективного использования станка в течение смены. Для выполнения условия  $S \rightarrow min$  необходимо найти дифференциал  $dS/dT = 0$ . Отсюда соотношение стойкости долота и скорости бурения для оптимальной эффективности функционирования

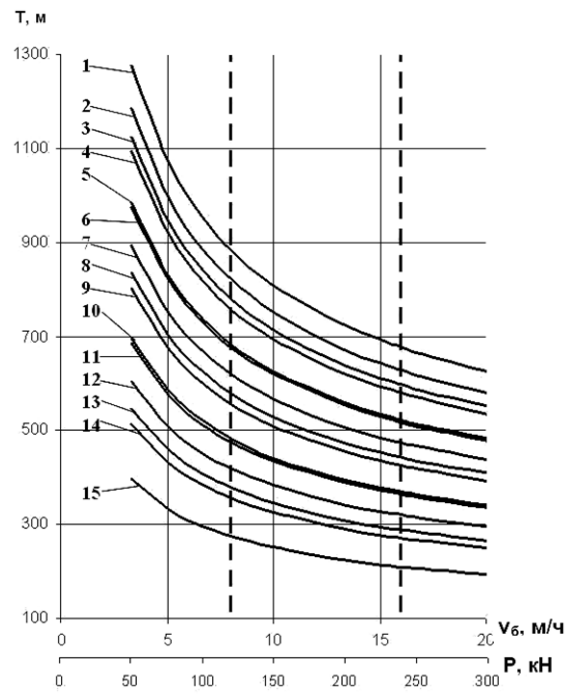
технической системы «буровой станок – шарошечное долото – горная порода» найдем из выражения (15):

$$\frac{T_{onm}}{v_0} = \left( \sqrt{\frac{\gamma}{C_d \cdot \varphi}} - 1 \right) / \left( \frac{\gamma}{C_d} - \varphi \right), \quad (15)$$

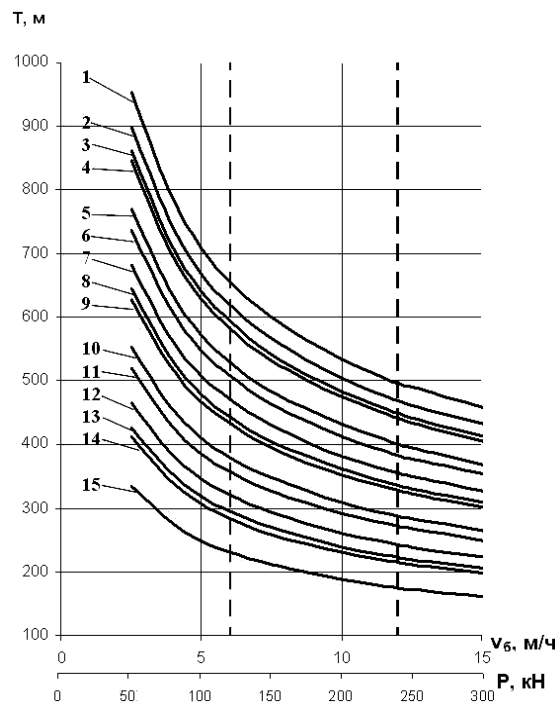
где  $v_0$  – начальная скорость бурения, м/ч;  $\varphi$  – коэффициент интенсивности падения скорости бурения во времени вследствие изнашивания долота, ч<sup>-1</sup>.



a



b



e

Рис. 2. Зависимости стойкости шарошечных долот, скорости бурения и усилия подачи бурового става:

a –  $\Pi_6 = 10$ ; б –  $\Pi_6 = 15$ ; e –  $\Pi_6 = 20$ . На графиках a, б, e характеристики породы для кривых:

- 1)  $n_{cl} = 0, n_{tp} = 0$ ; 2)  $n_{cl} = 10, \Delta \Pi_6 = 2, n_{tp} = 0$ ; 3)  $n_{cl} = 10, \Delta \Pi_6 = 4, n_{tp} = 0$ ; 4)  $n_{cl} = 20, \Delta \Pi_6 = 2, n_{tp} = 0$ ;
- 5)  $n_{cl} = 0, n_{tp} = 10$ ; 6)  $n_{cl} = 20, \Delta \Pi_6 = 4, n_{tp} = 0$ ; 7)  $n_{cl} = 10, \Delta \Pi_6 = 2, n_{tp} = 10$ ; 8)  $n_{cl} = 10, \Delta \Pi_6 = 4, n_{tp} = 10$ ;
- 9)  $n_{cl} = 20, \Delta \Pi_6 = 2, n_{tp} = 10$ ; 10)  $n_{cl} = 0, n_{tp} = 20$ ; 11)  $n_{cl} = 20, \Delta \Pi_6 = 4, n_{tp} = 10$ ; 12)  $n_{cl} = 10, \Delta \Pi_6 = 2, n_{tp} = 20$ ;
- 13)  $n_{cl} = 20, \Delta \Pi_6 = 4, n_{tp} = 10$ ; 14)  $n_{cl} = 20, \Delta \Pi_6 = 2, n_{tp} = 20$ ; 15)  $n_{cl} = 20, \Delta \Pi_6 = 4, n_{tp} = 20$

Подводя итог, можно отметить необходимость применения данной методики для определения рекомендуемых значений соотношения стойкости шарошечного долота и скорости бурения, соответствующего оптимальной эффективности функционирования технической системы «буровой станок – шарошечное долото – горная порода». В свою очередь значения стойкости долота и скорости бурения должны контролироваться в постоянном режиме с учетом изменяющихся свойств горной породы.

#### Библиографические ссылки

1. Шигина А. А., Шигин А. О., Ступина А. А. Сравнительная оценка методов анализа эффективности функционирования буровых станков // Современ. проблемы науки и образования. 2012. № 6.
2. Подэрни Р. Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ : учеб. пособие. 4-е изд. М. : Изд-во МГТУ, 2001.
3. Техника, технология и опыт бурения скважин на карьерах / под ред. В. А. Перетолчина. М. : Недра, 1993.
4. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 2. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестковой. М. : Машиностроение, 2001.
5. Решетов Д. Н. Детали машин : учебник. 4-е изд. М. : Машиностроение, 1989.

6. Шигин А. О., Гилев А. В. Методика расчета усталостной прочности как основного фактора стойкости шарошечных долот // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2012. № 3. С. 22–27.

7. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. М. : Недра, 1980.

#### References

1. Shigina A. A., Shigin A. O., Stupina A. A. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 6, available at: [www.science-education.ru/106-7924](http://www.science-education.ru/106-7924).
2. Podjerni R. Ju. *Gornye mashiny i komplekсы dlja otkrytyh rabot* (Mining machines and complexes for open cast mining). Moscow, MGGU, 2001, 422 p.
3. Equipment, technology and experience of bore-hole drilling on quarries (*Tehnika, tehnologija i opyt burenija skvazhin na kar'erah*). Moscow, Nedra, 1993, 286 p.
4. Anurev V. I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja* (Directory of the designer-mechanician). Moscow, Mashinostroenie, 2001, 912 p.
5. Reshetov D. N. *Detali mashin* (Machinery). Moscow, Mashinostroenie, 1989, 496 p.
6. Shigin A. O., Gilev A. V. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, 2012, no. 3 (62), pp. 22–27.
7. Borisov A. A. *Mehanika gornyh porod i massivov* (Rock mechanics and massifs). Moscow, Nedra, 1980, 360 p.

© Ступина А. А., Шигина А. А., Шигин А. О., 2013

УДК 681.34

### ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АСУ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ\*

Р. Ю. Царев<sup>1</sup>, Д. В. Капулин<sup>2</sup>, Г. А. Сидорова<sup>1</sup>, М. А. Сержантова<sup>1</sup>, Н. А. Бесчастная<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: rahatamatahata@mail.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 26а

*Определены задачи и этапы формирования структуры АСУ космических систем связи и навигации, выделены уровни детализации построения системы. Разработана схема комбинированной реализации оптимизационных и имитационных моделей для формирования оптимальной структуры АСУ космических систем связи и навигации.*

*Ключевые слова: космические системы, формирование, оптимизация, структура, система управления.*

\* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0116 «Модели, методы и алгоритмы синтеза и управления развитием кластерных структур АСУ космических систем связи и навигации».



# FORMATION OF OPTIMUM STRUCTURE OF ACS OF SPACE COMMUNICATION SYSTEMS AND NAVIGATION \*

R. Yu. Tsarev<sup>1</sup>, D. V. Kapulin<sup>2</sup>, G. A. Sidorova<sup>1</sup>, M. A. Serzhantova<sup>1</sup>, N. A. Beschastnaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarsky Rabochy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: rahatamatahata@mail.ru

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
26a Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia

*In the article tasks and stages of formation of structure of ACS of space communication systems and navigation are defined, levels of specification of creation of the system are allocated. The scheme of the combined realization of optimizing and imitating models is developed for formation of optimum structure of ACS of space communication systems and navigation.*

**Keywords:** space systems, formation, optimization, structure, control system.

Автоматизированные системы управления космических систем связи и навигации представляют собой иерархические многофункциональные и многоконтурные комплексы с развитыми средствами связи между управляющими узлами. Они включают в себя совокупность наземных измерительных пунктов различных типов, распределенных по значительной территории, каналы связи, обеспечивающие передачу информации между элементами системы, узлы связи и управляющие узлы различных уровней иерархии.

Появление новых классов космических аппаратов и расширение их функций требуют совершенствования структуры автоматизированных систем управления космических систем (АСУ КС). Проектирование подобных систем включает определение элементов и подсистем АСУ КС в пространстве, выбор комплекса технических средств, обеспечивающих выполнение функций управления с учетом пространственного размещения комплекса и доступности узлов, распределение множества выполняемых функций по узлам системы с учетом взаимосвязи по технологии обработки информации и управления. При этом должны быть обеспечены требования к качеству управления системой.

**Постановка задачи.** При синтезе структуры АСУ КС возникают задачи рационального распределения функций между управляющим комплексом и остальными узлами системы, задачи выбора технических

средств в узлах системы и каналов связи между ними с учетом различных тактико-технических и технико-экономических требований к функционированию АСУ КС [1–3]. Возникающие при этом математические постановки задачи синтеза структуры системы могут быть формализованы с использованием дискретных переменных различного уровня детализации системы. Необходимо определить последовательность задач и этапов формирования структуры АСУ космической системы связи и навигации и решить задачу выбора пунктов управления АСУ космической системы за счет комбинированной реализации оптимизационных и имитационных моделей.

**Метод решения.** Последовательность задач и этапов формирования структуры АСУ КС приведена на рис. 1. На начальных этапах формулируются требования к разрабатываемой АСУ КС, выбирается состав характеристик и критериев эффективности вариантов структуры системы. Определяется возможный состав узлов, вариантов их построения и территориального расположения, а также характеристики этих вариантов. Выделяются функции управления в системе, которые детализируются до комплекса взаимосвязанных задач управления и вариантов их решения (или до вариантов построения процедур обработки информации и информационных массивов), обеспечивающих выполнение заданных функций управления (рис. 1).

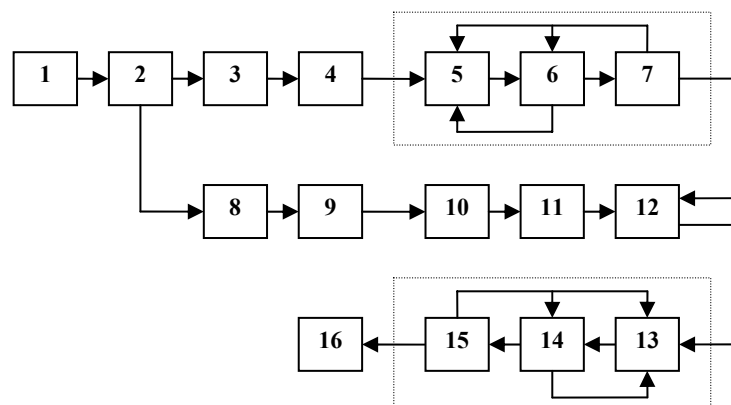


Рис. 1. Последовательность задач и этапов формирования структуры АСУ космической системы связи и навигации

Последовательность задач и этапов формирования структуры АСУ космической системы связи и навигации, представленных на рис. 1:

1 – формулировка задачи формирования структуры АСУ космической системы связи и навигации;

2 – уточнение и выбор состава учитываемых характеристик и критериев эффективности вариантов структуры;

3 – определение возможного состава узлов управления и их взаимосвязей;

4 – формализация вариантов построения топологической структуры системы (построения графа взаимосвязанной совокупности задач управления, выполняемых АСУ КС,  $G_J$ );

5 – модель оптимизации топологической структуры (выбор  $G_J^* \subset G_J$ );

6 – имитационная модель топологической структуры АСУ космической системы связи и навигации;

7 – блок анализа и коррекции решения;

8 – определение состава функций задач управления и их взаимосвязей;

9 – определение вариантов выполнения функций и задач управления;

10 – определение возможного набора технических средств выполнения функций и задач управления;

11 – формализация вариантов выполнения функций и задач (построение графа топологической структуры АСУ КС, отражающего набор возможных вариантов построения и пространственного размещения управляющих узлов системы и каналов связи между ними,  $G_I$ );

12 – формализация построения функциональной структуры АСУ космической системы связи и навигации (построение отображения  $G_I$  на  $G_J$ );

13 – модель оптимизации функциональной структуры системы;

14 – имитационная модель функциональной структуры системы;

15 – блок анализа и коррекции решения;

16 – получение оптимального варианта структуры системы.

Далее выделенные варианты построения комплекса взаимосвязанных задач управления и варианты построения управляющих узлов (включая варианты оснащения их техническими средствами управления) формализуются в виде графов  $G_I$  и  $G_J$ , которые служат основой для формализованных этапов синтеза топологической и функциональной структуры системы (выделенные блоки 5–7, 13–15 на рис. 1).

Рассматриваемые задачи могут быть формализованы с использованием аппарата графов и отображений. Общая схема формирования структуры АСУ КС включает следующие этапы:

1) построение графа топологической структуры АСУ КС  $G_I$ , отражающего набор возможных вариантов построения и пространственного размещения управляющих узлов системы и каналов связи между ними;

2) построение графа взаимосвязанной совокупности задач управления  $G_J$ , выполняемых АСУ КС;

3) формализация отображения графов  $G_I$  на  $G_J$ .

Таким образом, задача синтеза топологической структуры системы состоит в поиске оптимального подграфа на графе  $G_I$  узлов АСУ КС, а задача синтеза функциональной структуры – в поиске оптимального отображения графа  $G_I$  на граф  $G_J$  топологической структуры системы.

Для АСУ КС целесообразно выделять следующие уровни детализации построения системы [4]:

– выбор состава и топологии наземных пунктов управления (агрегированная переменная  $X$ );

– выбор варианта защищенности пунктов управления от внешних воздействий и выбор комплексов технических средств в узлах (агрегированная переменная  $Y$ );

– выбор варианта распределения функций и задач управления между выбранными узлами управления и техническими средствами (агрегированная переменная  $Z$ ).

При этом общую задачу формирования структуры АСУ КС можно записать следующим образом [5]:

$$\text{extr } F(X, Y, Z) = f_1(X) + f_2(X, Y) + f_3(X, Y, Z);$$

$$X \in G_1, \quad Y \in G_2(X), \quad Z \in G_3(X, Y),$$

где  $X = \{x_j\}$ ,  $Y = \{y_{jk}\}$ ,  $Z = \{z_{ijk}\}$  – булевы векторы, связанные между собой следующим образом: для всех  $j \in J$ ,  $k \in K$ ,  $i \in I$ ;  $y_{jk} \geq 0$ , если  $x_j > 0$ ;  $y_{jk} > 0$ , если  $x_j = 0$ ;  $z_{ijk} \geq 0$ , если  $y_{jk} > 0$ ;  $z_{ijk} = 0$ , если  $y_{jk} = 0$ .

Можно отметить, что в общем случае ряд ограничений задачи может быть задан алгоритмически, что требует, в свою очередь, организации итеративных схем решения указанных задач с учетом итераций решения общей задачи формирования структуры АСУ КС. На практике такие сложные процедуры реализуются в виде человеко-машинных схем синтеза, включающих возможности «конструктора системы» в режиме диалога вмешиваться и корректировать результаты промежуточных решений и ход оптимизации.

Для решения проблем синтеза структуры распределенных АСУ КС на основе методологии синтеза структуры сложных систем при выполнении исследования по проекту «Модели, методы и алгоритмы синтеза и управления развитием кластерных структур АСУ космических систем связи и навигации» (при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0116) разработан комплекс взаимосвязанных моделей и алгоритмов и итеративные схемы их взаимодействия при синтезе топологической (пространственной) и функциональной структуры системы (рис. 2).

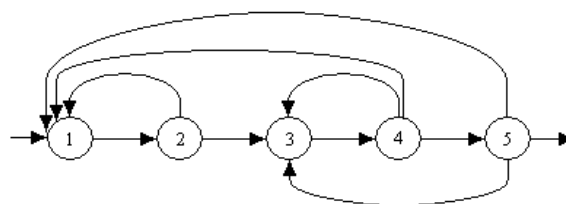


Рис. 2. Схема комбинированной реализации оптимизационных и имитационных моделей для выбора пунктов управления

На первом этапе синтеза АСУ КС (блок 1) решается задача выбора состава и пространственного размещения управляющих узлов с учетом затрат на их организацию, доступность и глобальность управления различными классами космических аппаратов (КА).

Предполагается, что на заданной территории определено множество пунктов, входящих в АСУ КС, в которых могут создаваться узлы управления, непосредственно взаимодействующие с КА. Зоны видимости различных пунктов управления разбивают проекции траекторий движения КА на участки. Совокупность участков различных пунктов определяет доступность КА пунктами управления и глобальность АСУ КС. Задача синтеза структуры АСУ КС состоит в выборе совокупности узлов управления, минимизирующей затраты на их создание при условии выполнения требований к глобальности управления для каждого класса КА и некоторых других требований, например, к количеству узлов, взаимодействующих с каждым классом объектов, и др. [6].

Для определения алгоритмически заданных характеристик функционирования синтезированного варианта структуры АСУ КС предназначены имитационные модели взаимодействия элементов заданной топологической структуры (блок 2). Модель позволяет анализировать функционирование системы с различным числом и расположением наземных пунктов управления, различным количеством классов КА и числом КА в каждом классе, различным числом типов управляющих взаимодействий между пунктами управления и КА. В результате моделирования определяются характеристики эффективности работы наземных пунктов управления (общая загрузка, загрузка по типам взаимодействия и классам КА) и качество управления совокупностью КА различных классов (число взаимодействий, их длительность, число несуществующих взаимодействий и т. д.).

В блоках 3, 4 для выбранной совокупности пунктов управления и их взаимосвязей определяются варианты построения узлов и связей между ними, обеспечивающие повышение живучести системы, определяемой вероятностью выполнения системой функций управления с учетом возможных неблагоприятных внешних воздействий.

Различные варианты построения узлов АСУ КС и связей между ними, направленные на увеличение живучести системы, формализуются в виде графа  $G_J$ . Для повышения живучести используется дублирование узлов и каналов связи, повышение защищенности узлов и т.д. Каждый вариант построения узлов или каналов связи характеризуется затратами на их осуществление и вероятностью выхода из строя за рассматриваемый интервал времени. Для каждого класса объектов задается минимальная совокупность узлов, функционирование которых обеспечивает выполнение заданных функций управления. Предполагается, что такой совокупностью являются элементы, соединяющие объект с центром управления.

Задача определения вариантов построения АСУ КС состоит в минимизации затрат на мероприятия,

обеспечивающие выполнение системой функций управления при ограничениях, характеризующих живучесть системы управления для различных классов объектов.

Такой выбор осуществляется в результате реализации аналитико-имитационной процедуры, выполняющей взаимодействие в процессе синтеза оптимизационной модели выбора вариантов реализации элементов системы (блок 3) и имитационной модели (блок 4).

Для детального учета вероятностных характеристик функционирования сгенерированных вариантов построения и обеспечения живучести системы предназначен комплекс имитационных моделей (блок 4), который позволяет анализировать функционирование системы при различных величинах интенсивности и для различных законов распределения выхода из строя элементов системы (узлов управления, каналов связи и др.).

В соответствии с общей методологией синтеза структуры сложных систем генерирование вариантов для их детального анализа и выбора осуществляется с помощью моделей оптимизации (блок 3). При этом предполагаются заданными следующие величины:

$P_{ik} (k = \overline{1, K_i}, i = \overline{1, I})$ ,  $P_{jk} (k = \overline{1, K_j}, j = \overline{1, J})$ ,  $P_{Rk} (k = \overline{1, K_R})$  – вероятности надежной работы  $k$ -го варианта построения  $i$ -го объекта,  $j$ -го узла АСУ КС,  $R$ -го ретранслятора за рассматриваемый интервал времени с учетом неблагоприятных внешних воздействий; индекс  $j = 0$  соответствует центральному узлу управления, а индексы  $j = \overline{1, J}$  – совокупности наземных узлов управления;  $P_{ijk}$ ,  $P_{iRk}$ ,  $P_{Rjk}$ ,  $P_{j0k}$  – вероятности успешной работы вариантов построения каналов связи между объектом и наземным узлом управления, объектом и ретрансляторами, ретрансляторами и наземным узлом управления, наземным узлом управления и центром за рассматриваемый интервал времени с учетом неблагоприятных воздействий;  $C_{ik}$ ,  $C_{jk}$ ,  $C_{Rk}$ ,  $C_{ijk}$ ,  $C_{iRk}$ ,  $C_{Rjk}$ ,  $C_{j0k}$  – затраты на организацию вариантов построения объектов, ретрансляторов, центра и каналов связи, наземных узлов управления.

Задача выбора вариантов построения элементов АСУ КС состоит в минимизации затрат:

$$\min \left( \sum_{\alpha} \sum_k C_{\alpha k} + \sum_{\beta} \sum_k C_{\beta k} x_{\beta k} \right)$$

при ограничениях

$$P_{i0} (x_{ik}, x_{0k}) [P_{Rk} (x_{Rk}, x_{iRk}) (1 - P_{ijk} (x_{ijk}, x_{Rjk}, x_{jk})) + (1 - P_{Rk} (x_{Rk}, x_{iRk})) (1 - P_{ij} (x_{ijk}, x_{jk}))] \geq P_i^{\text{доп}}, \quad i = \overline{1, I};$$

$$\sum_k x_{\alpha k} = 1, \quad \alpha = i, j, R;$$

$$\sum_k x_{\beta k} = 1, \quad \beta = \{iR, ij, jR, j0\},$$

где  $x_{ik} = 1$ , если выбирается  $k$ -й вариант построения  $i$ -го объекта;  $x_{jk} = 1$ , если выбирается  $k$ -й вариант

построения  $j$ -го узла;  $x_{Rk} = 1$ , если выбирается  $k$ -й вариант построения ретранслятора;  $x_{imk} = 1$ , если выбирается  $k$ -й вариант связи соответственно между элементами  $i$  и  $j$ ,  $i$  и  $R$ ,  $R$  и  $j$ ,  $j$  и  $0$  (центральный узел управления);  $x_{ik} = x_{jk} = x_{Rk} = x_{imk} = 0$  – в противном случае.

Величины  $P_{i0}$ ,  $P_{Rk}$ ,  $P_{ijk}$ ,  $P_{ij}$  вычислены по следующим формулам:

$$P_{i0}(x_{ik}, x_{0k}) = \left( \sum_k P_{ik} x_{ik} \right) \left( \sum_k P_{0k} x_{0k} \right);$$

$$P_{Rk}(x_{Rk}, x_{iRk}) = \left( \sum_k P_{Rk} x_{Rk} \right) \left( \sum_k P_{iRk} x_{iRk} \right);$$

$$P_{ij}(x_{ijk}, x_{jk}) = \prod_j \left[ 1 - \left( \sum_k P_{ijk} x_{ijk} \right) \left( \sum_k P_{jk} x_{jk} \right) \right];$$

$$P_{ijk}(x_{ijk}, x_{Rjk}, x_{jk}) =$$

$$= \prod_j \left[ 1 - \left( 1 - \sum_k P_{ijk} x_{ijk} \right) \left( 1 - \sum_k P_{jk} x_{jk} \right) \right].$$

Для решения задачи предлагается использовать алгоритм, основанный на методе ветвей и границ [7]. В целях сокращения размерности задачи на графе  $G_j$  вариантов построения узлов системы и их взаимосвязей предусмотрено выделение последовательных участков, определение агрегированных вариантов построения выделенных участков и их характеристик. При этом из графа  $G_j$  исключаются агрегированные варианты участков, над которыми доминируют оставшиеся.

На последующем этапе синтеза (блок 5) для найденного множества узлов АСУ КС, работающих с объектами различных классов, и заданных функций управления по каждому классу объектов определяется оптимальное распределение задач взаимосвязанных подсистем по уровням и узлам системы и выбирается состав комплекса технических средств. Функции управления задаются в виде множества задач, выполняемых различными подсистемами (контурами) управления.

Типовая подсистема управления АСУ КС предназначена для выполнения последовательности взаимосвязанных функций (задач) по измерению, передаче и обработке информации о совокупности контролируемых параметров КА, выработке управляющих воздействий и контролю за их реализацией [8]. Проблема состоит в оптимизации распределения задач, входящих в контур управления, по уровням и управляющим узлам АСУ КС и определении набора технических средств, минимизирующих затраты на оснащение узлов техническими средствами и их эксплуатацию, при выполнении ограничений по оперативности, аппаратной надежности выполнения задач управления, массе и энергопотреблению бортовой аппаратуры, загрузке узлов и др.

Варианты распределения функций и задач по уровням и узлам АСУ КС формализуются в виде со-

вокупности взаимосвязанных графов  $G_0$ . Специфика АСУ КС заключается в том, что каждый путь отдельного графа соответствует некоторому варианту построения соответствующего контура управления системы. Подграф, состоящий из набора путей графов, задает структуру всей системы.

Таким образом, в рамках единого подхода определены задачи и этапы формирования структуры АСУ космической системы связи и навигации, включая последовательность решения взаимосвязанных задач формирования основных элементов и частей системы, а также выбор рационального варианта структуры создаваемой АСУ космической системы связи и навигации. Проведенный анализ задач формирования структуры АСУ космических систем связи и навигации показал, что целесообразно выделять следующие уровни детализации построения системы:

- выбор состава и топологии наземных пунктов управления;
- выбор варианта защищенности от внешних воздействий;
- выбор комплексов технических средств в узлах АСУ космической системы связи и навигации;
- выбор варианта распределения функций и задач управления между выбранными узлами управления и техническими средствами.

Для решения задачи выбора пунктов управления АСУ космической системы связи и навигации разработана схема комбинированной реализации оптимизационных и имитационных моделей. Такая схема позволяет эффективно использовать указанные модели в рамках единого оптимизационно-имитационного подхода к формированию структуры АСУ космических систем связи и навигации, что обеспечивает рациональное распределение функций между управляющим комплексом АСУ и остальными узлами системы, а также позволяет проводить обоснованный выбор технических средств с учетом различных требований к функционированию АСУ космических систем связи и навигации.

#### Библиографические ссылки

1. Антамошкин О. А. Применение метода многоатрибутивного принятия решений для выбора состава бортовой системы обмена информацией // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 6. С. 96–99.
2. Синтез и управление развитием кластерных структур АСУ космических систем / Р. Ю. Царев, Д. В. Капулин, А. В. Штарик, Е. Н. Штарик // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 2 (42). С. 80–84.
3. Тюпкин М. В. Аппаратно-информационные технологии управления космическими аппаратами // Успехи совр. естествознания. 2006. № 9. С. 111–113.
4. Оптимизационно-имитационный подход к синтезу автоматизированных систем управления / И. В. Ковалев, М. В. Тюпкин, Р. Ю. Царев, Ю. Д. Цветков // Программные продукты и системы. 2007. № 3. С. 73–74.
5. Цвиркун, А. Д., Акинфиев В. К., Филиппов В. А. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем. М. : Наука, 1985.

6. Усольцев А. А., Антамошкин О. А., Ковалев И. В. Совершенствование процессов проектирования бортовых систем обмена информацией // Вестник НИИ СУВПТ. 2003. Вып. 12. С. 60–69.

7. Островский Г. М. Современные методы оптимизации сложных систем. Оптимизация технических систем в условиях неопределенности. М.: МИСиС, 2007.

8. Усольцев А. А. Анализ методов структурно-параметрического описания объекта проектирования // Вестник НИИ СУВПТ. 2003. Вып. 12. С. 19–27.

#### Referens

1. Antamoshkin O. A. *Vestnik SibGAU*. 2005, № 6, pp. 96–99.

2. Tsarev R. Yu., Kapulin D. V., Shtarik A. V., Shtarik Ye. N. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 2 (42), pp. 80–84.

3. Tyupkin M. V. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2006, № 9, pp. 111–113.

4. Kovalev I. V., Tyupkin M. V., Tsarev R. Yu., Tsvetkov Yu. D. *Programmnyye produkty i sistemy*. 2007, № 3, pp. 73–74.

5. Tsvirkun, A. D., Akinfiyev V. K., Filippov V. A. *Imitatsionnoye modelirovaniye v zadachakh sinteza struktury slozhnykh system* (Simulation modeling in the synthesis of the structure of complex systems). Moscow, Nauka, 1985, 173 p.

6. Usoltsev A. A., Antamoshkin O. A., Kovalev I. V. *Vestnik NII SUVPT*. Krasnoyarsk, NII SUVPT, 2003, vol. 12, pp. 60–69.

7. Ostrovskiy G. M. *Sovremennyye metody optimizatsii slozhnykh sistem. Optimizatsiya tekhnicheskikh sistem v usloviyakh neopredelennosti* (Modern methods of optimization of complex systems. Optimization of technical systems in the face of uncertainty). Moscow, MISiS, 2007, 127 p.

8. Usoltsev A. A. *Vestnik NII SUVPT*. Krasnoyarsk, NII SUVPT, 2003, vol. 12, pp. 19–27.

© Царев Р. Ю., Капулин Д. В., Сидорова Г. А., Сержантова М. А., Бесчастная Н. А., 2013

УДК 681.34

### АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННАЯ ПРОЦЕДУРА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ АСУ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ\*

Р. Ю. Царев<sup>1</sup>, А. В. Прокопенко<sup>2</sup>, С. В. Литошик<sup>1</sup>, П. В. Зеленков<sup>1</sup>, В. В. Брезицкая<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: rahatamatahata@mail.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 26а

*Представлено описание моделей и методов поддержки принятия решений при выборе пунктов управления космическими аппаратами связи и навигации, в частности, аналитико-имитационная процедура формирования базового множества пунктов управления космическими аппаратами, включающая имитационную модель отсева варианта структуры по алгоритмически заданным ограничениям на атрибуты.*

*Ключевые слова: формирование структуры АСУ, аналитико-имитационная процедура.*

### ANALYTICAL AND SIMULATION PROCEDURE OF FORMATION OF STRUCTURE OF ACS OF SPACE COMMUNICATION SYSTEMS AND NAVIGATION

R. Yu. Tsarev<sup>1</sup>, A. V. Prokopenko<sup>2</sup>, S. V. Litoshik<sup>1</sup>, P. V. Zelenkov<sup>1</sup>, V. V. Brezitskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: rahatamatahata@mail.ru

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
26a Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia

*The description of models and methods of support of decision-making is presented in article at the choice of points of communication and navigation spacecrafts control, in particular the analytical and simulation procedure of formation of the basic set of points of spacecrafts control, including imitating model of sifting of structure variants according to algorithmically set restrictions on attributes.*

*Keywords: formation of structure of ACS, analytical and simulation procedure.*

\*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0116 «Модели, методы и алгоритмы синтеза и управления развитием кластерных структур АСУ космических систем связи и навигации».

Современные автоматизированные системы управления, в том числе АСУ космических систем связи и навигации, представляют собой сложные системы, характеризующиеся комплексным взаимодействием элементов, рассредоточенных на значительной территории и требующих для своего развития существенных затрат ресурсов и времени [1].

Разработка структуры системы управления при создании новых или совершенствовании существующих АСУ космических систем связи и навигации требует решения таких задач, как выбор существующих или создание новых пунктов управления космическими аппаратами, определение топологической структуры системы, синтез оптимальных по составу программных и аппаратных средств, отвечающих определенным требованиям.

Однако задача формирования структуры таких АСУ, ввиду наличия неопределенности, которая обусловлена динамикой объекта управления, относится к задачам, требующим поддержки принятия решений, при которой информация преобразуется к виду, упрощающему и облегчающему принятие решений.

Анализ различных подходов к синтезу такого рода АСУ показал, что задачи формирования могут быть разбиты на две группы. К первой относятся задачи, связанные с формированием топологической структуры системы, состоящей в определении состава, территориального расположения, типа управляющих узлов и каналов связи между ними. Ко второй группе относятся проблемы распределения функций управления и технических средств между узлами системы.

Решение задач, связанных с рациональным формированием АСУ космических систем связи и навигации, требует создания методологических основ формализации элементов и комплекса в целом, методов декомпозиции системы на подсистемы, построения формализованных моделей и методов формирования АСУ, многомашинных комплексов и сетей связи.

При этом возникают проблемы рационального сочетания моделей для решения задачи синтеза оптимальной структуры АСУ космической системы связи и навигации. Подобный подход приводит к специфическим итеративным процедурам поиска рациональных вариантов комплекса с использованием оптимизационных и имитационных моделей, позволяющих в процессе формирования комплекса оценивать и отбирать необходимые пункты управления космическими аппаратами.

Все это определило актуальность исследований в области разработки моделей и методов поддержки принятия решений при выборе пунктов управления космическими аппаратами связи и навигации, в том числе разработку многоатрибутивных методов принятия решений при многоуровневом проектировании АСУ космических систем.

**Разработка аналитико-имитационной процедуры формирования базового множества пунктов управления космическими аппаратами.** Задачи синтеза структуры сложных систем, в том числе АСУ космических систем связи и навигации, учитывающие ди-

намику функционирования элементов системы, только в простейших случаях могут быть решены аналитическими методами [2]. Использование имитационных моделей позволяет учесть на этапе анализа и синтеза структуры не только статические взаимосвязи между элементами системы, но и динамические аспекты функционирования системы. Методы имитационного моделирования позволяют проанализировать только незначительное количество вариантов изучаемой системы и выбрать среди них в определенном смысле более приемлемый.

При синтезе кластерной структуры АСУ космической системы связи и навигации необходимо обеспечить в процессе моделирования выбор не просто приемлемого, а оптимального варианта системы. Очевидно, что простым перебором вариантов такая задача эффективно не может быть решена.

Учет динамических и стохастических аспектов функционирования АСУ космических систем связи и навигации на этапах анализа и синтеза их структур приводит к необходимости совместного использования оптимизационных и имитационных моделей. Это объясняется тем, что для формализации динамических и стохастических аспектов функционирования систем для большинства практических задач могут быть использованы лишь имитационные модели.

С математической точки зрения, рассматриваемые задачи синтеза структуры АСУ космических систем связи и навигации относятся к классу задач математического программирования, в которых ряд ограничений задан не в явном виде, а алгоритмически с помощью имитационной модели.

Для синтеза структур АСУ космических систем связи и навигации авторами в рамках оптимизационно-имитационного подхода к решению задач структурного построения сложных систем разработан ряд моделей, представленных в данной работе.

Оптимизационно-имитационный подход к синтезу структур АСУ космических систем связи и навигации основан на совместном использовании в процессе поиска оптимального варианта структуры оптимизационных и имитационных моделей. Эти модели описывают как состав и взаимосвязи структурных элементов системы, так и динамические и стохастические аспекты их функционирования.

При выборе способа взаимодействия оптимизационных и имитационных моделей синтеза структуры АСУ космических систем связи и навигации возникает проблема их рационального сочетания. Это приводит к специфическим итеративным процедурам поиска рациональных вариантов структуры системы.

**Модель формирования структуры АСУ космической системы связи и навигации с неаналитически заданными ограничениями.** Использование имитационного моделирования при проектировании сложных систем вызвано необходимостью учета динамических и стохастических характеристик функционирования систем, что затруднено или невозможно в традиционных оптимизационных моделях синтеза структур АСУ космических систем связи и навигации.

Возникающие при этом задачи приводят к моделям, в которых критерии, подлежащие оптимизации, и накладываемые ограничения задаются неаналитически (вербально, графиками, алгоритмами, таблицами данных, полученных экспериментально и т. д.)

Решение задач такого типа применительно к системам со значительным числом варьируемых параметров исключительно сложно и на практике часто сводится к многократно повторяющимся циклам моделирования, анализа и оценки полученных данных, корректировки параметров. Такой способ решения является, однако, не только слишком длительным и непроизводительным с точки зрения затрат машинного времени, но и не всегда может привести к удовлетворительным результатам. Обосновать полученные таким образом результаты трудно, поскольку нельзя определить, в какой мере качество функционирования системы может быть еще улучшено. Поэтому задача построения математически обоснованных процедур целенаправленного перебора вариантов для их последующего улучшения и оптимизации является весьма актуальной.

Задача синтеза структуры АСУ космической системы связи и навигации может быть формализована следующим образом. Обозначим набор структурных параметров, по которым происходит оптимизация системы, вектором  $X$ , через  $F(X)$  – значение функционала эффективности работы системы, которая реализуется при заданном наборе параметров  $X$ . Тогда задача синтеза структуры формализуется следующим образом:

$$\text{extr} F(X)$$

при ограничениях

$$\overline{f}_i(X) \leq 0, i \in I; \quad (1)$$

$$\overline{f}_{i^*}^*(X) \leq 0, i^* \in I^*, \quad (2)$$

где  $\overline{f}_i(X)$  – ограничения, заданные в форме математических выражений;  $\overline{f}_{i^*}^*(X)$  – ограничения, заданные алгоритмически, т. е. выполнение этих ограничений может быть проверено лишь в ходе имитационного моделирования;  $I, I^*$  – множества индексов ограничений.

Рассмотрим в качестве иллюстративного примера задачу выбора и размещения вычислительных ресурсов по распределенной АСУ космической системы связи и навигации с кластерной структурой. Она является типичной и весьма сложной задачей синтеза структуры сложных систем.

Пусть заданная сеть кластеров АСУ космической системы связи и навигации представлена графом  $G(I, U)$ , где  $I$  – множество узлов сети,  $U$  – множество соединяющих их дуг. Пусть в узлах графа  $G$  имеются источники, порождающие случайные потоки заявок на обслуживание с некоторой интенсивностью  $y_i, i \in I$ . При этом заявки, возникающие в первом узле, могут быть обслужены вычислительными ресурсами, имею-

щимися в данном узле, либо направлены в другие узлы системы. Задаются некоторые правила, по которым заявки, не обслуженные в своем узле, перераспределяются между другими узлами системы. Кроме того, задаются правила работы каждого узла.

Задача заключается в таком выборе и распределении технических средств обслуживания  $x_i$  по кластерам АСУ космической системы связи и навигации, чтобы минимизировать некоторый функционал  $F(x_1, \dots, x_n)$  при выполнении ограничений, наложенных на искомый вектор  $X = (x_1, \dots, x_n)$  [3].

Ограничения на  $X$  могут задаваться простыми соотношениями типа  $a_i \leq x_i \leq b_i, i = \overline{1, n}$ , а также  $\sum_{i=1}^n x_i \leq A$ .

В то же время вектор  $X$  определяет выполнение ряда специфичных требований, предъявляемых к функционированию системы. Примером может служить требование ограниченности времени обслуживания заявок некоторой величиной  $T$  или ограниченности загрузки узлов. Ясно, что принадлежность вектора  $X$  допустимому множеству может быть проверена лишь в процессе моделирования, что подчеркивает специфику подобных задач.

Обозначим через  $\overline{\beta}$  множество вариантов кластерных структур АСУ космической системы связи и навигации, допустимых по ограничениям (1), а через  $\overline{\beta}^*$  – множество вариантов кластерных структур, допустимых по неаналитическим ограничениям (2); тогда пространство допустимых вариантов структур  $\beta = \overline{\beta} \cap \overline{\beta}^*$ , где  $\overline{\beta} = \{X : \overline{f}_i(X) \leq 0, i = \overline{1, n}\}$ ,  $\overline{\beta}^* = \{X : \overline{f}_{i^*}^*(X) \leq 0, i^* = \overline{1, I^*}\}$ .

При формализации и решении разнообразных задач синтеза кластерной структуры АСУ космической системы связи и навигации в зависимости от способа задания целевой функции  $F(X)$  и пространства допустимых вариантов структур  $\beta$  могут использоваться различные модели и процедуры формирования кластерной структуры АСУ космической системы связи и навигации.

**Классификация задач формирования кластерной структуры АСУ космических систем связи и навигации.** Модели задач синтеза формирования кластерных структур АСУ космических систем связи и навигации в зависимости от способа задания целевой функции  $F(X)$  и пространства допустимых вариантов структуры  $\beta$  могут быть разбиты на следующие классы.

I. Целевая функция  $F$  и пространство  $\beta$  заданы аналитически ( $\beta = \overline{\beta}$ ).

II. Целевая функция  $F$  задана аналитически, пространство  $\beta$  определяется ограничениями, заданными алгоритмически ( $\beta = \overline{\beta}^*$ ).

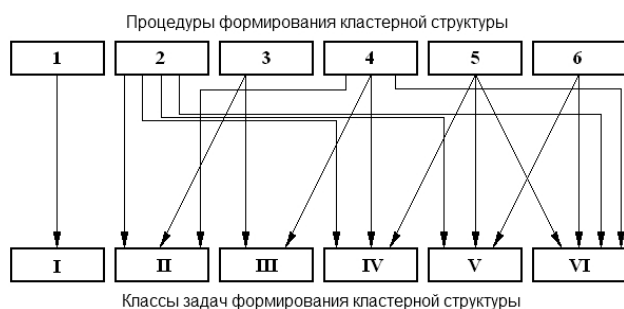
III. Целевая функция  $F$  задана аналитически, пространство  $\beta$  определяется ограничениями, заданными и аналитически и алгоритмически ( $\beta = \overline{\beta} \cap \overline{\beta}^*$ ).

IV. Целевая функция  $F$  задана алгоритмически, пространство задано аналитически ( $\beta = \overline{\beta}$ ).

V. Целевая функция  $F$  и пространство  $\beta$  заданы алгоритмически ( $\beta = \bar{\beta}$ ).

VI. Целевая функция  $F$  задана алгоритмически, пространство  $\beta$  определяется ограничениями, заданными алгоритмически и аналитически ( $\beta = \bar{\beta} \cap \bar{\beta}$ ).

В зависимости от класса модели синтеза могут быть использованы различные процедуры поиска оптимального варианта кластерной структуры АСУ космической системы связи и навигации, отличающиеся друг от друга способом генерации вариантов структуры, правилами проверки аналитически и алгоритмически заданных ограничений и способом перехода к следующему шагу:



Так, процедуры, построенные по типу 1, предназначены для решения задач формирования кластерной структуры АСУ космической системы, формализованных в виде моделей класса I. Результаты решения задачи анализируются исследователями, и в случае необходимости проводится корректировка оптимизационной модели или исходных данных.

Процедуры формирования кластерной структуры АСУ космической системы связи и навигации типа 2 включают имитационные модели и используются для решения задач синтеза структуры, формализованных в виде моделей II, IV, V и VI классов.

Имитационная модель исследуемой системы представляет собой совокупность алгоритмов  $P$ , которая позволяет получить значения целевой функции  $F$ , либо ограничений  $f_i, i = \overline{1, I}$ , или тех и других одновременно для конкретной точки пространства допустимых вариантов структуры  $\beta$ . Для этого осуществляется машинный прогон имитационной модели, отображающей функционирование АСУ космической системы связи и навигации для фиксированного варианта структуры данной АСУ  $X \in \beta$ .

Для разработки схем формирования кластерной структуры АСУ космической системы связи и навигации могут быть использованы методы планирования имитационного эксперимента, к которым относятся различные варианты полнофакторного эксперимента, анализа поверхности отклика и др. [4].

Однако использование этих методов для формирования структуры АСУ космической системы связи и навигации существенно ограничено из-за большого расхода машинного времени при проведении необходимых прогонов имитационной модели. Так, например, при формировании топологической структуры

АСУ космической системы связи и навигации в полнофакторный план имитационного эксперимента с целью выбора оптимального варианта структуры системы должны быть включены 50 факторов, что потребовало бы  $2^{50}$  прогонов модели.

Поэтому используются различные методы направленного имитационного моделирования, позволяющие в ряде случаев существенно сократить перебор вариантов и уменьшить время поиска.

Для решения задач формирования кластерной структуры АСУ космической системы связи и навигации, модели которых включают аналитически заданную целевую функцию и ограничения, заданные аналитически и алгоритмически (модели классов II и III), в работах [5; 6] предложены различные специальные процедуры.

Процедуры типа 3 основаны на последовательном итеративном использовании оптимизационных и имитационных моделей и заключаются в получении с помощью оптимизационных моделей варианта структуры, экстремизирующего целевую функцию  $F$  и удовлетворяющего той части ограничений, которая задана аналитически. Затем найденный вариант структуры с помощью имитационной модели проверяется на допустимость по алгоритмически заданным ограничениям [7]. При удовлетворительном результате проверки найденный вариант считается оптимальным. Иначе проводится анализ и коррекция оптимизационной и имитационной моделей и начальных условий. Процедуры формирования кластерной структуры АСУ космической системы связи и навигации типа 3 обеспечивают нахождение рациональных вариантов структуры, где не всегда позволяют получить оптимальный вариант из-за отсутствия формальных методов коррекции моделей и данных, целенаправленно улучшающих варианты структуры в процессе формирования структуры.

Процедуры типа 4 основаны на использовании имитационных моделей совместно с оптимизационными на различных этапах поиска оптимального варианта кластерной структуры АСУ космической системы связи и навигации и могут использоваться для решения задач синтеза структуры, формализуемых в виде моделей II–IV и VI классов.

Процедуры типа 5 предусматривают включение оптимизационных блоков в имитационную модель системы с целью подбора некоторых структурных параметров АСУ космической системы связи и навигации в процессе имитации.

Процедура типа 6 является комбинацией процедур типа 4 и 5, в которой на различных этапах поиска оптимальной структуры АСУ космической системы связи и навигации совместно применяются имитационные и оптимизационные модели, при чем в имитационных моделях могут присутствовать блоки оптимизации, позволяющие найти оптимальное значение отдельных параметров АСУ.

**Аналитико-имитационная процедура формирования базового множества пунктов управления космическими аппаратами.** Для решения задач формирования структуры АСУ космических систем связи и навигации предлагается использовать оптимизационно-



имитационный подход, основанный на совместном использовании оптимизационных и имитационных моделей в процессе поиска оптимальных вариантов структуры АСУ космической системы связи и навигации.

При создании структуры АСУ космических систем связи и навигации одной из наиболее важных задач является выбор пунктов управления космическими аппаратами. Для решения данной задачи была разработана аналитико-имитационная процедура формирования базового множества пунктов управления космическими аппаратами, которая включает нижеследующие этапы.

*Этап 1.* Генерация варианта структуры АСУ космической системы связи и навигации  $\bar{X}_i$ .

*Этап 2.* Проверка допустимости варианта структуры аналитически заданным ограничениям. Если  $\bar{X}_i \in \bar{\beta}$ , то переход к этапу 3, иначе к этапу 1. Здесь  $\bar{\beta}$  – множество вариантов структур АСУ космической системы связи и навигации, допустимых по аналитически заданным ограничениям.

*Этап 3.* Проведение машинного эксперимента с имитационной моделью системы для допустимого по аналитическим ограничениям варианта структуры  $\bar{X}_i$ . Данная модель отображает функционирование моделируемой системы для различных вариантов структуры. Между этапами 1 и 3 организуется информационный интерфейс для передачи данных об исследуемом варианте структуры  $\bar{X}_i$ .

*Этап 4.* Проверка допустимости варианта структуры  $\bar{X}_i$  алгоритмически заданным ограничениям. Если  $\bar{X}_i \in \bar{\beta}$ , то переход к этапу 5, иначе – к этапу 1. Здесь  $\bar{\beta}$  – множество вариантов структур АСУ космической системы связи и навигации, допустимых по алгоритмически заданным ограничениям.

*Этап 5.* Запоминание варианта, успешно прошедшего этапы 3 и 4.

*Этап 6.* Проверка, все ли варианты структуры проанализированы. Если нет, то переход к этапу 1. В противном случае – выдача полученных результатов и окончание работы процедуры.

В зависимости от класса модели задачи синтеза и вида ее аналитической части могут быть построены различные оптимизационно-имитационные процедуры поиска оптимального варианта структуры, отличающиеся друг от друга способом генерации вариантов структуры, правилами проверки на этапах 2, 4 и 6 и способом перехода к следующей итерации [8].

При выборе кластерной структуры АСУ космических систем связи и навигации задачи формирования, учитывающие динамику функционирования элементов системы, только в простейших случаях могут быть решены аналитическими методами. Использование имитационных моделей позволяет учесть на этапе анализа и синтеза структуры не только статические взаимосвязи между элементами системы, но и динамические аспекты функционирования системы.

Необходимость в учете динамических и стохастических аспектов функционирования АСУ космическими системами связи и навигации на этапах анализа и синтеза их структур приводит совместной реализации оптимизационных и имитационных моделей.

В зависимости от класса моделей формирования структуры АСУ космической системы связи и навигации могут быть использованы различные процедуры поиска оптимального варианта структуры, отличающиеся друг от друга способом генерации вариантов структуры, правилами проверки аналитически и алгоритмически заданных ограничений и способом перехода к следующему шагу.

Выбор пунктов управления при формировании структуры АСУ космической системы представляет собой сложную комбинаторную задачу большой размерности. Для решения данной проблемы была разработана аналитико-имитационная процедура формирования базового множества пунктов управления космическими аппаратами с заданным набором атрибутов для выбора лучшего варианта формирования структуры АСУ космической системы связи и навигации, основанная на совместном использовании оптимизационных и имитационных моделей в процессе поиска оптимального варианта.

#### Библиографические ссылки

1. Тюпкин М. В. Аппаратно-информационные технологии управления космическими аппаратами // Успехи соврем. естествознания. 2006. № 9. С. 111–113.
2. Синтез и управление развитием кластерных структур АСУ космических систем / Р. Ю. Царев, Д. В. Капулин, А. В. Штарик, Е. Н. Штарик // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 2 (42). С. 80–84.
3. Усольцев А. А. Анализ методов структурно-параметрического описания объекта проектирования // Вестник НИИ СУВПТ. 2003. Вып. 12. С. 19–27.
4. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. М. : Статистика, 2008.
5. Тюпкин М. В. Многоатрибутивные методы принятия решений в системном анализе // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 12. С. 48–50.
6. Филиппов В. А., Цвиркун А. Д. Оптимизационно-имитационные процедуры синтеза структур распределенных систем управления. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2000.
7. Филиппов В. А. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К. Имитационное моделирование при синтезе структур сложных систем. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2003.
8. Оптимизационно-имитационный подход к синтезу автоматизированных систем управления / И. В. Ковалев, М. В. Тюпкин, Р. Ю. Царев, Ю. Д. Цветков // Программные продукты и системы. 2007. № 3. С. 73–74.

#### Referens

1. Tyupkin M. V. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniy*. 2006, № 9, pp. 111–113.
2. Tsarev R. Yu., Kapulin D. V., Shtarik A. V., Shtarik Ye. N. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 2 (42), pp. 80–84.

3. Usoltsev A. A. *Vestnik NII SUVPT*. Krasnoyarsk, NII SUVPT, 2003, vol. 12, pp. 19–27.

4. Kleynen Dzh. *Statisticheskiye metody v imitatsionno modelirovanii* (Statistical methods in simulation modeling), Moscow, Statistika, 2008, 306 p.

5. Tyupkin M. V. *Sovremennyye naukoemye tekhnologii*. 2007, № 12, pp. 48–50.

6. Filippov V. A., Tsvirkun A. D. *Optimizatsionno-imitatsionnyye protsedury sinteza struktur raspredelennykh sistem upravleniya* (Optimization-simulation procedure synthesis of structures of distributed control systems). Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2000, 284 p.

7. Filippov V. A., Tsvirkun A. D., Akinfiyev V. K. *Imitatsionnoye modelirovaniye pri sinteze struktur slozhnykh system* (Simulation of the synthesis of the complex system structure). Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 2003, 428 p.

8. Kovalev I. V., Tyupkin M. V., Tsarev R. Yu., Tsvetkov Yu. D. *Programmnyye produkty i sistemy*. 2007, № 3, pp. 73–74.

© Царев Р. Ю., Прокопенко А. В., Литошик С. В., Зеленков П. В., Брезницкая В. В., 2013

УДК 528.88

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ДАННЫХ СПУТНИКА SMOS ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

Е. Г. Швецов<sup>1</sup>, З. Ружичка<sup>2</sup>, В. Л. Миронов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт леса имени В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28. E-mail: eugeneshvetsov@mail.ru

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: tramtara@seznam.cz

<sup>3</sup>Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

Представлены результаты корреляционного анализа влажности поверхности Земли по данным спутника SMOS и уровня пожарной опасности по условиям погоды, рассчитанного по данным наземных метеостанций, расположенных на территории Красноярского края. Для центральных и южных районов края между измеряемой влажностью поверхности и уровнем пожарной опасности получены значения коэффициентов корреляции, равные  $-0,45 \dots -0,7$ . В то же время для северных районов края коэффициенты корреляции имели близкие к нулю или положительные значения. С использованием классификатора GLC2000 определены типы растительности в рассмотренных районах. Сделан вывод, что временные ряды влажности поверхности, полученные по данным спутника SMOS, удовлетворительно описывают динамику изменения уровня пожарной опасности только для территорий, занятых не лесными типами растительности.

**Ключевые слова:** спутник SMOS, влажность поверхности Земли, пожарная опасность.

## INVESTIGATION OF POSSIBILITIES OF USING SMOS DATA FOR FIRE DANGER ASSESSMENT AT THE TERRITORY OF KRASNOYARSK REGION

E. G. Shvetsov<sup>1</sup>, Z. Ruzicka<sup>2</sup>, V. L. Mironov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Sukachev Institute of Forest of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch

<sup>2</sup>Akademgorodok 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: eugeneshvetsov@mail.ru

<sup>2</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: tramtara@seznam.cz

<sup>3</sup>Kirensky Institute of Physics of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: rsdvm@ksc.krasn.ru

The results of correlation analysis of soil moisture, according to SMOS satellite data, and fire danger index, calculated from data measured by weather stations, within the territory of Krasnoyarsk region are presented. For the central and southern parts of Krasnoyarsk region the values of correlation coefficients between soil moisture and fire danger were  $-0.45 \dots -0.7$ . At the same time, correlation coefficients were close to zero or had positive values at the northern area of the region. Vegetation types were identified using GLC2000 classification. It was concluded that time series of soil moisture, obtained by satellite SMOS, satisfactory describe the dynamics of change of level of fire danger indices just for the territories covered by non-forest types of vegetation.

**Keywords:** satellite SMOS, soil moisture, fire danger.

Одна из важнейших задач противопожарного мониторинга – прогнозирование условий, определяющих возможность возникновения и распространения горения в лесах. Оценка пожарной опасности по условиям погоды в основном строится на анализе метеорологических параметров, регистрируемых метеостанциями. Основным недостатком данного метода оценки пожарной опасности – отсутствие регулярной сети метеостанций. Такая ситуация имеет место, например, в Сибири. Анализ существующей сети метеостанций показывает, что необходимо проводить интерполяцию в зоне до 100...150 км между метеостанциями, что накладывает ограничение на корректность картосхем распределения уровня пожарной опасности на всю территорию Сибири. Для решения этой задачи необходимо иметь возможность геопространственного анализа распределения показателей влажности лесных горючих материалов, который может быть выполнен только с привлечением данных дистанционного спутникового мониторинга.

В 2009 г. был запущен космический аппарат SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) Европейского космического агентства, оснащенный микроволновым радиометром, работающим на частоте 1,4 ГГц. Аппарат предназначен для мониторинга влажности поверхности суши и солености воды в Мировом океане. Полный охват всей поверхности Земли осуществляется с периодичностью 2...3 дня с пространственным разрешением порядка 43 км и точностью оценки объемного влагосодержания  $0,04 \text{ м}^3 \text{ м}^{-3}$  [1].

За прошедшее с момента запуска аппарата SMOS время был проведен ряд исследований, направленных на проверку как продуктов уровня L1c (измерения радиояркостной температуры), так и уровня L2 (измерения влажности почвы) [2–4]. Результаты этих исследований свидетельствуют о том, что уровень достоверности оценок влажности и радиояркостных температур, измеряемых SMOS, может различаться в зависимости от региона и времени года.

Основной целью данной работы являлся анализ применимости данных SMOS для оценки уровня пожарной опасности по условиям погоды на территории Красноярского края.

**Методы исследования.** Исследование заключалось в проведении временного и геопространственного анализа изменения влажности поверхности, а также сопряженный анализ показателей пожарной опасности по условиям погоды.

Для оценки влажности наземного покрова использовались измерения радиометра MIRAS, установленного на борту космического аппарата SMOS. В работе использовались данные SMOS уровня 2, содержащие оценки влажности поверхности. Влажность восстанавливается на основе измеренных космическим аппаратом угловых зависимостей радиояркостной температуры [5].

Индексы пожарной опасности по условиям погоды могут использоваться в качестве косвенной оценки влажности территории, так как они учитывают количество выпавших осадков и сумму температур воздуха, влияющую на скорость испарения влаги. Уровень пожарной опасности по условиям погоды характеризовался с помощью канадской системы CFFWIS (Canadian Forest Fire Weather Index System) [6] и рос-

сийского индекса пожарной опасности ПБ-1 [7]. Расчет этих индексов пожарной опасности требует наличия ежедневных метеорологических данных. Такие данные брались из сети метеостанций NOAA NCDC.

Используемая база данных содержит информацию о влажности поверхности и метеорологические данные за пожарные сезоны 2010–2012 гг. Район исследований включал в себя территорию Красноярского края, а также республик Хакасия и Тува.

Проведен корреляционный анализ временных рядов показателей пожарной опасности по условиям погоды и измерений влажности подстилающей поверхности по данным SMOS в окрестности метеостанций, расположенных на исследуемой территории.

**Обсуждение результатов. Влажность поверхности и уровень пожарной опасности.** Уровень пожарной опасности по условиям погоды оценивался с применением данных наземных метеостанций, расположенных на территории Красноярского края, республик Тува и Хакасия, за 2010–2012 гг. Использовались данные с 16 станций, расположенных по всей рассматриваемой территории.

В работе использовались индексы пожарной опасности канадской системы CFFWIS и российский индекс ПБ-1.

Канадская система оценки пожарной опасности по условиям погоды содержит коды влажности, описывающие влагосодержание трех комплексов растительных горючих материалов: тонких материалов верхних слоев лесной подстилки, материалов органического слоя подстилки и материалы уплотненного слоя оторфированной подстилки. Помимо этого система содержит индексы, описывающие поведение пожара. Итоговый индекс FWI – индекс пожарной опасности погоды [6]. Он рассматривался в данной работе.

Российский показатель влажности ПБ-1 является модификацией комплексного показателя горимости В. Г. Нестерова. При расчете данного индекса происходит ежедневное суммирование величины влагодефицита, выраженного разностью температуры воздуха и температуры точки росы. В случае выпадения осадков используется дифференцированный коэффициент, уменьшающий величину индекса.

Влажность подстилающей поверхности по данным спутника SMOS оценивалась по ближайшим к метеостанции территориям. Временной ряд данных SMOS формировался из ежедневных измерений, соответствующих узлам сетки данных SMOS, расположенным в радиусе 16 км от метеостанции. По значениям влажности в этих точках рассчитывалось среднее значение. Временные ряды формировались за период с 1 мая по 31 августа каждого года, т. е. за период максимальной пожарной активности.

В процессе анализа использовались данные только утренних проходов спутника SMOS. Это сделано, чтобы избежать ошибок, связанных с существенными различиями влажности, имеющими место между утренними и вечерними измерениями, которые могут наблюдаться даже в отсутствии осадков. На рис. 1 представлены значения влажности поверхности, измеренные SMOS во время утренних и вечерних проходов. Представлены измерения, сделанные в те дни, когда метеостанциями не регистрировалось выпадение осадков, т. е. значения влажности не должны были существенно различаться.

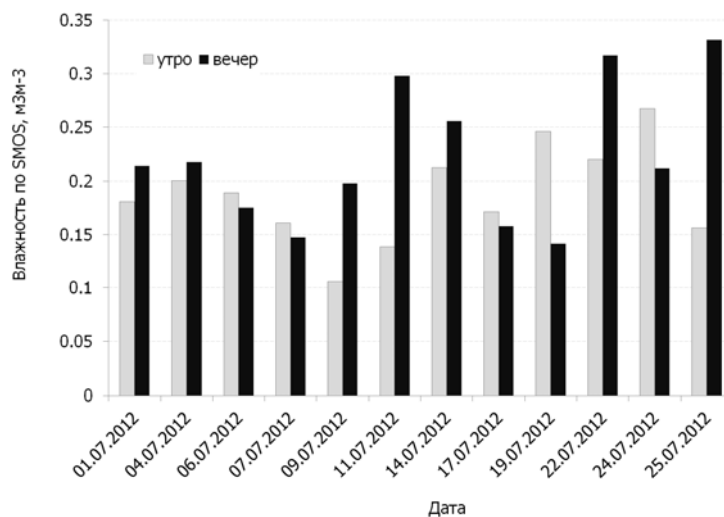


Рис. 1. Значение влажности, зафиксированные спутником SMOS, во время утренних и вечерних пролетов (примерно 06 и 18 часов по местному времени). Данные приведены для метеостанции Сым за те дни, когда выпадения осадков не регистрировалось

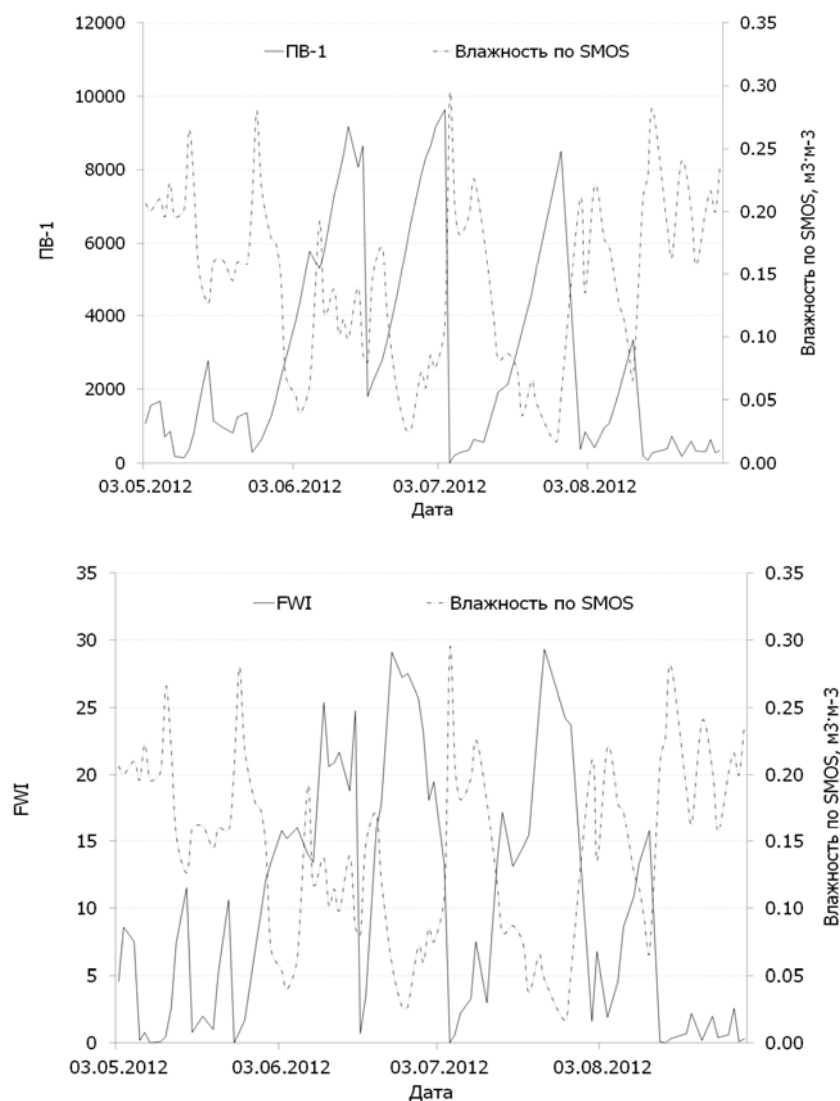


Рис. 2. Графики влажности поверхности для метеостанции Минусинск по данным SMOS и индекса ПВ-1 (вверху) индекса FWI (внизу). Исключены дни с отсутствующими измерениями влажности поверхности. Коэффициенты корреляции для индексов ПВ-1 и FWI составили  $-0,71$  и  $-0,82$ , соответственно

**Значения коэффициентов корреляции для метеостанций, расположенных в южных и западных районах Красноярского края, Туве и Хакасии**

| Станция     | Год   |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | ПВ-1  |       |       | FWI   |       |       |
|             | 2010  | 2011  | 2012  | 2010  | 2011  | 2012  |
| Эрзин       | –0,50 | –0,50 | –0,40 | –0,63 | –0,68 | –0,38 |
| Кызыл       | –0,59 | –0,64 | –0,39 | –0,56 | –0,70 | –0,57 |
| Таштып      | –0,43 | –0,32 | –0,40 | –0,26 | –0,09 | –0,38 |
| Минусинск   | –0,48 | –0,72 | –0,71 | –0,46 | –0,66 | –0,82 |
| Ермаковское | 0,07  | –0,27 | –0,41 | 0,12  | –0,05 | –0,39 |
| Ужур        | –0,69 | –0,71 | –0,68 | –0,67 | –0,70 | –0,81 |

Однако фактические измерения влажности, сделанные в утренние и вечерние часы, могут отличаться иногда в два раза и более. При этом вечерние измерения обычно дают более высокие значения влажности. Подобные расхождения между утренними и вечерними наблюдениями также отмечаются в литературе, где в качестве возможных причин таких различий называются как проблемы технического характера, так и изменение объемного влагосодержания растительности [8].

Предварительный анализ также показал, что утренние измерения влажности дают наилучшую корреляцию с уровнем пожарной опасности по условиям погоды по сравнению с вечерними или средними за сутки значениями влажности.

Сопоставление временных рядов влажности поверхности и рассчитанных индексов пожарной опасности показало наличие связи между ними для южных и западных районов Красноярского края, Тувы и Хакасии. На рис. 2 представлены графики влажности поверхности и индексов пожарной опасности для метеостанции Минусинск для 2012 года.

Увеличение влажности почвы, регистрируемой спутником SMOS, сопровождалось снижением уровня пожарной опасности по условиям погоды, т. е. коэффициенты корреляции имели отрицательные значения (табл. 1).

При этом в большинстве случаев абсолютные значения коэффициентов корреляции для двух индексов пожарной опасности были примерно равны или коэффициенты для FWI были несколько выше, чем для индекса ПВ-1. Например, для метеостанции Минусинск значения коэффициентов корреляции между индексом ПВ-1 и влажностью наземного покрова составили –0,48, –0,72 и –0,71 для 2010, 2011 и 2012 гг. соответственно. В то же время коэффициенты корреляции между влажностью и канадским индексом FWI за соответствующие годы имели следующие значения: –0,46, –0,66 и –0,82. Похожая ситуация имела место и для других станций. Следует также отметить наличие межгодовых вариаций коэффициентов корреляции для рассмотренных метеостанций.

Можно выделить две метеостанции, Таштып и Ермаковское, на которых наблюдалась слабая зависимость между уровнем влажности, измеряемым спутником SMOS, и уровнем пожарной опасности. В ряде случаев наблюдались близкие к нулю или даже положительные значения.

Проанализированы типы растительного покрова вблизи рассмотренных метеостанций. В качестве карты растительности использована классификация GLC2000 (Global Land Classification), созданная в Объединенном исследовательском центре при Европейской комиссии по данным спутника SPOT4. Области исследования соответствует фрагмент для территории северной Евразии [9].

Можно отметить, что вблизи метеостанций, по которым наблюдаются более высокие абсолютные значения коэффициентов корреляции, преобладают главным образом, степи или сельскохозяйственные территории, т. е. территории с не лесными типами растительности. При этом в случае станций Таштып и Ермаковское растительный покров более неоднородный, с присутствием значительных лесных участков (рис. 3). Возможно, данный фактор оказывает влияние на наблюдаемые расхождения в динамике изменения индексов пожарной опасности и влажности наземного покрова, однако для более точного определения причин такого различия в значениях коэффициентов корреляции необходимы дополнительные исследования.

Аналогичная процедура сопоставления временных рядов измеренной влажности поверхности и индексов пожарной опасности проведена для нескольких метеостанций, расположенных в центральных и северных районах Красноярского края. В этом случае зависимости между указанными рядами были менее выражены. Если для метеостанций, расположенных в центральных районах края, значения коэффициентов корреляции еще были достаточно высокими, на уровне –0,5, превышая в ряде случаев –0,6, то для северных районов значения коэффициентов корреляции находились в районе нуля или были положительными (табл. 2).

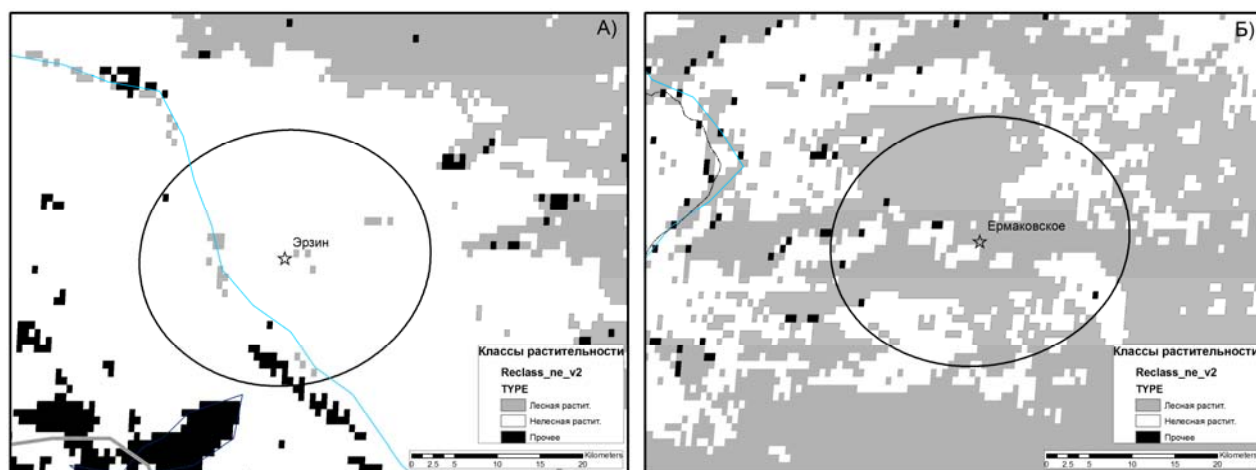


Рис. 3. Типы растительных покровов около метеостанций Эрзин (слева), Ермаковское (справа).  
В качестве карты растительности использована классификация Global Land Classification (GLC2000)

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции для метеостанций, расположенных  
в центральных и северных районах Красноярского края

| Станция       | Год   |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | ПВ-1  |       |       | FWI   |       |       |
|               | 2010  | 2011  | 2012  | 2010  | 2011  | 2012  |
| Красноярск    | -0,56 | -0,40 | -0,53 | -0,53 | -0,34 | -0,64 |
| Колба         | 0,21  | 0,26  | 0,40  | 0,32  | 0,42  | 0,43  |
| Агинское      | -0,13 | -0,30 | -0,33 | 0,02  | -0,09 | -0,15 |
| Боготол       | -0,10 | -0,24 | -0,56 | 0,13  | -0,05 | -0,57 |
| Канск         | -0,36 | -0,67 | -0,52 | -0,16 | -0,65 | -0,61 |
| Большая Мурта | -0,25 | -0,49 | -0,45 | -0,11 | -0,42 | -0,48 |
| Енисейск      | 0,11  | 0,42  | -0,02 | 0,16  | 0,48  | 0,17  |
| Богучаны      | 0,20  | 0,39  | 0,01  | 0,27  | 0,56  | 0,20  |
| Ярцево        | 0,18  | 0,33  | -0,07 | 0,27  | 0,38  | -0,01 |
| Сым           | -0,33 | -0,04 | -0,18 | -0,29 | 0,04  | -0,19 |

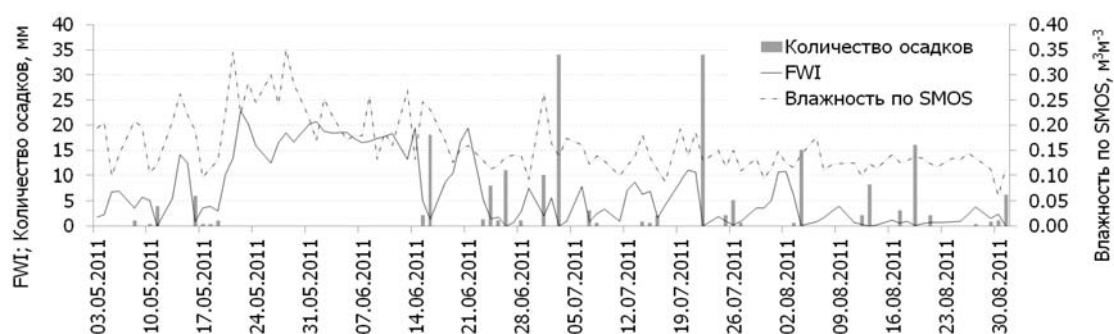


Рис. 4. Динамика индекса FWI и влажности подстилающей поверхности по данным SMOS для метеостанции Богучаны. Столбцами отмечено количество выпавших за день осадков

Для метеостанций, расположенных на территориях, покрытых лесом, имели место близкие к нулю или положительные значения коэффициента корреляции. Как видно из рис. 4, рост индекса пожарной опасности часто сопровождался ростом регистрируемой влажности. При этом даже выпадение значительного количества осадков не всегда приводило к заметному росту уровня влажности. В ряде случаев наблюдалось снижение влажности даже несмотря на выпадение

осадков. Это можно объяснить тем, что осадки выпадали уже после пролета спутника в этот день. Однако в последующие дни также не наблюдалось существенного увеличения уровня влажности, хотя значение индекса пожарной опасности падало до нуля. Подобные ситуации видны на графике в конце июля – августе.

Так же, как и в случае южных районов, достаточно хорошая зависимость между влажностью подстилающей поверхности и уровнем пожарной опасности

наблюдалась для метеостанций, расположенных на территориях, занятых, согласно классификатору типов наземных покровов GLC2000, сельскохозяйственными землями. К таким станциям можно отнести Красноярск и Канск. Более низкие абсолютные значения коэффициентов корреляции наблюдались для метеостанций Боготол и Большая Мурта. В окрестности этих станций присутствовали как сельскохозяйственные территории, так и лесные участки.

Результаты проведенного анализа данных по влажностному состоянию подстилающей поверхности, полученных с помощью спутника SMOS, показали возможность их использования для оценки уровня пожарной опасности по условиям погоды для южных и частично центральных районов Красноярского края. В этих районах преобладают такие типы подстилающей поверхности, как степи и сельскохозяйственные земли. Коэффициенты корреляции между временными рядами измерений влажности и индексов пожарной опасности имели значения на уровне  $-0,5 \dots -0,7$ .

В то же время для районов, в которых преобладают лесные типы растительности, динамика индексов пожарной опасности по условиям погоды уже не соответствовала изменению динамики влажности. Коэффициенты корреляции между этими временными рядами были близкими к нулю, а в ряде случаев и положительными. Такая ситуация наблюдалась главным образом в северных районах края. Это свидетельствует о том, что используемый в настоящее время алгоритм оценки влажности дает существенную погрешность для территорий, покрытых лесом.

Таким образом, данные спутника SMOS могут быть полезными при оценке уровня пожарной опасности на южных территориях, где преобладают не лесные типы наземного покрова. При этом на территориях с преобладанием лесов пока не удалось выявить зависимости, позволяющей выполнять оценку пожарной опасности по измерениям SMOS, хотя наибольший интерес такая оценка представляет именно для покрытых лесом территорий. Полученные в данной работе результаты подтверждают актуальность проблемы создания алгоритма восстановления влажности по данным SMOS на территориях, покрытых лесом.

## References

1. Kerr Y. H., Waldteufel P., Wigneron J. P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., and Mecklenburg S. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle, P. IEEE, 98, 2010, pp. 666–687.
2. Bircher S., Balling J. E., Skou N., and Kerr Y. H. Validation of SMOS Brightness Temperatures During the HOBE Airborne Campaign, Western Denmark, IEEE T. Geosci. Remote Sens., 50, 1468–1482, doi:10.1109/tgrs.2011.2170177, 2012.
3. Jackson T. J., Bindlish R., Cosh M. H., Zhao T., Starks P. J., Bosch D. D., Seyfried M., Moran M. S., Goodrich D. C., Kerr Y. H., and Leroux D. Validation of Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Soil Moisture Over Watershed Networks in the US, IEEE T. Geosci. Remote Sens., 50, 1530–1543, doi:10.1109/tgrs.2011.2168533, 2012.
4. Schlenz F., dall'Amico J. T., Mauser W., and Loew A. Analysis of SMOS brightness temperature and vegetation optical depth data with coupled land surface and radiative transfer models in Southern Germany, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 9, 5389–5436, doi:10.5194/hessd-9-5389-2012, 2012.
5. Kerr Y. H., Waldteufel P., Richaume P., Davenport P., Ferrazzoli P., and Wigneron J.-P. SMOS level 2 Processor Soil Moisture Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) V 3.5, CBSA, UoR, TV and INRA, Toulouse, 2011.
6. Van Wagner C. E. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Can. For. Serv., Petawawa. Techn. Rep. 35. Ontario, 1987. 37 p.
7. Vonskij S. M., Zhdanko V. A., Korbut V. I., Semenov M. M., Tetjusheva L. V., Zavgorodnjaja L. S. *Opredelenie prirodnoj požarnoj opasnosti v lesu* (Determination of natural fire danger in the forest). Leningrad, LenNIILH, 1975, 40 p.
8. Rowlandson T. L., Hornbuckle B. K., Bramer L. M., Patton J. C. and Logsdon S. D. Comparisons of Evening and Morning SMOS Passes Over the Midwest United States, IEEE T. Geosci. Remote Sens., 50, 1544–1555, doi:10.1109/tgrs.2011.2178158, 2012.
9. Bartalev S. A., Erchov D. V., Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived land cover map of Northern Eurasia. International Journal of Remote Sensing. 2003, vol. 24, № 9. pp. 1977–1982.

© Швецов Е. Г., Ружичка З., Миронов В. Л., 2013

УДК 519.95

# ОБ ОБОБЩЕННОЙ РАЗРЕШИМОСТИ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ С ПСЕВДОПАРАБОЛИЧЕСКИМ ОПЕРАТОРОМ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ

Т. К. Юлдашев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: tursunbay@rambler.ru

*Доказываются теоремы об обобщенной разрешимости смешанной задачи для нелинейного дифференциального уравнения с псевдопараболическим оператором произвольной натуральной степени.*

*Ключевые слова: обобщенная разрешимость, интегральное тождество, система нелинейных интегральных уравнений, метод последовательных приближений.*

## ON GENERALIZED SOLVABILITY OF MIXED VALUE PROBLEM FOR NONLINEAR EQUATION WITH PSEUDOPARABOLIC OPERATOR OF HIGHER POWER

T. K. Yuldashev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: tursunbay@rambler.ru

*In this article the author proves the theorems about the generalized solvability of mixed value problem for nonlinear partial differential equations with pseudoparabolic operator of arbitrary natural power.*

*Keywords: generalized solvability, integral identity, system of nonlinear equations, method of successive approximations.*

В области  $D$  рассматривается уравнение

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + (-1)^m \nu \frac{\partial^{2m+1}}{\partial t \partial x^{2m}} + \nu \mu \frac{\partial^{4m+1}}{\partial t \partial x^{4m}} + \frac{\partial^{4m}}{\partial x^{4m}} \right)^n \times$$

$$\times u(t, x) = f(t, x, u(t, x)) \quad (1)$$

с начальными

$$u(t, x)|_{t=0} = \varphi_1(x),$$

$$\frac{\partial^{j-1}}{\partial t^{j-1}} u(t, x)|_{t=0} = \varphi_j(x), \quad j = \overline{2, n} \quad (2)$$

и граничными условиями

$$u(t, x)|_{x=0} = u_{xx}(t, x)|_{x=0} = \dots =$$

$$= \frac{\partial^{2(2nm-1)}}{\partial x^{2(2nm-1)}} u(t, x)|_{x=0} = \int_0^l u(t, y) dy =$$

$$\int_0^l u_{yy}(t, y) dy = \dots = \int_0^l \frac{\partial^{2(2nm-1)}}{\partial y^{2(2nm-1)}} u(t, y) dy = 0, \quad (3)$$

где

$$f(t, x, u) \in C(D \times R), \quad \varphi_j(x) \in C^{2nm+1}(D_l),$$

$$\varphi_j(x)|_{x=0} = \varphi_j''(x)|_{x=0} = \dots = \varphi_j^{(4nm-2)}(x)|_{x=0} =$$

$$\int_0^l \varphi_j(y) dy = \int_0^l \varphi_j''(y) dy = \dots = \int_0^l \varphi_j^{(4nm-2)}(y) dy = 0,$$

$$= \int_0^l \varphi_j^{(4nm-2)}(y) dy = 0, \quad j = \overline{1, n},$$

$$D \equiv D_T \times D_l, \quad D_T \equiv [0, T], \quad D_l \equiv [0, l],$$

$$0 < l < \infty, \quad 0 < T < \infty, \quad 0 < \nu, \mu -$$

малые параметры,  $n, m$  – натуральные числа.

Следует отметить, что изучению разного типа линейных и нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных и их систем посвящено много работ и при этом применены разные методы (см., например [1–4]). В данной работе, как и в работах [5; 6], используется метод разделения переменных, основанный на поиске решения смешанной задачи (1)–(3) в виде

$$u(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \cdot b_i(x), \quad (4)$$

$$\text{где } b_i(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \lambda_i x, \quad \lambda_i = \frac{2i\pi}{l}.$$

$$\text{Множество } \{a(t) = (a_i(t)) \mid a_i(t) \in C(D_T), i = 1, 2, \dots\}$$

введением нормы

$$\|a(t)\|_{B_2(T)} = \left[ \sum_{i=1}^{\infty} \left( \max_{t \in D_T} |a_i(t)| \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$



становится банаховым пространством и обозначается через  $B_2(T)$ .

Наряду с пространством  $B_2(T)$  рассмотрим и пространство  $B_2^N(T)$  с нормой

$$\|a(t)\|_{B_2^N(T)} = \left[ \sum_{i=1}^N \left( \max_{t \in D_T} |a_i^N(t)| \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Для каждого элемента  $a(t) \in B_2(T)$  определяется

$$\text{оператор: } Qa(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \cdot b_i(x).$$

Обозначено через  $E_2(D)$  множество значений оператора  $Q$ . Здесь очевидно, что  $Q: B_2(T) \rightarrow E_2(D)$  и  $E_2(D) \subset L_2(D)$ .

Обозначается через  $W_2^{(k)}(D)$  множество функций  $\Phi(t, x)$  таких, что  $\Phi(t, x), \frac{\partial^2}{\partial x^2} \Phi(t, x), \dots, \frac{\partial^{2(2nm-1)}}{\partial x^{2(2nm-1)}} \Phi(t, x)$  при фиксированном  $t \in D_T$  принадлежат области определения оператора  $\frac{\partial^{4nm-2}}{\partial x^{4nm-2}}$ , имеют производные порядка  $k$  по  $t$ , принадлежащие  $L_2(D)$ , и обращаются в нуль при  $t \geq T - \delta$  ( $0 < \delta$  – зависит от  $\Phi(t, x)$ ).

**Определение.** Если функция  $u(t, x) \in E_2(D)$  удовлетворяет интегральному тождеству

$$\begin{aligned} & \int_0^T \int_0^l \left\{ u(t, y) \left[ \frac{\partial^n}{\partial t^n} \Phi + n \frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{4m}} \Phi + \right. \right. \\ & \quad + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+4m}}{\partial t^{n-2} \partial y^{4m+2}} \Phi + \dots + \\ & \quad + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{4nm-2}}{\partial t^2 \partial y^{4nm-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm-1}}{\partial t \partial y^{4nm-2}} \Phi + \frac{\partial^{4nm}}{\partial y^{4nm}} \Phi + \\ & \quad + v \left( \frac{\partial^{n+2m}}{\partial t^n \partial y^{2m}} \Phi + n \frac{\partial^{n+6m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{6m}} \Phi + \right. \\ & \quad + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+6m}}{\partial t^{n-2} \partial y^{6m+2}} \Phi + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \times \\ & \quad \times \frac{\partial^{4nm+2m-2}}{\partial t^2 \partial y^{4nm+2m-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm+2m-1}}{\partial t \partial y^{4nm+2m-2}} \Phi \Big) + \\ & \quad + v \mu \left( \frac{\partial^{n+4m}}{\partial t^n \partial y^{4m}} \Phi + n \frac{\partial^{n+8m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{8m}} \Phi + \right. \\ & \quad + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+8m}}{\partial t^{n-2} \partial y^{8m+2}} \Phi + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \times \\ & \quad \times \frac{\partial^{4nm+4m-2}}{\partial t^2 \partial y^{4nm+4m-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm+4m-1}}{\partial t \partial y^{4nm+4m-2}} \Phi \Big) - f \Phi \Big\} dy dt = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & = \int_0^l \Phi_1(y) \left[ \frac{\partial^{n-1}}{\partial t^{n-1}} \Phi + n \frac{\partial^{n+4m-2}}{\partial t^{n-2} \partial y^{4m}} \Phi + \right. \\ & \quad + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-3} \partial y^{4m+2}} \Phi + \\ & \quad + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{4nm-3}}{\partial t \partial y^{4nm-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm-2}}{\partial y^{4nm-2}} \Phi + \\ & \quad + v \left( \frac{\partial^{n+2m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{2m}} \Phi + n \frac{\partial^{n+6m-2}}{\partial t^{n-2} \partial y^{6m}} \Phi + \right. \\ & \quad + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+6m-1}}{\partial t^{n-3} \partial y^{6m+2}} \Phi + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \times \\ & \quad \times \frac{\partial^{4nm+2m-3}}{\partial t \partial y^{4nm+2m-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm+2m-2}}{\partial y^{4nm+2m-2}} \Phi \Big) + \\ & \quad + v \mu \left( \frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{4m}} \Phi + n \frac{\partial^{n+8m-2}}{\partial t^{n-2} \partial y^{8m}} \Phi + \right. \\ & \quad + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+8m-1}}{\partial t^{n-3} \partial y^{8m+2}} \Phi + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \times \\ & \quad \times \frac{\partial^{4nm+4m-3}}{\partial t \partial y^{4nm+4m-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm+4m-2}}{\partial y^{4nm+4m-2}} \Phi \Big) \Big] dy - \\ & \quad - \dots + \int_0^l \Phi_{n-1}(y) \left[ \frac{\partial}{\partial t} \Phi + n \frac{\partial^{4m}}{\partial y^{4m}} \Phi + \right. \\ & \quad + v \left( \frac{\partial^{2m+1}}{\partial t \partial y^{2m}} \Phi + n \frac{\partial^{6m}}{\partial y^{6m}} \Phi \right) + \\ & \quad + v \mu \left( \frac{\partial^{4m+1}}{\partial t \partial y^{4m}} \Phi + n \frac{\partial^{8m}}{\partial y^{8m}} \Phi \right) \Big] \times \\ & \quad \times dy - \int_0^l \Phi_n(y) \left[ \Phi + v \frac{\partial^{2m}}{\partial y^{2m}} \Phi + v \mu \frac{\partial^{4m}}{\partial y^{4m}} \Phi \right]_{t=0} dy \end{aligned}$$

для любого  $\Phi(t, x) \in W_2^{(n)}(D)$ , то она называется обобщенным решением смешанной задачи (1)–(3).

Покажем, что коэффициенты разложения  $a_i(t)$  решения смешанной задачи (1)–(3) удовлетворяют следующей счетной системе нелинейных интегральных уравнений (ССНИУ):

$$\begin{aligned} a_i(t) &= w_i(t) + \\ & + \int_0^t \int_0^l f(s, y, Qa(s)) b_i(y) P_i(t, s) dy ds, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} w_i(t) &= \sum_{k=1}^n \Phi_{ki} \frac{t^{k-1}}{(k-1)!} \sum_{j=k}^n \theta_{1i}^{j-k}(v, \mu) \times \\ & \times \frac{t^{j-k}}{(j-k)!} \cdot \exp\{-\theta_{1i}(v, \mu)t\}, \end{aligned}$$

$$P_i(t, s) = \frac{(n-1)!(t-s)^{n-1}}{\theta_{0i}^n(v, \mu)} \cdot \exp\{-\theta_{1i}(v, \mu)(t-s)\},$$



**Теорема 1.** Пусть выполняются следующие условия:

$$1. \int_0^T \left\| f(t, x, Q^N w(t)) \right\|_{L_2(D_I)} dt \leq \Delta < \infty;$$

$$2. f(t, x, u) \in Lip \left\{ L(t, x) \Big|_u \right\},$$

$$\text{где } 0 < \int_0^t \left\| L(s, x) \right\|_{L_2(D_I)} ds < \infty;$$

$$3. \left\| w(t) \right\|_{B_2^N(T)} < \infty,$$

$$\text{где } \left\| w(t) \right\|_{B_2^N(T)} = \left[ \sum_{i=1}^N \left( \max_{t \in D_T} |a_i(t)| \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Тогда УСНИУ (6) имеет единственное решение в пространстве  $B_2^N(T)$ .

*Доказательство.* Используется метод последовательных приближений:

$$\begin{aligned} a_i^0(t) &= w_i(t), \quad t \in D_T, \quad a_i^{k+1}(t) = w_i(t) + \\ &+ \int_0^t \int_0^l f(s, y, Q^N a^k(s)) b_i(y) P_i(t, s) dy ds, \quad k = \\ &= 0, 1, 2, 3, \dots, \quad t \in D_T. \end{aligned} \quad (10)$$

Учет условий теоремы в (10) дает оценки

$$\left\| a^1(t) - a^0(t) \right\|_{B_2^N(T)} \leq M_1 M_2 l^q \Delta, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} &\left\| a^2(t) - a^1(t) \right\|_{B_2^N(T)} \leq \\ &\leq \Delta M_{1,N}^2 M_{2,N}^3 l^{\frac{2}{q}} \int_0^t \left\| L(s, x) \right\|_{L_2(D_I)} ds, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$M_{1,N} = \left\| P(t, s) \right\|_{B_2^N(T)}, \quad M_{2,N} = \left\| b(x) \right\|_{B_2^N(I)}.$$

Продолжая этот процесс для произвольного натурального числа  $k$ , подобно (12) получаем

$$\begin{aligned} &\left\| a^{k+1}(t) - a^k(t) \right\|_{B_2^N(T)} \leq \\ &\leq \left( M_{1,N} l^{\frac{1}{2}} \right)^{k+1} M_{2,N}^{2k+1} \Delta \frac{\left[ \int_0^t \left\| L(s, x) \right\|_{L_2(D_I)} ds \right]^k}{k!}. \end{aligned} \quad (13)$$

Существование решения УСНИУ (6) следует из оценки (13), так как при  $k \rightarrow \infty$  последовательность функций  $\left\{ a^k(t) \right\}_{k=1}^\infty$  сходится равномерно по  $t$  к функции  $a(t) \in B_2^N(T)$ . Для проведения доказательства единственности этого решения в пространстве  $B_2^N(T)$  предполагается, что УСНИУ (6) имеет два

решения:  $a(t) \in B_2^N(T)$  и  $\vartheta(t) \in B_2^N(T)$ . Тогда для их разности справедлива оценка

$$\begin{aligned} &\left\| a(t) - \vartheta(t) \right\|_{B_2^N(T)} \leq M_{1,N} M_{2,N}^2 l^{\frac{1}{2}} \times \\ &\times \int_0^t \left\| L(s, x) \right\|_{L_2(D_I)} \left\| a(s) - \vartheta(s) \right\|_{B_2^N(T)} ds. \end{aligned} \quad (14)$$

Применение к (14) неравенства Гронуолла–Беллмана дает, что  $\left\| a(t) - \vartheta(t) \right\|_{B_2^N(T)} \equiv 0$  для всех  $t \in D_T$ .

Отсюда следует единственность решения УСНИУ (6) в пространстве  $B_2^N(T)$ .

Рассмотрим формулу (4) как следующее предельное соотношение:

$$u(t, x) = \lim_{N \rightarrow \infty} u^N(t, x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N a_i(t) \cdot b_i(x). \quad (4')$$

Подставляя ССНИУ (5) в предел (4'), получим формальное решение смешанной задачи (1)–(3):

$$\begin{aligned} u(t, x) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N \left[ w_i(t) + \int_0^t \int_0^l f(s, y, Q^N a(s)) \times \right. \\ &\times b_i(y) P_i(t, s) dy ds \Big] \cdot b_i(x). \end{aligned} \quad (15)$$

**Теорема 2.** Пусть выполняются условия теоремы 1 и  $\left\| w(t) \right\|_{B_2(T)} < \infty$ . Если  $a(t) \in B_2^N(T)$  является решением УСНИУ (6), то (15) будет обобщенным решением смешанной задачи (1)–(3).

*Доказательство.* Так как  $a(t) \in B_2^N(T)$ , то из равенства  $\lim_{N \rightarrow \infty} u^N(t, x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N a_i(t) \cdot b_i(x) = u(t, x)$

в силу условий теоремы следует, что

$$\lim_{N \rightarrow \infty} f(t, x, u^N(t, x)) = f(t, x, u(t, x)) \quad (16)$$

в смысле метрики  $L_2(D)$ .

Рассмотрим последовательность функционалов:

$$\begin{aligned} V_N &= \int_0^T \int_0^l \left\{ u^N(t, y) \left[ \frac{\partial^n}{\partial t^n} \Phi + n \frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{4m}} \Phi + \right. \right. \\ &+ \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+4m}}{\partial t^{n-2} \partial y^{4m+2}} \Phi + \dots + \\ &+ \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{4nm-2}}{\partial t^2 \partial y^{4nm-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm-1}}{\partial t \partial y^{4nm-2}} \Phi + \frac{\partial^{4nm}}{\partial y^{4nm}} \Phi + \\ &+ v \left( \frac{\partial^{n+2m}}{\partial t^n \partial y^{2m}} \Phi + n \frac{\partial^{n+6m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{6m}} \Phi + \right. \\ &+ \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+6m}}{\partial t^{n-2} \partial y^{6m+2}} \Phi + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \times \\ &\times \left. \frac{\partial^{4nm+2m-2}}{\partial t^2 \partial y^{4nm+2m-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm+2m-1}}{\partial t \partial y^{4nm+2m-2}} \Phi \right) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \nu \mu \left( \frac{\partial^{n+4m}}{\partial t^n \partial y^{4m}} \Phi + n \frac{\partial^{n+8m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{8m}} \Phi + \right. \\
& + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+8m}}{\partial t^{n-2} \partial y^{8m+2}} \Phi + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \times \\
& \times \left. \frac{\partial^{4nm+4m-2}}{\partial t^2 \partial y^{4nm+4m-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm+4m-1}}{\partial t \partial y^{4nm+4m-2}} \Phi \right) + \\
& + f(t, y, u^N(t, y)) \Phi \Big\} dy dt - \int_0^l \varphi_1^N(y) \\
& \times \left[ \frac{\partial^{n-1}}{\partial t^{n-1}} \Phi + n \frac{\partial^{n+4m-2}}{\partial t^{n-2} \partial y^{4m}} \Phi + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-3} \partial y^{4m+2}} \Phi + \right. \\
& + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{4nm-3}}{\partial t \partial y^{4nm-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm-2}}{\partial y^{4nm-2}} \Phi + \\
& + \nu \left( \frac{\partial^{n+2m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{2m}} \Phi + n \frac{\partial^{n+6m-2}}{\partial t^{n-2} \partial y^{6m}} \Phi + \right. \\
& + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{4nm+2m-3}}{\partial t \partial y^{4nm+2m-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm+2m-2}}{\partial y^{4nm+2m-2}} \Phi \Big) + \\
& + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+6m-1}}{\partial t^{n-3} \partial y^{6m+2}} \Phi + \nu \mu \left( \frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{4m}} \Phi + \right. \\
& + n \frac{\partial^{n+8m-2}}{\partial t^{n-2} \partial y^{8m}} \Phi + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+8m-1}}{\partial t^{n-3} \partial y^{8m+2}} \Phi + \\
& + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{4nm+4m-3}}{\partial t \partial y^{4nm+4m-4}} \Phi + \\
& + n \frac{\partial^{4nm+4m-2}}{\partial y^{4nm+4m-2}} \Phi \Big) \Big]_{t=0} dy + \dots - \\
& - \int_0^l \varphi_{n-1}^N(y) \left[ \frac{\partial}{\partial t} \Phi + n \frac{\partial^{4m}}{\partial y^{4m}} \Phi + \right. \\
& + \nu \left( \frac{\partial^{2m+1}}{\partial t \partial y^{2m}} \Phi + n \frac{\partial^{6m}}{\partial y^{6m}} \Phi \right) + \nu \mu \left( \frac{\partial^{4m+1}}{\partial t \partial y^{4m}} \Phi + \right. \\
& + n \frac{\partial^{8m}}{\partial y^{8m}} \Phi \Big) \Big]_{t=0} dy + \int_0^l \varphi_n^N(y) \times \\
& \times \left[ \Phi + \nu \frac{\partial^{2m}}{\partial y^{2m}} \Phi + \nu \mu \frac{\partial^{4m}}{\partial y^{4m}} \Phi \right]_{t=0} dy. \quad (17)
\end{aligned}$$

Интегрируя по частям отдельные слагаемые в (17) и учитывая условия теоремы и начальные условия

$$\begin{aligned}
a_i(0) &= \varphi_{1i}, \quad a_i'(0) = \varphi_{2i}, \\
a_i''(0) &= \varphi_{3i}, \dots, \quad a_i^{(n-1)}(0) = \varphi_{ni},
\end{aligned}$$

получаем

$$\begin{aligned}
V_N &= \int_0^l \left( \varphi_1(y) - \sum_{i=1}^N \varphi_{1i} b_i(y) \right) \times \\
&\times \left[ \frac{\partial^{n-1}}{\partial t^{n-1}} \Phi + n \frac{\partial^{n+4m-2}}{\partial t^{n-2} \partial y^{4m}} \Phi + \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-3} \partial y^{4m+2}} \Phi + \dots + \\
& + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{4nm-3}}{\partial t \partial y^{4nm-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm-2}}{\partial y^{4nm-2}} \Phi + \\
& + \nu \left( \frac{\partial^{n+2m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{2m}} \Phi + n \frac{\partial^{n+6m-2}}{\partial t^{n-2} \partial y^{6m}} \Phi + \right. \\
& + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+6m-1}}{\partial t^{n-3} \partial y^{6m+2}} \Phi + \\
& + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{4nm+2m-3}}{\partial t \partial y^{4nm+2m-4}} \Phi + n \frac{\partial^{4nm+2m-2}}{\partial y^{4nm+2m-2}} \Phi \Big) + \\
& + \nu \mu \left( \frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-1} \partial y^{4m}} \Phi + n \frac{\partial^{n+8m-2}}{\partial t^{n-2} \partial y^{8m}} \Phi + \right. \\
& + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{n+8m-1}}{\partial t^{n-3} \partial y^{8m+2}} \Phi + \\
& + \dots + \frac{n(n-1)}{2} \frac{\partial^{4nm+4m-3}}{\partial t \partial y^{4nm+4m-4}} \Phi + \\
& + n \frac{\partial^{4nm+4m-2}}{\partial y^{4nm+4m-2}} \Phi \Big) \Big]_{t=0} dy - \\
& - \dots + \int_0^l \left( \varphi_{n-1}(y) - \sum_{i=1}^N \varphi_{(n-1)i} b_i(y) \right) \times \\
& \times \left[ \frac{\partial}{\partial t} \Phi + n \frac{\partial^{4m}}{\partial y^{4m}} \Phi + \nu \left( \frac{\partial^{2m+1}}{\partial t \partial y^{2m}} \Phi + n \frac{\partial^{6m}}{\partial y^{6m}} \Phi \right) + \right. \\
& + \nu \mu \left( \frac{\partial^{4m+1}}{\partial t \partial y^{4m}} \Phi + n \frac{\partial^{8m}}{\partial y^{8m}} \Phi \right) \Big]_{t=0} dy - \\
& - \int_0^l \left( \varphi_n(y) - \sum_{i=1}^N \varphi_{ni} b_i(y) \right) \times \\
& \times \left[ \Phi + \nu \frac{\partial^{2m}}{\partial y^{2m}} \Phi + \nu \mu \frac{\partial^{4m}}{\partial y^{4m}} \Phi \right]_{t=0} dy + \\
& + \int_0^T \int_0^l \Phi(t, y) \left[ f(t, y, Qa(t)) - \right. \\
& - \sum_{i=1}^N \int_0^l f(t, z, Q^N a(t)) \cdot b_i(z) dz \Big] b_i(y) dy dt. \quad (18)
\end{aligned}$$

Очевидно, что первые  $n$  интегралы в (18) стремятся к нулю при  $N \rightarrow \infty$ , так как  $\varphi_j(x) \in L_2(D_l)$ ,  $j = \overline{1, n}$ . Сходимость последней разности в (18) при  $N \rightarrow \infty$  следует из (16). Отсюда ясно, что  $\lim_{N \rightarrow \infty} V_N = 0$ . Это и доказывает теорему.

#### Библиографические ссылки

1. Ладыженская О. А., Солонников В. А., Уралцева Н. Н. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. М.: Наука, 1967.

2. Нахушев А. М. Об одном приближенном методе решения краевых задач для дифференциальных уравнений и его приложения к динамике почвенной влаги и грунтовых вод // Дифференц. уравнения. 1982. Т. 18, № 1. С. 72–81.

3. Похожаев С. И. Об априорных оценках и градиентных катастрофах гладких решений гиперболических систем законов сохранения // Тр. МИ РАН. 2003. Т. 243. С. 257–288.

4. Пулькина Л. С. Смешанная задача с интегральным условием для гиперболического уравнения // Мат. заметки. 2003. Т. 74, № 3. С. 435–445.

5. Юлдашев Т. К. Смешанная задача для нелинейного интегро-дифференциального уравнения, содержащего куб параболического оператора // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 2 (35). С. 96–100.

6. Юлдашев Т. К. Смешанная задача для нелинейного дифференциального уравнения четвертого порядка с малым параметром при параболическом опе-

раторе // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2011. Т. 51, № 9. С. 1703–1711.

#### Referens

1. Ladyzhenskaya O. A., Solonnikov V. A., Ural'tseva N. N. *Lineynyye i kvazilineynyye uravneniya parabolicheskogo tipa* (Linear and quasilinear equations of parabolic type). Moscow, Nauka, 1967, 736 p.

2. Nakhushhev A. M. *Differents. uravn.* 1982, vol. 18, № 1, pp. 72–81.

3. Pokhozhayev S. I. *Trudy MI RAN.* 2003, vol. 243, pp. 257–288.

4. Pulkina L. S. *Mat. zametki.* 2003, vol. 74, № 3, pp. 435–445.

5. Yuldashev T. K. *Vestnik SibGAU.* 2011, № 2 (35), pp. 96–100.

6. Yuldashev T. K. *Zhurn. vychisl. matematiki i mat. fiziki.* 2011, vol. 51, № 9, pp. 1703–1711.





РАЗДЕЛ  
2



АВИАЦИОННАЯ  
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ  
ТЕХНИКА



УДК 681.51

## ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Э. И. Дружинин<sup>1</sup>, М. В. Лукьяненко<sup>2</sup>, Е. Н. Якимов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики систем и теории управления Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134. E-mail: ed.druzhynin@gmail.com

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

<sup>3</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени М. Ф. Решетнева  
Россия, 662972, Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: yen@iss-reshetnev.ru

*Предложен новый подход к проблеме уточнения параметров аналитической модели по данным системы измерения текущего состояния конструкции в процессе ее эксплуатации. Этот подход содержит этап определения модальных параметров модели на базе отождествления выхода идентифицируемой модели с выходом – измеряемым состоянием в условиях эксплуатации конструкции и этап, когда на базе полученных сведений о частотном спектре и данных об аналитической модели, используемых в качестве недостающей информации, производится уточнение параметров полученной расчетной модели. Высокоточная корректировка аналитической модели произведена из условия минимальности поправок, сближающих динамику модели с динамикой реальной конструкции. Применение данного метода позволяет обеспечить выполнение повышенных требований к точности построения и исследования модели динамики космического аппарата.*

*Ключевые слова:* космическая конструкция, аналитическая модель, упругие колебания, динамическая модель, модальные параметры, юстировка расчетной модели, идентификация параметров модели.

## IDENTIFICATION OF DYNAMIC MODELS OF SPACE CONSTRUCTIONS ACCORDING TO ACTUAL TEST DATA

E. I. Druzhynin<sup>1</sup>, M. V. Lukyanenko<sup>2</sup>, E. N. Yakimov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of System Dynamics and Control Theory of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
134 Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia. E-mail: ed.druzhynin@gmail.com

<sup>2</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

<sup>3</sup>JSC “Information Satellite Systems” named after academician M. F. Reshetnev  
52 Lenin st., Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: yen@iss-reshetnev.ru

*A new approach to analytic model parameter adjustment according to the data obtained by the system of current construction state measurement during its operation is proposed. This approach contains the stage of the determination of modal model parameters on the basis of identification of the model output with measured state-output when construction is being operated, and the stage when the adjustment of the obtained computing model parameters are carried out on the basis of acquired data on the frequency spectrum and data of analytic model, used as deficient information. High definition correction of the analytical model is performed from the DCC of the corrections which pull together the model and the real construction dynamic behaviors. Use of this method allows to provide the requirements for spacecraft dynamic model development and investigation accuracy.*

*Keywords:* space construction, analytic model, elastic vibrations, dynamic model, modal parameters, computing model adjustment, model parameters identification.

При больших геометрических размерах современных космических аппаратов (КА) в сочетании с малой массой упругие колебания конструкции будут оказывать существенное влияние на качество получаемой информации. В этой ситуации, при повышенных требованиях к точности исполнения рабочих режимов, построение и исследование модели динамики КА становится одним из ответственных этапов его проектирования.

Динамическая модель (уравнения движения) жесткой конструкции КА должна давать возможность

учитывать не только низкочастотные колебания солнечных батарей, бленды, штанг, но и высокочастотные колебания элементов приемных устройств, вызываемых силами и моментами, обусловленными наличием малых статических и динамических дебалансов быстровращающихся роторов исполнительных устройств на всем диапазоне их рабочих частот. Эти обстоятельства приводят к существенному увеличению размерности динамических моделей. Для таких моделей вопрос точности имеет особое значение. Это связано,



с одной стороны с трудностью аналитической разработки точных многомерных моделей динамики описанных объектов, а с другой – с необходимостью обеспечения точного моделирования реакции конструкции на варьирование ее конструкционных и управляющих параметров при эксплуатации.

Построение математической модели сопровождается весь путь создания КА и может быть разделено на две стадии. На первой стадии происходит разработка модели на этапе проектирования системы, когда характеристики конструкции еще не определены окончательно. На этой стадии, опираясь на основные законы физики, инструмент теоретической механики и исследовательский опыт, создается аналитическая (расчетная) модель. При этом натурные эксперименты с целью моделирования, как правило, не проводятся (при необходимости для обеспечения в расчетах хорошего описания качественных особенностей поведения конструкции возможно проведение испытаний на макетах с использованием теории подобия). На второй стадии производится уточнение структуры, размерности и параметров аналитической модели по результатам испытаний крупномасштабной физической модели изделия в условиях, максимально приближенных к реальным условиям работы конструкции, а также по результатам натурных испытаний летного образца на орбите. Для крупногабаритных космических конструкций (КК) динамические характеристики существенно зависят от окружающих условий функционирования, это вызывает необходимость высокой степени приближения условий тестирования к реальным условиям работы КК. Наиболее сложную проблему здесь представляет моделирование невесомости в земных условиях при испытании конструкции в целом. Для крупногабаритной КК не исключена ситуация, когда ее динамические характеристики не удастся протестировать в условиях Земли.

В работе предлагается новый подход к проблеме уточнения параметров аналитической модели по данным системы измерения (СИ) текущего состояния конструкции в процессе ее эксплуатации. Этот подход содержит два этапа процесса настройки параметров расчетной модели.

Первый этап – этап идентификации модели: определение ее модальных параметров (собственных частот и коэффициентов демпфирования) на базе отождествления выхода идентифицируемой модели с выходом – измеряемым состоянием в условиях эксплуатации конструкции. Большого только по измерениям входных воздействий и реальным, всегда неполным, данным о состоянии объекта получить нельзя. Необходимо дополнительная информация.

На втором этапе на базе полученных сведений о частотном спектре и данных об аналитической модели, используемых в качестве недостающей информации, производится собственно юстировка полученной расчетной модели – уточнение ее параметров: матриц-коэффициентов объекта, регулятора и наблюдателя и не измеряемого на практике полностью вектора состояния объекта в рамках уточненной на первом этапе порядка динамической модели, оставаясь

в рамках принятой априорно структуры. Высокоточная корректировка аналитической модели в настоящей публикации производится из условия минимальности поправок, сближающих динамику модели с динамикой реальной конструкции.

Предлагаемый прием юстировки матриц коэффициентов линейной модели в пространстве состояний не накладывает каких бы то ни было априорных условий на юстируемые матрицы объекта управления, регулятора и наблюдателя, как это традиционно делается (обычно предполагается известной матрица масс (либо жесткостей) и так называемая пропорциональность демпфирования для одновременной диагонализации трех матриц). В результате юстировки будет обеспечена тождественность модальных параметров и вектора выходных переменных отъюстированной модели таковым идентифицированной модели.

В статье предлагается апостериорное уточнение аналитической модели большой космической конструкции по результатам идентификации по данным СИ состояния конструкции в условиях орбитального полета.

Рассматриваются модели линейной структуры. Идентификация параметров модели, совмещенная с оценением состояния, заключается в вычислении ее матриц коэффициентов и вектора состояния. С целью осуществления такой идентификации при реальном неполном измерении состояния конструкции в период 1978–1985 гг. для линейной динамической модели в переменных состояния в работах [1; 2] был разработан хорошо обусловленный прямой вычислительный алгоритм. При выполнении найденных в этих работах необходимых и достаточных условий идентифицируемости алгоритм позволяет уточнять размерность модели и вычислять спектр ее собственных значений по измерениям состояния конструкции в ее свободном, собственном движении (или в переходном процессе).

Приведем необходимые в дальнейшем результаты работы [2]. Динамическую модель будем описывать линейными стационарными уравнениями состояния в стандартной форме:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx, \quad (1)$$

здесь  $x(t) \in R^n$  – вектор состояния,  $u(t) \in R^m$  – вектор управления,  $y(t) \in R^r$  – вектор выхода модели. Вещественные матрицы искомой улучшенной АМ обозначены как  $A$  (объект управления),  $B$  (регулятор),  $C$  (наблюдатель) размерностей  $n \times n$ ,  $n \times m$ ,  $r \times n$  соответственно. Для исходной АМ вида (1) известные (расчетные) матрицы коэффициентов будем обозначать  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $C_p$ . Эти матрицы имеют тот же порядок, что и матрицы искомой модели  $A$ ,  $B$ ,  $C$ .

Аналитическая модель динамики использует только проектные данные и поэтому с точностью до ошибок моделирования она отражает свойства проектируемой конструкции. Поскольку возникающие при создании АМ ошибки стремятся минимизировать, то вполне оправданно рассматривать элементы матриц коэффициентов  $A_p$ ,  $B_p$ ,  $C_p$  расчетной АМ в качестве проектных значений параметров. Погрешности

производства реальной конструкции, также создаваемой по проектным данным, вносятся существующей на данный момент технологией производства, что принципиально ограничивает возможности минимизировать ошибки при реализации проектных значений, поэтому значения параметров реальной конструкции существенно отличаются от проектных значений.

Найденные в [1; 2] необходимые и достаточные условия идентифицируемости модели (1) по неполным измерениям состояния конструкции при ее движении по одной фазовой траектории имеют следующий вид:

1) для пары  $\{A, x_0\}$  должны выполняться условия:

- минимальный многочлен вектора  $x_0$  относительно матрицы  $A$  совпадает с минимальным многочленом самой матрицы;
- матрица  $A$  – простая (имеет взаимно простые элементарные делители).

2)  $T \neq \frac{2\pi l}{|Jm\lambda_i - Jm\lambda_j|}$ ,  $l = 1, 2, \dots$ , где  $T$  – шаг измерений вектора состояния;  $(\lambda_i \neq \lambda_j)$  – пары собственных чисел матрицы  $A$  таких, что:  $\lambda_i \neq \lambda_j$ ,  $\text{Re}\lambda_i = \text{Re}\lambda_j$ ;

3) пара  $\{A, C\}$  наблюдаема.

Согласно этим условиям идентификация параметров модели (1) по измерениям состояния конструкции в ее собственном движении возможна лишь для простых [3] матриц  $A$  объекта управления модели. Для расчетной АМ – модели  $(A_p, B_p, C_p)$  – выполнение этого условия обеспечивается выбором проектных значений параметров. Начальный вектор состояния, выбор которого также ограничен условиями идентифицируемости, будем включать в обобщенный термин параметры.

Условия идентифицируемости модели эквивалентны условиям построения базиса ее пространства состояния по измерениям состояния конструкции на одной фазовой траектории [1; 2]. Поэтому их нарушение эквивалентно вырождению ранга матрицы, составленной из измеренных «базисных» векторов, т. е. будет происходить на некотором собственном алгебраическом многообразии в пространстве параметров модели [2]. Следовательно, свойство идентифицируемости по измерениям на одной траектории системы является, подобно свойству управляемости, типическим и грубо в каждой точке, где это свойство имеет место [4]. Таким образом, свойство идентифицируемости выполняется во всех точках некоторой окрестности его точки грубости в евклидовой топологии конечномерного пространства параметров.

Множество точек грубости свойства идентифицируемости модели (1) по измерениям состояния на одной траектории системы является одновременно открытым и всюду плотным в пространстве проектных значений параметров, а его дополнение имеет лебегову меру нуль [4]. Таким образом, условия идентифицируемости при выборе проектных значений параметров произвольным образом будет выполняться почти всегда. Будем предполагать, что точность технологии реализации проекта гарантирует принадлеж-

ность реализованных в конструкции значений проектных параметров той окрестности множества проектных значений параметров, для которой выполняются условия идентифицируемости модели по неполным измерениям состояния конструкции на одной траектории.

Приведем результаты предварительной идентификации [2]. При выполнении условий идентифицируемости прямой алгоритм [2] позволяет:

– определить порядок улучшенной аналитической модели (1);

– вычислить с точностью до ошибок идентификации оценки  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$  искомых матриц модели  $(A, B, C)$  и оценку начального вектора  $\hat{x}_0 = \hat{x}(t_0)$  состояния;

– определить матрицы  $A, B, C$  и состояние  $x(t)$  искомой модели лишь с точностью до неопределенного апостериорного базиса  $X$ :

$$A = X\hat{A}X^{-1}; B = X\hat{B}; C = \hat{C}X^{-1}; x(t) = X\hat{x}(t). \quad (2)$$

В силу подобию матриц  $A$  и  $\hat{A}$  формулами (2) представлен спектр собственных значений искомой матрицы  $A$ . Поскольку процесс идентификации модели имеет целью отождествление динамики модели с динамикой реальной конструкции, его результаты служат не только для определения динамических характеристик линейной модели, но и для оценки таковых конструкции. Поэтому найденный в этом процессе спектр собственных значений идентифицированной матрицы  $\hat{A}$  в пределах ее размерности (числа тонов колебаний, включенных в конечномерную модель, аппроксимирующую распределенную конструкцию), вычисленной по данным измерений состояния конструкции, представляет одновременно и спектр собственных частот и коэффициентов демпфирования «линеаризованной» конструкции.

Исследования показали, что полученной информации достаточно только для модального синтеза замкнутой системы управления. Для вычисления же улучшенной аналитической модели  $(A, B, C)$ , по которой возможно прогнозирование динамических эффектов реального объекта, необходимо знание базиса  $X$ . Для его вычисления необходима дополнительная информация.

Вместо практически ограниченной возможности совершенствования системы измерений здесь выбран предложенный в [5] путь коррекции аналитической модели. Рассматриваемый в настоящей работе прием улучшения аналитической модели заключается в вычислении минимальных поправок расчетной матрицы с опорой на идентифицированную модель  $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{C})$ . В отличие от распространенного подхода [5; 6] здесь корректировка производится в пределах окрестности допустимых реализаций проектных параметров.

Улучшенную аналитическую модель  $(A, B, C)$  будем строить путем коррекции  $(A_p + \delta A, B_p + \delta B, C_p + \delta C)$  расчетной модели  $(A_p, B_p, C_p)$  за счет информации, представленной отношениями (2). Рассмотрим задачу вычисления апостериорного базиса  $X_0$ , обеспечивающего минимальность поправки  $\delta A$  расчетной матрицы

объекта управления  $A_p$ . Будем определять матрицу  $X_0$  из условий минимума квадрата евклидовой нормы

$$\Phi = \frac{1}{2} \|A_p - X \hat{A} X^{-1}\|_e^2 = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \left( a_{ij}^p - \sum_{\mu,\nu} x_{i\mu} \hat{a}_{\mu\nu} x_{\nu j}^{-1} \right)^2. \quad (3)$$

Стандартным путем вычислим необходимое условие минимума поправки  $\delta A$ :  $\frac{\partial \Phi}{\partial X} = 0$ . Выполнив дифференцирование, найдем:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial X_0} = - \left\{ \hat{A} X^{-1} (A_p - X \hat{A} X^{-1})^t - X^{-1} (A_p - X \hat{A} X^{-1})^t X \hat{A} X^{-1} \right\}^t = 0.$$

Таким образом, базис  $X$ , минимизирующий поправку  $\delta A$ , должен удовлетворять уравнению:

$$X \hat{A} X^{-1} (A_p - X \hat{A} X^{-1})^t - (A_p - X \hat{A} X^{-1})^t X \hat{A} X^{-1} = 0. \quad (4)$$

Для простых матриц  $A_p$ ,  $\hat{A}$  и  $A_p$  уравнение (4) может быть переписано в форме, не содержащей операции обращения матрицы:

$$\hat{A}^t X^t X - X^t A_p^t X - X^t X f(\hat{A}) = 0, \quad (5)$$

где  $f(\lambda)$  – некоторый многочлен степени  $\leq n-1$  [4].

Перейдем в (4) к искомой матрице объекта  $A$ :

$$A(A_p - A)^t - (A_p - A)^t A = 0. \quad (6)$$

Или

$$A_p A^t - A^t A_p + A^t A - A A^t = 0. \quad (7)$$

Вычислив из (4) значение матрицы  $A$ , подставим его в уравнение для определения матрицы  $X$ :  $A X - X \hat{A} = 0$ . После вычисления  $X$  найдем матрицы  $B = X \hat{B}$ ,  $C = \hat{C} X^{-1}$ .

Перепишем уравнение (6), для поправки  $\delta A_p = A - A_p$ :  $[\delta A_p^t, A_p + \delta A_p] = 0$ . Преобразуем в форму суммы коммутаторов:  $[\delta A_p^t, A_p] + [\delta A_p^t, \delta A_p] = 0$ . В естественном нормальном базисе  $F$  матрицы  $A_p$  оно примет вид

$$[\delta Q_p, S_p] + [\delta Q_p, \delta S_p] = 0, \quad (8)$$

где  $S_p = F^{-1} A_p F$ ,  $\delta S_p @ F^{-1} \delta A_p F$ ,  $\delta Q_p @ F^{-1} \delta A_p^t F = (F^t F)^{-1} \delta S_p^t F^t F$ .

По постановке задачи матрица  $A_p$  простая, поэтому в естественной нормальной форме  $S_p$  она имеет вид одной клетки Сильвестра:

$$S_p = \begin{pmatrix} 0 & 1 & . & . & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & . & . & 0 & 1 \\ a_0^p & a_1^p & . & . & . & a_{n-2}^p & a_{n-1}^p \end{pmatrix}.$$

Таким образом, она будет определяться коэффициентами характеристического полинома расчетной матрицы объекта  $A_p$ . Канонические образы  $\delta S_p$  поправок  $\delta A_p$ , сохраняющих простую структуру матрицы  $A_p$ , должны сохранять структуру клетки Сильвестра  $\delta S_p$ , и, следовательно, минимальная поправка, вычисляемая из уравнения (8), по необходимости должна иметь вид

$$\delta S_p = \begin{pmatrix} 0 & 0 & . & . & . & 0 \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & . & . & 0 \\ \delta a_0 & \delta a_1 & . & . & . & \delta a_{n-1} \end{pmatrix}.$$

После введения в уравнение (8) матриц  $S_p$  и  $\delta S_p$  в указанном виде задача сведется к вычислению неопределенных элементов в последней строке матрицы  $\delta S_p$ .

Таким образом, предложенный подход к проблеме уточнения параметров аналитической модели по данным СИ текущего состояния конструкции в процессе ее эксплуатации обеспечивает выполнение повышенных требований к точности построения и исследования динамической модели КА.

#### Библиографические ссылки

1. Dynamics and Control of Large Space Structures / G. S. Nuur et al. // J. of Guidance, Control and Dynamics. 1984. Vol. 7. № 5. P. 514–526.
2. Дружинин Э. И., Дмитриев А. В. К теории прямых вычислительных алгоритмов параметрической идентификации линейных объектов II // Теоретические и прикладные вопросы оптимального управления. Новосибирск : Наука, 1985. С. 218–225.
3. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М. : Мир, 1989.
4. Уонэм У. Мюррей. Линейные многомерные системы управления. Геометрический подход. М. : Наука, 1980.
5. Berman A., Nagy E. J. Improvement of Large Analytical Model Using Test Data // AIAA Journal. 1983. Aug. Vol. 21, № 8. P. 1168–1173.
6. Baruch M., Bar Izhack I. Y. Optimal Weighted Orthogonalization of Measured Modes // AIAA Journal. 1978. April. Vol. 16.

#### Referens

1. Nuur G. S., Ryan R. S., Scofield H. N., Sims J. L. Dynamics and Control of Large Space Structures. J. of Guidance, Control, and Dynamics. 1984, vol. 7, no. 5, pp. 514–526.
2. Druzhinin E. I., Dmitriyev A. V. K teorii pryamykh vychislitel'nykh algoritmov para-metricheskoy identifikatsii lineynykh ob"yektov II (Theory of direct numerical algorithms parametric identification of linear objects II). Teoreticheskiye i prikladnyye voprosy optimal'nogo upravleniya (Theoretical and applied questions of optimal control). Novosibirsk, Nauka, 1985, pp. 218–225.

3. Khorn R., Dzhonson C. H. *Matrichnyy analiz* (Matrix analysis). Moscow, Mir, 1989, 655 p.

4. Uonem U. Myurrey. *Lineynyye mnogomernyye sistemy upravleniya. Geometricheskyy podkhod* (Linear multidimensional control systems. Geometric approach). Moscow, Nauka, 1980.

5. Berman A., and Nagy E. J. Improvement of Large Analytical Model Using Test Data. *AIAA Journal*. 1983, Aug, vol. 21, № 8, pp. 1168–1173.

6. Baruch M., and Bar Ilzhack I. Y. Optimal Weighted Ortogonalization of Measured Modes. *AIAA Journal*. 1978, April, vol. 16.

© Дружинин Э. И., Лукьяненко М. В., Якимов Е. Н., 2013

УДК 536.46

### ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ\*

И. Н. Карцан, В. Н. Тяпкин, К. Г. Охоткин, Р. В. Карцан, Д. Н. Пахоруков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: kartsan@sibsau.ru

*Предложен новый способ прямой дифференциальной коррекции погрешностей определения координат, который будет избавлен от большого объема корректирующих дифференциальных поправок, передаваемых множеству потребителей системы с необходимостью осуществлять выбор наиболее точных из них в аппаратуре потребителя.*

*Ключевые слова: спутниковая радионавигационная система, опорные станции, псевдодальность, псевдоскорость, точность определения координат, геомагнитные возмущения.*

### DIFFERENTIAL CORRECTION OF POSITION MEASUREMENT ERRORS IN EVENT OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES

I. N. Kartsan, V. N. Tyapkin, K. G. Okhotkin, R. V. Kartsan, D. N. Pahorykov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: kartsan@sibsau.ru

*A new method of direct differential correction of position measurement errors which will be relieved of a large amount of corrective differential amendments transmitted to many users of the system with the necessity to choose the most accurate of them in consumers equipment.*

*Keywords: satellite radio-navigation system, booster station, pseudo ranges, pseudo speed, accuracy of position measurements, geomagnetic disturbances.*

Для решения некоторых транспортных и специальных прикладных задач требуется обеспечить точность определения координат потребителя спутниковой радионавигационной системы (СРНС) с погрешностью не хуже 10 м в достаточно протяженной (2–3 тыс. км) рабочей зоне. При этом доступность навигационного сервиса должна быть не хуже 0,999...0,999 9 и целостность на уровне 0,999 999.....0,999 999 999 5 [1].

Для поддержания указанной выше точности, доступности и непрерывности навигационных определений в пределах протяженной рабочей зоны использу-

ются широкозонные и региональные дифференциальные дополнения СРНС. Наиболее известным примером зарубежной широкозонной дифференциальной системы (ШДС) служит американская ШДС WAAS [2]. Многочисленные исследования показывают, что воздействие геомагнитных возмущений и мощных всплесков радиоизлучения Солнца часто влечет за собой недоступность сервиса по предоставлению пользователю системы дифференциальных поправок, которые используются для коррекции погрешностей навигационных определений [3].

\*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.1957.

Известен также новейший отечественный прототип, который пока находится на стадии разработки. РНИИ космического приборостроения (Российская Федерация) был предложен альтернативный способ формирования дифференциальных поправок, которые можно использовать для коррекции погрешностей навигационных определений потребителя СРНС в пределах протяженной рабочей зоны [4]. Для этой цели, как и в ШДС WAAS, используется сеть, включающая не менее 10–12 опорных станций сбора информации. На основании массива измерений, выполненных на сети этих станций, в общем центре обработки информации формируется массив единых для протяженной рабочей зоны скалярно-векторных поправок. Скалярно-векторные поправки определяются для каждого навигационного спутника СРНС в виде  $\{\Delta X_i, \Delta V_i, \Delta \rho_i, \Delta v_i\}$ , где:  $\Delta X_i = |\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i|T$  – вектор поправок к априорным данным о координатах  $i$ -го навигационного спутника;  $\Delta V_i = |\Delta V_x, i, \Delta V_y, i, \Delta V_z, i|T$  – вектор поправок к априорным данным о составляющих скорости  $i$ -го навигационного спутника;  $\Delta \rho_i$  – скалярная поправка к оценке псевдодальности « $i$ -й навигационный спутник – потребитель»;  $\Delta v_i$  – скалярная поправка к оценке псевдоскорости потребителя.

Рассмотренные скалярно-векторные дифференциальные поправки, по сути, представляют собой поправки к эфемеридам навигационных спутников и частотно-временные поправки [5]. Однако в данном способе не преодолен принципиальный недостаток формирования скалярных поправок к псевдодальностям –  $\Delta \rho_i$ . Он заключается в том, что указанная скалярная поправка к оценке псевдодальности « $i$ -й навигационный спутник-потребитель» формируется путем пространственного усреднения большого массива измерений по отдельным опорным станциям, охватывающим всю протяженную рабочую зону. Это порождает следующую проблему: по данным ряда исследований, установлено, что во время геомагнитных возмущений среда околоземного космического пространства, через которую распространяются сигналы навигационных спутников, становится существенно неоднородной [6]. Следствием этого может быть снижение точности определения итоговых скалярных поправок  $\Delta \rho_i$ .

Еще одним недостатком предложенного способа является довольно большое количество корректирующих скалярно-векторных поправок, которые нужно сообщить множеству пользователей. При этом на аппаратуру пользователя должна быть возложена функция по выбору наиболее точных из них. Это влечет за собой усложнение алгоритмов обработки информации в аппаратуре потребителя (АП) и повышает ее стоимость.

Выполнение дифференциальной коррекции погрешностей навигационных определений потребителя СРНС в протяженной рабочей зоне требует развитой наземной инфраструктуры опорных станций сбора информации. Решение этой задачи с привлечением широкозонных дифференциальных дополнений СРНС

ориентировано на массового потребителя и, как показано выше, имеет определенные недостатки. В интересах потребителей от отдельных ведомств для преодоления этих недостатков целесообразно развертывание ведомственных функциональных дополнений СРНС.

Для развертывания широкозонных функциональных дополнений СРНС ведомственного назначения – железнодорожных, речных, прибрежных или авиационных – можно использовать региональные дифференциальные сети, сформированные путем слияния нескольких локальных функциональных дополнений СРНС. При этом для формирования массива корректирующих дифференциальных поправок, действующих в протяженной рабочей зоне, можно использовать два способа:

1) способ дифференциальной коррекции псевдодальностей и псевдоскоростей [5];

2) способ прямой дифференциальной коррекции координат [5].

Использование первого способа получения дифференциальных поправок для реализации региональной дифференциальной сети имеет серьезные недостатки. Во-первых, задача выбора наиболее точных из всего множества дифференциальных поправок  $\Delta \rho_i$  и  $\Delta v_i$  перекладывается на потребителя системы, что существенно усложняет алгоритм обработки информации в аппаратуре потребителя и повышает ее стоимость. Эта проблема еще более усугубляется в условиях действия геомагнитных возмущений. В таких условиях может проявляться значительная неравноточность при определении скалярных поправок  $\Delta \rho_i$  и  $\Delta v_i$  по одному и тому же навигационному спутнику на разных опорных станциях (ОС) дифференциальной сети.

Во-вторых, точность определения единых для рабочей зоны скалярных поправок  $\Delta \rho_i$  и  $\Delta v_i$  прямо зависит от степени соответствия среды распространения сигналов навигационных спутников ее сферическислоистому невозмущенному представлению. Имеются многочисленные исследования [3; 6], которые показывают, что такое состояние среды распространения сигналов существенно нарушается в условиях геомагнитных и спорадических возмущений среды околоземного космического пространства.

Что касается второго способа, то основным ограничением использования дифференциального режима с прямой коррекцией координат является обязательное требование, чтобы определение координат опорной станции локальной дифференциальной системы и потребителя осуществлялось по одному и тому же рабочему созвездию навигационных спутников [5]. Чем больше удаление потребителя от опорной станции, тем технически сложнее удовлетворить указанному требованию. Этому требованию сложно удовлетворить и в условиях сложного рельефа местности, когда окружающие объекты экранируют сигналы части навигационных спутников СРНС.

Несмотря на это существенное ограничение, использование способа прямой дифференциальной

коррекции координат может оказаться более предпочтительным для реализации региональных дифференциальных сетей. Вызвано это тем, что возникают определенные преимущества в сравнении с использованием дифференциального режима с формированием скалярных поправок к псевдодальностям и псевдоскоростям по отдельным спутникам.

Во-первых, имеет место существенное уменьшение объема информации, которая должна быть передана в общий центр обработки данных (по три поправки к координатам опорных станций сбора информации дифференциальной сети вместо 16 поправок к измеренным псевдодальностям и псевдоскоростям по всем спутникам, которые наблюдаются на всех опорных станциях ШДС).

Во-вторых, в произвольной точке рабочей зоны не возникает необходимости выбирать из всей совокупности скалярных поправок по видимым спутникам наиболее точные, поскольку сформирован единый массив региональных поправок к погрешностям определения пространственных координат потребителей, которые находятся в рабочей зоне. Это существенно упрощает алгоритм обработки информации в аппаратуре потребителя СРНС и снижает ее стоимость. Кроме того, при выборе оптимального вида интерполяции поля дифференциальных поправок к погрешностям определения координат потребителей в данных поправках в пределах всей рабочей зоны региональной дифференциальной сети уже учтены локальные особенности формирования итоговых погрешностей координатных определений.

В-третьих, если расстояние между опорными станциями региональной сети данного типа находится в пределах радиуса пространственной корреляции погрешностей определения координат, то точность дифференциальной коррекции не снижается значительно образом в условиях воздействия неблагоприятных геофизических факторов.

В настоящее время функционирует Всемирная сеть, включающая более двух тысяч стационарных пунктов, оборудованных навигационной аппаратурой потребителей спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Прямоугольные геоцентрические и географические координаты этих пунктов известны с высокой точностью. Эта сеть используется для коррекции элементов орбит навигационных спутников GPS, выполнения геодинамических наблюдений и ионосферных исследований [7]. Распределение пунктов Всемирной сети неравномерно по поверхности земного шара: наибольшее их число приходится на территорию Северной Америки и Европы. Имеются отдельные регионы с расстоянием между соседними пунктами от 30 до 450 км. Постоянно идет процесс наращивания данной сети с появлением густых региональных сетей подобного назначения, в том числе и на территории Российской Федерации (сеть геодинамического мониторинга КАМНЕТ на Камчатке) [4].

Предлагается использовать наземные стационарные пункты всемирной сети станций, оборудованных

навигационной аппаратурой потребителей спутниковых радионавигационных систем GPS и ГЛОНАСС, в качестве опорных станций сбора информации региональных дифференциальных систем ведомственного назначения. Кроме того, можно предложить использование этих пунктов для наращивания уже имеющейся инфраструктуры наземных ОС широкозонных дифференциальных дополнений СРНС.

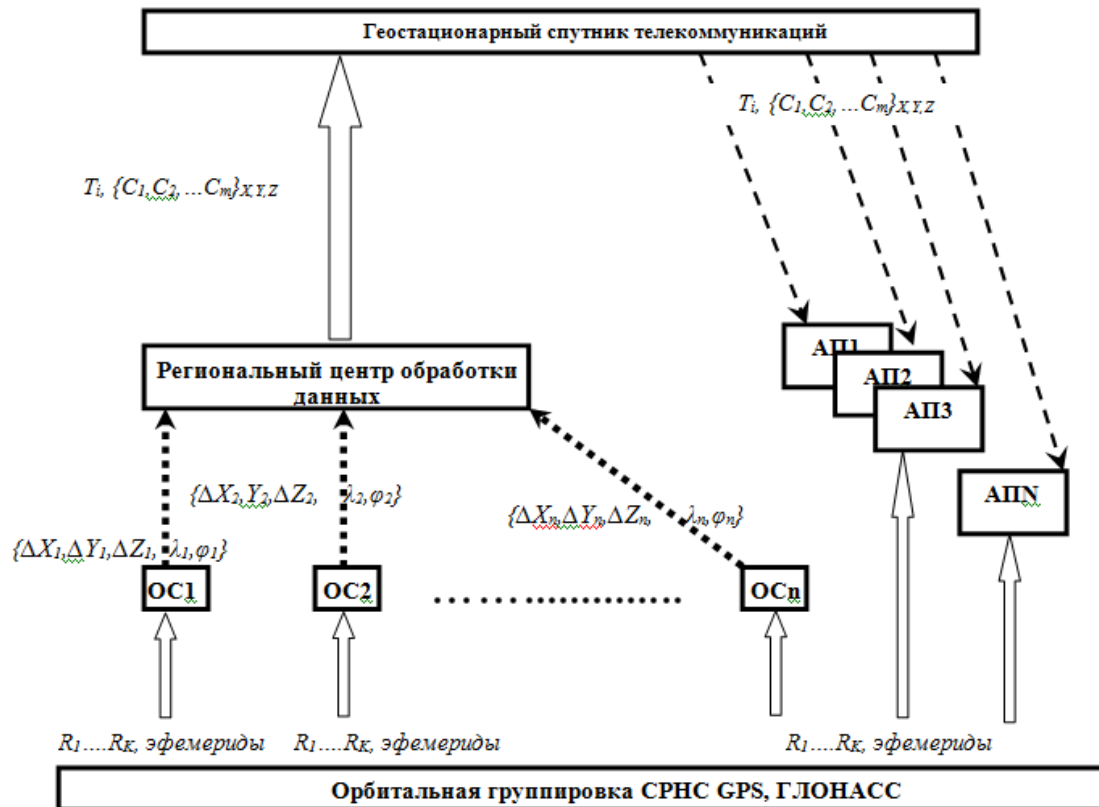
Благодаря использованию густых региональных фрагментов всемирной сети опорных станций для разворачивания региональных дифференциальных сетей ведомственного назначения можно удовлетворить требованию, касающемуся использования одного и того же рабочего созвездия навигационных спутников на опорных станциях сбора информации и в аппаратуре потребителя СРНС. При высокой плотности размещения опорных станций сбора информации можно достаточно уверенно гарантировать, что на соседних опорных станциях региональной дифференциальной сети и в точке расположения пользователя будет наблюдаться одно и то же созвездие навигационных спутников.

Суть предлагаемого способа прямой дифференциальной коррекции погрешностей определения координат пользователей среднеорбитальных спутниковых радионавигационных систем в пределах протяженной рабочей зоны иллюстрируется на рисунке.

Практическая реализация предлагаемого способа выполняется следующим образом.

Шаг первый: На каждой опорной станции сбора информации региональной дифференциальной сети (ОС1, ОС2...ОС $n$ ) производятся измерения псевдодальностей до видимых навигационных спутников (R1, R2...RK) орбитальной группировки GPS и (или) ГЛОНАСС. На основании этих измерений и известных элементов орбит навигационных спутников (эфемерид) на каждой ОС оцениваются погрешности определения прямоугольных геоцентрических координат данной опорной станции:  $\Delta X_j = X_j - X^*_j$ ;  $\Delta Y_j = Y_j - Y^*_j$ ;  $\Delta Z_j = Z_j - Z^*_j$ , где  $j$  – номер опорной станции;  $X_j, Y_j, Z_j$  – известные прямоугольные геоцентрические координаты  $j$ -й опорной станции;  $X^*_j, Y^*_j, Z^*_j$  – измеренные прямоугольные геоцентрические координаты  $j$ -й опорной станции. Сформированное на каждой опорной станции сообщение –  $\{\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j, \lambda_j, \varphi_j\}$  – содержит информацию о геодезических координатах этой станции ( $\lambda_j, \varphi_j$ ) и погрешностях определения ее прямоугольных геоцентрических координат ( $\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j$ ).

Шаг второй: набор сообщений  $\{\Delta X_j, \Delta Y_j, \Delta Z_j, \lambda_j, \varphi_j\} 1...n$  от всех  $n$  опорных станций сбора информации региональной дифференциальной сети с определенной периодичностью в моменты времени  $T_i$  по стационарным каналам связи поступает в региональный центр обработки данных. На основании этих измерений в региональном центре обработки данных формируются единые текущие (для момента времени  $T_i$ ) региональные сплайн-поверхности погрешностей определения прямоугольных геоцентрических координат:  $S\Delta X(\lambda, \varphi, T_i)$ ,  $S\Delta Y(\lambda, \varphi, T_i)$ ,  $S\Delta Z(\lambda, \varphi, T_i)$ .



Реализация способа прямой дифференциальной коррекции погрешностей определения координат потребителей СРНС в пределах протяженной рабочей зоны

Интерполяция погрешностей  $\Delta X_j \dots n, \Delta Y_j \dots n, \Delta Z_j \dots n$ , измеренных на сети опорных станций, в региональном центре обработки имеет следующие характерные особенности:

1) текущие погрешности  $\Delta X_j \dots n, \Delta Y_j \dots n, \Delta Z_j \dots n$ , измерены на сети опорных станций, которые распределены по региону весьма неравномерно;

2) в связи с существенной неоднородностью условий распространения сигналов навигационных спутников в окрестностях каждой из опорных станций сбора информации может иметь место также и существенная неоднородность пространственного распределения измеренных погрешностей  $\Delta X_j \dots n, \Delta Y_j \dots n, \Delta Z_j \dots n$  в пределах протяженной рабочей зоны.

В связи с указанными особенностями для формирования текущих региональных сплайн-поверхностей погрешностей определения прямоугольных геоцентрических координат ( $S\Delta X(\lambda, \varphi, T_i), S\Delta Y(\lambda, \varphi, T_i), S\Delta Z(\lambda, \varphi, T_i)$ ) оказалось целесообразным использовать сплайн-функцию специального вида:

$$S(\lambda, \varphi, T_i) = \sum_{j=1}^n C_i \left[ (\lambda - \lambda_j)^2 + (\varphi - \varphi_j)^2 \right] \times \ln \left[ (\lambda - \lambda_j)^2 + (\varphi - \varphi_j)^2 \right] + C_{n+1} + C_{n+2} \lambda + C_{n+3} \varphi, \quad (1)$$

где  $n$  – количество опорных станций сбора информации региональной дифференциальной сети;  $\lambda_j, \varphi_j$  – геодезические координаты  $j$ -й опорной станции сбора информации;  $C_i, C_{n+1}, C_{n+2}, C_{n+3}$  – неизвестные коэффициенты двумерного сплайна;  $S(\lambda, \varphi, T_i)$  – вычис-

ленное значение погрешности определения прямоугольной геоцентрической координаты  $X, Y$  или  $Z$  для потребителя, расположенного в произвольной точке региона с геодезическими координатами  $(\lambda, \varphi)$  в момент времени  $T_i$ .

Сплайн-функция, выраженная общей формулой (1), была предложена специально для интерполяции данных на неравномерной сети опорных точек.

Таким образом, в региональном центре обработки данных дифференциальной сети в каждый момент времени  $T_i$  на основании выражения (1) формируется три региональные сплайн-поверхности погрешностей определения прямоугольных геоцентрических координат: сплайн-поверхность распределения погрешности определения координаты  $X - S\Delta X(\lambda, \varphi, T_i)$ ; сплайн-поверхность распределения погрешности определения координаты  $Y - S\Delta Y(\lambda, \varphi, T_i)$  и сплайн-поверхность распределения погрешности определения координаты  $Z - S\Delta Z(\lambda, \varphi, T_i)$ .

В процессе формирования региональных сплайн-поверхностей погрешностей определения координат потребителя в центре обработки данных региональной дифференциальной сети определяется набор коэффициентов  $\{C_1, C_2, \dots, C_{n+3}\}_x, \{C_1, C_2, \dots, C_{n+3}\}_y, \{C_1, C_2, \dots, C_{n+3}\}_z$  для каждой из сплайн-поверхностей  $S\Delta X(\lambda, \varphi, T_i), S\Delta Y(\lambda, \varphi, T_i)$  и  $S\Delta Z(\lambda, \varphi, T_i)$  в момент времени  $T_i$ .

Шаг третий: набор коэффициентов  $\{C_1, C_2, \dots, C_{n+3}\}_x, \{C_1, C_2, \dots, C_{n+3}\}_y, \{C_1, C_2, \dots, C_{n+3}\}_z$  передается через геостационарный спутник связи в аппаратуру потребителей СРНС (АП1, АП2 ... АПn), находящихся в протяженной рабочей зоне региональной дифференциальной сети.

Потребитель в точке с геодезическими координатами  $(\lambda, \varphi)$  использует набор коэффициентов  $\{C_1, C_2, \dots, C_n + 3\}_x$ , чтобы вычислить по формуле (1) текущую погрешность определения своей координаты  $X$ , набор коэффициентов  $\{C_1, C_2, \dots, C_n + 3\}_y$ , чтобы вычислить по формуле (1) текущую погрешность определения своей координаты  $Y$  и набор коэффициентов  $\{C_1, C_2, \dots, C_n + 3\}_z$ , чтобы вычислить по формуле (1) текущую погрешность определения своей координаты  $Z$ .

После вычисления текущих погрешностей определения прямоугольных геоцентрических координат, как это указано выше, потребитель производит прямую дифференциальную коррекцию данных погрешностей следующим образом:

$$X_{us} = \hat{X} + \Delta \hat{X}(\lambda, \varphi, T_i), \quad (2)$$

$$Y_{us} = \hat{Y} + \Delta \hat{Y}(\lambda, \varphi, T_i), \quad Z_{us} = \hat{Z} + \Delta \hat{Z}(\lambda, \varphi, T_i),$$

где  $\hat{X}$ ,  $\hat{Y}$ ,  $\hat{Z}$  – измеренные прямоугольные геоцентрические координаты потребителя в точке рабочей зоны дифференциальной сети с геодезическими координатами, вычисленные с помощью сплайн-функции (1) погрешности определения прямоугольных геоцентрических координат потребителя (дифференциальные поправки для выполнения прямой коррекции погрешностей определения координат потребителя);  $X_{us}$ ,  $Y_{us}$ ,  $Z_{us}$  – уточненные координаты потребителя после прямой дифференциальной коррекции.

Из полученных результатов видно, что необходимо более тщательно пересмотреть механизмы воздействия геомагнитных возмущений среды распространения радиоволн на качество работы спутниковых систем навигации. В результате подобных исследований возможна реализация адаптации навигационной аппаратуры потребителя СРНС к воздействию неблагоприятных гелиогеофизических факторов. Для разработки эффективных алгоритмов адаптации аппаратуры СРНС необходимо накопление статистически состоятельных оценок максимальных наблюдаемых ионосферных мерцаний амплитуды и фазы сигналов НС в различных условиях наблюдений.

Чтобы получать фазовые измерения с лучшим качеством с одной стороны желательно использовать приемник со следящим измерителем фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ). Ширина полосы захвата этого измерителя должна быть малой, чтобы минимизировать шумы. Но обратной стороной такой структуры будет низкая устойчивость в условиях действия ионосферных сцинтилляций, во время которых приемник может полностью потерять захват сигнала. Решение этой проблемы может быть достигнуто за счет использования адаптивного следящего измерителя сопровождения несущей. В нормальном режиме следящий измеритель работает только с использованием ФАПЧ со суженной полосой захвата. Когда обнаруживаются фазовые и амплитудные сцинтилляции, полоса захвата расширяется, чтобы адаптироваться к новым условиям приема сигнала.

Преимущества предложенного способа прямой дифференциальной коррекции погрешностей определения координат пользователей среднеорбитальных спутниковых радионавигационных систем заключаются в следующем:

1) повышенная устойчивость работы системы дифференциальной коррекции в условиях геомагнитных возмущений, поскольку точность сформированных дифференциальных поправок слабо зависит от локальных особенностей среды распространения сигналов навигационных спутников;

2) для разворачивания региональных дифференциальных сетей можно использовать готовую инфраструктуру – Всемирную сеть опорных станций, оборудованных аппаратурой потребителей GPS, ГЛОНАСС, что в ряде случаев приведет к существенному снижению затрат на создание региональных дифференциальных сетей ведомственного назначения;

3) в произвольной точке рабочей зоны не возникает необходимости выбирать из всей совокупности скалярных поправок по видимым спутникам наиболее точные, поскольку сформирован единый массив региональных поправок к погрешностям определения пространственных координат потребителей. Это существенно упрощает алгоритм обработки информации в аппаратуре потребителя СРНС и снижает ее стоимость;

4) имеет место существенное уменьшение объема информации, которая должна быть передана в общий центр обработки данных.

### Библиографические ссылки

1. Среднеширотные амплитудные мерцания сигналов GPS и сбои функционирования GPS на границе аврорального овала / Э. Л. Афраймович [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 7. С. 509–526.
2. Geomagnetic Storms and the Occurrence of Phase Slips in the Reception of GPS Signals / E. L. Afraimovich et al. // Annals of Geophysics. 2001. Vol. 45 (1). P. 55–71.
3. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2005.
4. Повышение точности определения геодезического пункта с использованием радионавигационной системы / И. Н. Карцан, В. Н. Анпилов, С. В. Литовский, Е. С. Жукова // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 7 (40). С. 68–73.
5. Kaplan E. D. Understanding GPS: Principles and Applications // Artech House. 1996.
6. Афраймович Э. Л., Караченцев В. А., Неудакин А. А. Методика прогнозирования погрешностей функционирования спутниковых радиотехнических систем, обусловленных неоднородной и нестационарной ионосферой земли, по данным глобальной GPS // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2003. № 4. С. 51–60.
7. Gurtner W. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format [Electronic resource]. URL: <http://www.igs.org>. International GNSS Service. IGS Central Bureau, 1993–2009.



## References

1. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Berngradt O. I., Demyanov V. V. et al. *Izvestiya vuzov. Radiophysics*. 2004, vol. 47, № 7, pp. 509–526.
2. Afraimovich E. L., Lesyuta O. S., Ushakov I. I., Voeykov S. V. *Annals of Geophysics*. 2001, vol. 45 (1), pp. 55–71.
3. Perov A. I., Harisov V. N. *GLONASS: printsipy postroyeniya i funktsionirovaniya* (GLONASS: principles of construction and functioning). Moscow, Radiotekhnika, 2005, 687 p.
4. Kartsan I. N., Anpilogov V. N., Litoshik S. V., Zhukova E. S. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 7 (40), pp. 68–73.
5. Kaplan E. D. *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House, 1996, 556 p.
6. Afraimovich E. L., Karachentsov V. A., Neydakin A. A. *Izvestiya vuzov. Radiophysics*, 2003, № 4, pp. 51–60.
7. Gurtner, W. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format. Electronic resource. Version 2. International GNSS Servis. IGS Central Bureau, 1993–2009.

© Карцан И. Н., Тяпкин В. Н., Охоткин К. Г.,  
Карцан Р. В., Пахоруков Д. Н., 2013

УДК 629.78.054:621.396.018

## МАГИСТРАЛЬНО-МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОТРАБОТКИ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

С. С. Красненко<sup>1</sup>, Д. А. Недорезов<sup>1</sup>, В. Б. Кашкин<sup>1</sup>, А. В. Пичкалев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: t\_150@list.ru.

<sup>2</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени М. Ф. Решетнева

Россия, 662972, Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

Обоснована необходимость создания унифицированных автоматизированных комплексов проверки радиоэлектронной аппаратуры. Сформулированы требования к комплексам проверки, удовлетворяющие разработчиков и цех испытаний радиоэлектронной аппаратуры. Предложена реализация автоматизированных комплексов, удовлетворяющих предъявленным требованиям, с использованием магистрально-модульных систем. Приведен пример использования такой системы для испытаний навигационной аппаратуры космического назначения. Рассмотрен вариант реализации имитатора радионавигационного сигнала на магистрально-модульной системе компании National Instruments. Реализация автоматизированных комплексов с использованием магистрально-модульных систем позволяет существенно сократить время проверки радиоэлектронной аппаратуры без потери качества, а также создавать гибкую проверочную аппаратуру. Все это позволит повысить конкурентоспособность производимой продукции.

Ключевые слова: испытания, радиоэлектронная аппаратура, комплексы проверок, магистрально-модульная система, имитатор радионавигационных сигналов.

## BUS-MODULAR SYSTEM FOR TEST OF ONBOARD RADIOELECTRONIC EQUIPMENT

S. S. Krasnenko<sup>1</sup>, D. A. Nedorezov<sup>1</sup>, V. B. Kashkin<sup>1</sup>, A. V. Pichkalev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University

79 Svobodnui prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: t\_150@list.ru.

<sup>2</sup>JSC “Information Satellite Systems” named after academician M. F. Reshetnev”

52 Lenin st., Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

The authors substantiate the necessity of creation of the unified automated systems for testing radio-electronic equipment, formulate the requirements to check complexes satisfying developers and workshop testing radio-electronic equipment and propose realization automated systems meet shown requirements using the bus-modular systems with the presentation of the example of use of such a system for testing the navigation equipment for space objects. Along with this the authors consider a variant of the simulator of radio navigation signal on bus-modular system of National Instruments. The implementation of automated systems with bus-modular systems allows to significantly reduce the radio-electronic equipment scan time without loss in quality, and create flexible checkout equipment. All the mentioned above will improve the competitive ability of the products.

Keywords: testing, electronic equipment, systems audits, bus-modular system, simulator of radio navigation signals.

Бортовая радиоэлектронная аппаратура перед запуском на орбиту в составе космического аппарата проходит ряд проверок, которые можно разделить на два этапа:

- лабораторные испытания;
- испытания после сборки аппаратуры – цеховые испытания.

Лабораторные испытания проводятся разработчиками, сюда входят лабораторно-отрабочные испытания и конструкторско-доводочные испытания. В ходе этих испытаний выявляются ошибки проектирования и прочие дефекты работы прибора. Цеховые испытания проводятся в цехе-изготовителе для устранения дефектов сборки аппаратуры и проверки ее в составе системы космического аппарата. В цеховые испытания входят автономные испытания, комплексные испытания, межведомственные испытания и предъявительские испытания. К специальным испытаниям относятся термовакуумные, вибрационные и акустические. Проводятся они как на этапе лабораторных, так и на этапе цеховых испытаний при помощи специальных средств, имитирующих те или иные воздействия. Радиоэлектронные испытания обязательны как для лабораторных, так и для цеховых испытаний и проводятся специализированными комплексами, включающими в себя всю необходимую для проверки конкретного прибора аппаратуру [1].

Перед добавлением новых узлов в бортовой прибор или полной заменой аппаратуры производится весь цикл лабораторных и цеховых испытаний. Проверка нововведенных узлов в цехе затрудняется негибкостью типового оборудования, его загруженностью испытаниями другой аппаратуры. Кроме этого, испытательные комплексы в цехе традиционно имеют статичную структуру, ориентированную на серийное производство продукции, поэтому их доработка требует значительных финансовых и временных затрат. В связи с чем необходима гибкая аппаратура, позволяющая в короткие сроки реконфигурировать, дорабатывать испытательные комплексы. Мобильность такой аппаратуры повысит ее надежность при переносе к испытательным стендам специальных воздействий. Однако стоит отметить, что отладочное оборудование разработчиков, удобное для лабораторной отработки и удовлетворяющее этим требованиям, зачастую неприменимо в условиях цеха из-за четких оговоренных требований к испытательной аппаратуре. В связи с этим требуется такой испытательный комплекс, который будет и удовлетворять разработчиков для лабораторных испытаний, и соответствовать стандартам цеха в части эксплуатации испытательного оборудования.

Автоматизация работы комплексов испытаний позволяет проводить более полную и всестороннюю проверку за меньшее время, а также способствует получению большего объема и лучшего качества испытательной информации. Кроме того, автоматизация испытаний исключает влияние человеческого фактора. Все это позволяет обеспечить требуемый для космического машиностроения уровень проверки.

Принимая во внимание вышеизложенное, можно выделить следующие требования к комплексам проверки радиоэлектронной аппаратуры:

- предоставление комплексом полноты, достоверности, точности экспериментальных данных;
- универсальность по отношению к видам и объектам испытаний;
- способность комплекса быстро адаптироваться к изменению задач и условий испытаний;
- надежность функционирования технических средств испытаний;
- мобильность испытательного комплекса;
- удобство управления испытательной аппаратурой;
- простота технического обслуживания и ремонтпригодность;
- простота разработки программного обеспечения для комплекса.

Обеспечить автоматизацию и выполнить все предъявленные требования к комплексам проверок можно, используя магистрально-модульные системы (ММС). Иностранные производители ММС предоставляют потребителям продукцию широкого спектра применения в различных стандартах. Для таких систем разработана огромная номенклатура технических средств и самое разнообразное программное обеспечение, которое позволяет полностью автоматизировать их работу. Отсутствующие компоненты можно разрабатывать самостоятельно или заказывать специалистам, что не значительно скажется на общей стоимости комплекса [2].

В качестве примера можно рассмотреть практическое применение ММС для испытаний аппаратуры радионавигации (АРН). АРН – это специализированный прибор, устанавливаемый на космические аппараты, находящиеся на геостационарной и высокоэллиптической орбитах, для их позиционирования в космическом пространстве. На ММС разрабатывается автоматизированный комплекс для проверки этой аппаратуры.

Данный комплекс имитирует внешнюю, по отношению к АРН, среду, с использованием контрольно-измерительной аппаратуры на базе серийных модулей РСІ, сРСІ/РХІ (модули цифрового ввода-вывода, ЦАП, АЦП, специализированные интерфейсные модули, устройства коммутации сигнала, осциллографы, генераторы и т. д.), управляемых промышленным или персональным компьютером, в котором реализована автоматизированная система обработки информации и управления. Таким образом, организуется процесс, подобный штатной эксплуатации прибора в составе космического аппарата.

При помощи устройства цифрового ввода-вывода имитируются управляющие воздействия блока управления космическим аппаратом и выдача в него команд из АРН. Аналогово-цифровой преобразователь контролирует аналоговые сигналы, поступающие от аппаратуры радионавигации. Модули релейной коммутации сигнала обеспечивают электропитание прибора. Также в составе комплекса проверок применяется специализированное интерфейсное устройство –

контроллер мультиплексного канала обмена. Для создания соединителей удобно использовать выносные клеммные модули, что избавляет от создания кабелей и позволяет оперативно переконфигурировать соединения при необходимости. Такой метод испытаний эффективен тем, что довольно просто и быстро позволяет переконфигурировать испытательные комплексы, если цели и методы отработки меняются.

Обеспечив все необходимые параметры и воздействия, оператор-испытатель, при помощи управляющего компьютера с необходимым программным обеспечением, начинает проверку АРН и сбор данных о его работе, после чего выводится протокол всех отказов и неисправностей, если таковые имеются. Таким образом, использование аппаратуры на базе серийных модулей и специализированного программного обеспечения позволяет создавать автоматизированные комплексы проверок, удовлетворяющих всем вышеописанным требованиям.

Кроме модулей, имитирующих параметры, характерные для большинства бортовой аппаратуры, АРН также необходим имитатор радионавигационных сигналов (ИРНС), который будет воссоздавать навигационную обстановку, подобную реальной, от спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

Сегодня аппаратура имитации навигационных сигналов весьма востребованна и некоторыми компаниями производится серийно, но все они ориентированы на потребителей, находящихся в околоземном пространстве, поэтому не подходят для проверки и испытаний АРН. В связи с этим необходима разработка специального ИРНС, с возможностью перепрограммирования, что позволит использовать его для отработки разных типов навигационных приемников.

На сегодняшний день наиболее известны три типа формирователей навигационного радиосигнала:

- на дискретных синтезаторах;
- цифровой схеме;
- векторном генераторе.

Первый тип формирователя характеризуется тем, что сигнал от каждого навигационного спутника генерируется отдельным синтезатором, формируя квадратурный сигнал, манипулированный по фазе псевдослучайной последовательности, используемой в навигационных системах ГЛОНАСС и GPS с наложенной на нее соответствующей цифровой информацией. Сигналы со всех синтезаторов суммируются, фильтруются, преобразователем частоты вверх переносятся в требуемую область частот и перед выходом ИРНС регулируются по мощности узлом аттенуаторов. Главной проблемой этой реализации ИРНС является синхронизация большого числа дискретных синтезаторов. Именно это послужило основной причиной для отказа от данной схемы при разработке современных многоканальных имитаторов [3].

Во втором типе формирователя в качестве цифровой схемы можно использовать программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), в которой реализован цифровой синтез и суммирование сигнала. При помощи схемы управления интегрированные

синтезаторы формируют навигационные сигналы в цифровом виде, после чего они суммируются и переводятся внешним цифро-аналоговым преобразователем в аналоговую форму. Таким образом, получается требуемый сигнал на промежуточной частоте. Далее преобразователь частоты переносит его на рабочие частоты навигационных спутников [3].

Третий тип формирователя наиболее гибок в части быстрого изменения формата заданного сигнала. Векторный генератор представляет собой быстродействующий ЦАП и преобразователь частоты вверх. На его вход подается изменяющийся цифровой код, описывающий навигационный сигнал от нескольких движущихся по соответствующей орбите спутников. Для расчета этого кода используется процессор с требуемым программным обеспечением. При необходимости имитации большого числа навигационных спутников (порядка 12) можно использовать внешнюю память, на которой будет храниться рассчитанный ранее цифровой код, так как в этом случае процессор не сможет обеспечить генерацию кода в режиме реального времени [3].

Для обеспечения требований, предъявляемых к комплексам автоматизированной проверки, при разработке ИРНС также необходимо использовать ММС. Компания National Instruments предлагает технологии ММС, которые позволяют реализовать 2-й и 3-й типы формирователя навигационного сигнала. Ниже рассмотрен 2-й тип.

Для данной реализации наиболее подходят модули PXIe-5641R и PXI-5610. Эти модули управляются в среде графического программирования LabVIEW, которая работает как в операционных системах реального времени, так и в Windows. Данные модули устанавливаются в шасси, например NI PXIe-1075, находящейся под управлением системного контроллера NI PXIe-8130.

Модуль PXIe-5641R является универсальным устройством, с помощью которого можно принимать сигнал и производить его обработку, а также синтезировать и воспроизводить его в диапазоне от 250 кГц до 80 МГц с полосой 20 МГц. Для этого он имеет по два аналоговых входа и выхода, оснащенные АЦП и ЦАП соответственно, а также ПЛИС, в которой происходит обработка и синтез сигналов в цифровой форме. Аналоговые входы и выходы имеют встроенные цифровые преобразователи частоты вниз и вверх. Модуль PXI-5610 – это преобразователь частоты в диапазоне от 250 кГц до 2,7 ГГц [4].

Таким образом, реализовав на ПЛИС модуля PXIe-5641R цифровое формирование навигационных сигналов и перенеся его в необходимый нам диапазон частот, получаем ИРНС ГЛОНАСС/GPS в модульном исполнении.

В заключение можно упомянуть, что современные тенденции космического машиностроения предъявляют жесткие требования к созданию космических аппаратов и обязывают поддерживать высокую конкурентоспособность завода-изготовителя, в которой существенную роль играет время создания аппарата,

немалую часть которого занимает качественная проверка его аппаратуры. Для уменьшения времени проверки радиоэлектронной аппаратуры необходимо использовать современное оборудование, чем и являются комплексы на ММС.

Компания National Instruments предлагает технологии ММС и огромную номенклатуру технических средств с самым разнообразным программным обеспечением к ним. Их модули программируются в среде графического программирования LabVIEW. Данная среда позволяет разрабатывать прикладное программное обеспечение для организации взаимодействия с измерительной и управляющей аппаратурой, сбора, обработки и отображения информации, а также моделирования как отдельных объектов, так и автоматизированных систем в целом. В состав LabVIEW входят библиотеки управления различными аппаратными средствами с такими интерфейсами, как PCI, cPCI/PXI, VXI, GPIB. Программные продукты, созданные с использованием LabVIEW, могут быть дополнены фрагментами, разработанными на общепринятых языках программирования C++, VHDL, Pascal и т. д. Кроме того, подавляющее число разработчиков серийных контрольно-измерительных устройств снабжают свою продукцию драйверами для LabVIEW, что избавляет разработчика программного обеспечения от низкоуровневого программирования. LabVIEW позволяет разрабатывать практически любые приложения, взаимодействующие с любыми видами аппаратных средств, поддерживаемых операционной системой компьютера и идеально подходит для автоматизации работы с радиоэлектронной аппаратурой [5].

Таким образом, комплексы автоматизированных проверок, выполненных на ММС являются наиболее перспективными в области проверки радиоэлектронной аппаратуры. Благодаря использованию серийных модулей различного назначения данные комплексы будут весьма гибкими и мобильными, с относительно небольшими временными и финансовыми затратами в случае необходимости доработки. На примере реализации ИРНС показаны практически неограниченные возможности ММС. Полученный ИРНС является оптимальным для использования в комплексах испытаний на ММС, он обеспечивает требуемые параметры, а именно: многоканальность, требуемое созвездие навигационных спутников и параметры движения приемника на борту космического аппарата.

#### Библиографические ссылки

1. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / О. П. Глудкин [и др.] / под ред. А. И. Коробова. М. : Радио и связь, 1987.

2. Пичкалев А. В. Создание автоматизированного мобильного испытательного комплекса для цеховых испытаний программно-управляемой радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. Ч. 2.

3. Красненко С. С., Пичкалев А. В. Способы формирования сигналов в радионавигационных имитаторах // Тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 30-летию запуска на орбиту первого навигационного космического аппарата «Глонасс» / под общ. ред. Н. А. Тестоедова ; ОАО «Информационные спутниковые системы» ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012.

4. Красненко С. С., Недорезов Д. А. Практическое применение модульных приборов компании National Instruments при разработке имитаторов радионавигационных сигналов // Интеллект и наука : тр. XII Междунар. науч. конф. Железногорск, 2012.

5. National Instruments измерительные платформы и приборы [Электронный ресурс]. URL: <http://www.labview.ru>.

#### References

1. Korobov A. I. *Ispytanie radioelektronnoi, elektronno-vychislitelnoi apparatury i ispytatelnoe oborudovanie* (Tests of electronic, electronic computing equipment and test equipment: studies. aid for higher education). Moscow, 1987, 272 p.

2. Pichkalev A. V. Creation of the automated mobile test complex for industrial tests of program-controlled radio-electronic equipment [Sozdanie avtomatizirovannogo mobilnogo kompleksa dla cehovuh isputanii programno-uypravlaemoi radioelektronnoi apparatury]. *Materialu XIII mezhdunarod. nauch. konf. "Reshetnevskie chtenia"* (Proceedings of XIII International. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"). Krasnoyarsk, 2009, Part 2, 528 p.

3. Krasnenko S. S., Pichkalev A. V. Ways of signal formation in radionavigating simulators [Sposobu formirovaniy signalov v radionavigacionnuh imitatorah]. *Navigacionnue sputnikovue sistemu, ih rol i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka* (Abstracts of the 2nd Int. scientific and engineering. conf. dedicated to the 30th anniversary of the launch into orbit of the first navigation of the spacecraft "Glonass"). Krasnoyarsk, 2012, 75 p.

4. Krasnenko S. S., Nedorezov D. A. Practical application of modular instruments at National Instruments in the development of radio navigation signals simulators [Prakticheskoe primenenie priborov kompanii National Instruments pri razrabotke imitatorov radionavigacionnuh signalov]. *Trydu XII mezhdunar. nauch. konf. "Intelekt i nayka"* (Tr. XII Intern. Scientific. Conf "Intelligence and Science"). Zheleznogorsk, 2012, 43 p.

5. National Instruments izmeritelnye platformy i pribory (National Instruments measurement platforms and devices). Available at: <http://www.labview.ru>.

© Красненко С. С., Недорезов Д. А.,  
Кашкин В. Б., Пичкалев А. В., 2013

УДК 532.522

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО КРЫЛА В ПОТОКЕ ГАЗА, РАСТЕКАЮЩЕГОСЯ ОТ ЦЕНТРА

И. С. Протевень, М. В. Краев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: kayerfor@mail.ru

На основе представленной модели радиального обтекания газовым потоком полусферической поверхности обосновывается возможность создания достаточной подъемной силы для летательного аппарата нетрадиционной формы. В ходе анализа возможных конструктивных решений выявлены оптимальные геометрические характеристики крыла и двигательной установки. Проведены экспериментальные исследования по определению подъемной силы.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, струйное течение, разрежение, подъемная сила.

## INVESTIGATION OF FLOW-AROUND THE HEMISPHERICAL WING IN A GAS OUTERMOST FLOW

I. S. Proteven, M. V. Kraev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: kayerfor@mail.ru

On the basis of the model of radial gas flow-around the hemispherical surface the authors substantiate the ability to create enough lifting fore for the aircraft of an unconventional shape. During the analysis of possible design solutions the authors detected the optimal geometry of the wing and the propulsion system and peformed experimental researches on estimation of the lifting force.

**Keywords:** aircraft, jet stream, the vacuum, the lift.

В работе рассматривается возможность создания летательного аппарата нетрадиционной формы. На основе анализа возможных конструктивных решений рассматривается модель (рис. 1) обтекания крыла полусферической формы (1) газовым потоком, источником которого является двигательная установка (2), расположенная в центре летательного аппарата (ЛА). Подъемная сила ЛА создается за счет разрежения потока газа, растекающегося радиально, создаваемого на верхней поверхности диска. В состав двигательной установки входят радиальный вентилятор (3), секция поворотных лопаток (4), спрямляющих поток.

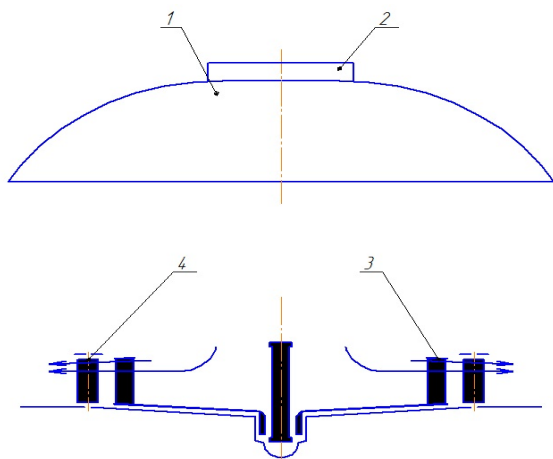


Рис. 1. Летательный аппарат и двигательная установка

**Постановка задачи.** Подъемная сила, уравновешивающая силу гравитации, создается за счет разности давлений на нижней и верхней поверхностях платформы (рис. 2). Разрежение на верхней поверхности образуется за счет взаимодействия истекающей в радиальном направлении струи газа с верхней поверхностью аппарата.

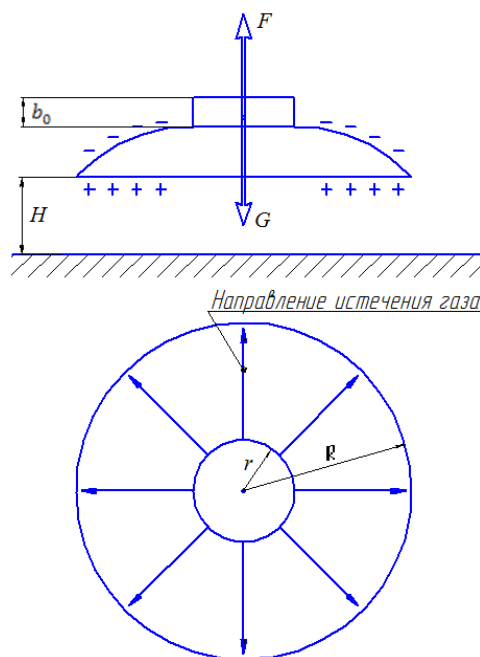


Рис. 2. Рабочая поверхность ЛА

Для заданных условий были определены массовый расход газового потока; характеристики обтекания рабочей поверхности ЛА при изменении основных параметров (размер сопла двигательной установки –  $b_0$  и скорость истечения из сопла –  $u_0$ ), а также подъемная сила.

Анализ многочисленных экспериментов со струями [1–6] показал, что результаты измерений профилей скорости и температуры в турбулентных свободных слоях смещения, построенные в соответствующих безразмерных координатах, оказываются универсальными. Суть универсальности этих профилей заключается в том, что если выбрать характерный размер течения  $\delta(x)$  и скорость  $V(x)$ , то в произвольном сечении струи, расположенном от сопла на расстоянии  $x$ , скорость  $u$  можно представить в виде  $u/V(x) = f(\eta)$ , где  $f(\eta)$  – функция подобия;  $\eta = y/\delta(x)$  [7].

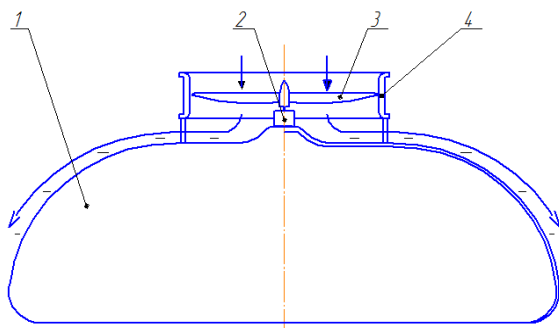


Рис. 3. Схема экспериментальной модели



Рис. 4. Экспериментальная модель

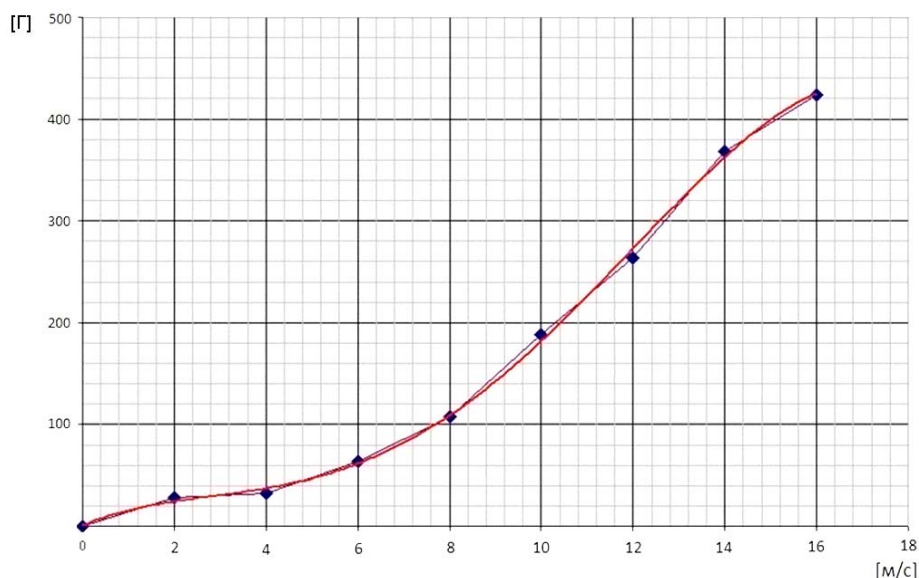


Рис. 5. Зависимость подъемной силы от скорости истечения потока

#### Библиографические ссылки

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1978.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974.
3. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М. : Физматгиз, 1960.

На основе проведенных исследований был выбран вариант специального обтекаемого профиля (рис. 3) для создания наибольшей тяги и разработана схема экспериментальной модели. В центре обтекаемой формы (1) установлен электромотор (2), вращающий винт  $229 \times 152$  (3), закрытый воздуховодом (4).

Экспериментальная модель обтекаемого профиля была сформована из стекловолкна, с использованием специальной матрицы (рис. 4).

Полученная из эксперимента графическая зависимость изменения подъемной силы [грамм] от скорости потока [м/с], вытекающего из воздуховода, измеряемого анемометром, приведена на рис. 5.

Анализируя приведенный на рис. 5 график подъемной силы видим, что в широком диапазоне скоростей полученная зависимость имеет преимущественно параболический характер, что хорошо согласуется с теоретической моделью обтекания ЛА.

4. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов. М. : Машиностроение, 1969.

5. Bradbury L. J. S. The structure of a self-preserving turbulent plane jet. // J. Fluid Mech. 1965. Vol. 23, pt. 1. P. 31–64.

6. Wygnanski J., Fiedler H. E. Two-dimensional mixing region // Ibid. 1970. Vol. 41, pt. 2. P. 327–361.

7. Баренблатт Г. И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л. : Гидрометеиздат, 1982.

# Referens

1. Loytsyanskiy L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Fluid Mechanics.). Moscow, Nauka, 1978, 736 p.

2. Shlikhting G. *Teoriya pogrannichnogo sloya* (Theory of the boundary layer). Moscow, Nauka, 1974, 712 p.

3. Abramovich G. N. *Teoriya turbulentnykh struy* (The theory of turbulent jets). Moscow, Fizmatgiz, 1960, 715 p.

4. Ginevskiy A. S. *Teoriya turbulentnykh struy i sledov* (The theory of turbulent jets and tracks). Moscow, Mashinostroyeniye, 1969, 400 p.

5. Bradbury L. J. S. The structure of a self-preserving turbulent plane jet. *J. Fluid Mech*, 1965, vol. 23, pt. 1, pp. 31–64.

6. Wygnanski J., Fiedler H. E. Two-dimensional mixing region // *Ibid.* 1970, vol. 41, pt. 2, pp. 327–361.

7. Barenblatt G. I. *Podobiye, avtomodel'nost', promezhutochnaya asimptotika* (Similarity, self-similarity, the intermediate asymptotic behavior). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1982, 256 p.

© Протевень И. С., Краев М. В., 2013

УДК 629.7/621.01

## О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Е. А. Фурманова, О. Г. Бойко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: bouko1962@yandex.ru

*В работе исследуются точности оценок надежности систем с учетом вероятностного характера формирования состава их элементов. Показана необходимость учета рассеяния характеристик надежности элементов, определенных по результатам их испытаний, и рассеяния этих характеристик при их формировании в системы, оцениваемых теоремами Чебышева и Маркова.*

*Ключевые слова: надежность, выбор наугад, среднее квадратическое отклонение, параметр потока отказов.*

## ABOUT THE ACCURACY OF SYSTEMS RELIABILITY DEFINITION WITH STATISTIC METHODS

E. A. Furmanova, O. G. Boyko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: bouko1962@yandex.ru

*The authors consider systems reliability estimation accuracy with the account of probabilistic character of formation of their elements composition. The necessity of the account of dispersion of reliability characteristics of the elements is shown. These characteristics may be defined with their tests results or with the results of these characteristics scattering during their forming into systems. These results may be estimated by theorems of Chebishev and Markov.*

*Keywords: reliability, random choice, standard deviation, refusals stream parameter.*

Традиционно точность статистических оценок, в том числе и надежности, принято определять, используя известные методы расчета доверительных вероятностей на доверительных интервалах. Но эта оценка относится к номинальным значениям, полученным в результате вероятностно-статистических расчетов. При этом сама оценка принимается как безусловная данность. В предлагаемой работе рассматриваются диапазоны возможного рассеяния расчетных оценок надежности элементов и функциональных систем. Рассеяние характеристик надежности элемен-

тов определяется по результатам их испытаний. А рассеяние характеристик надежности систем определяется случайным процессом их формирования из элементов.

Функциональные системы самолетов (например, гидравлическая, топливная, кондиционирования воздуха, система электроснабжения и др.) формируются путем последовательного и параллельного соединения элементов в определенные структуры. Элементами систем являются механические и гидромеханические агрегаты, электронные блоки и преобразователи. Характерной особенностью эксплуатации самолетных

систем является их восстанавливаемость. После посадки самолета любой отказавший элемент заменяется исправным. При расчете надежности таких систем традиционно применяют теорему умножения вероятностей, в соответствии с которой при последовательном соединении перемножают вероятности безотказной работы, а при параллельном – вероятности отказов. Границы применимости такого подхода подробно проанализированы в работах [1–3].

В предлагаемой работе, в порядке обсуждения, исследование вопросов точности и рассеяния вероятностных оценок надежности систем, выполнено с использованием нового методологического подхода, в котором теорема умножения вероятностей не применяется [4; 5]. Предлагаемый подход основан на том, что вероятность первого отказа элемента в системе определяется суммарным параметром потоков отказов элементов, составляющих систему, и ее наработкой. В работах [3–5] предложено, при стационарном процессе эксплуатации восстанавливаемых авиационных систем, в качестве математической модели вероятности времени отказов элементов, принимать распределение равномерной плотности. Тогда вероятность отказа первого элемента в системе определится как

$$q_1(t) = \omega_{\Sigma} \cdot t, \quad 0 \leq t \leq \frac{1}{\omega_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где  $\omega_{\Sigma}$  – суммарный параметр потока отказов  $N$  элементов, составляющих систему, определяемый как

$$\omega_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \omega_i, \quad (2)$$

где  $\omega_i$  – параметр потока отказов  $i$ -го элемента в системе.

В случае когда все элементы системы имеют одинаковые параметры потоков отказов выражение (2) будет иметь вид

$$\omega_{\Sigma} = N \cdot \omega.$$

Данный подход обеспечивает возможность определения времен отказов элементов, при которых происходит изменение структуры системы. И позволяет рассчитывать надежность систем как без учета восстановления, так и с его учетом. Методы решения этих задач применительно к расчету надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации, изложены в работах [6–8]. В предлагаемой работе оценка точности значений времени до отказа элементов выполнена только применительно к первому отказу в системе. Следует сразу отметить, что при решении задач вероятностно-статистическими методами мы не можем заранее знать, какой именно элемент откажет в момент времени  $t_1$ .

Положив вероятность первого отказа  $q_1(t) = 1$ , определим из (1) время первого отказа в системе как

$$t_1 = \frac{1}{\omega_{\Sigma}}. \quad (3)$$

В целях получения и сравнения числовых оценок рассмотрим расчет для приближенного аналога гидросистемы самолета Ту-154М. Гидросистема состоит из  $N = 60$  элементов, расположенных в трех параллельных подсистемах, по 20 последовательно включенных элементов в каждой. В расчетах аналога, примем параметр потока отказов для всех элементов одинаковый и равный  $\omega = 1 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ , так как гидросистема самолета Ту-154М имеет примерно такие же значения для агрегатов. Время до первого отказа в системе не зависит от схемы соединения элементов и в рассматриваемом случае в соответствии с [6; 8] и выражением (1) при  $q_1(t) = 1$  определится как

$$t_1 = \frac{1}{N \cdot \omega} = \frac{1}{60 \cdot 1 \cdot 10^{-4}} = 166,6 \text{ ч.}$$

Следует отметить, что эта расчетная наработка на отказ элемента в системе близка к наработке элементов в системе Ту-154М, определенной по эксплуатационным данным.

Параметр потока отказов элемента системы определяется его средней наработкой на отказ  $\omega = \frac{1}{t_{\text{ср}}}$ .

При этом  $t_{\text{ср}}$  определяется по результатам испытания большой совокупности однотипных элементов по плану испытаний с восстановлением. Таким образом,  $t_{\text{ср}}$  является статистически средним для функции распределения вероятности отказа элементов  $q^*(t)$  (см. рисунок). При распределении равномерной плотности, диапазон возможных наработок элементов на отказ изменяется от 0 до  $2t_{\text{ср}}$ .

Авиационные элементы изготавливают на сертифицированных предприятиях по сертифицированным технологиям. Элементы, устанавливаемые в системы самолета при комплектовании или замене отказавших, берутся из партии случайным образом. При этом в системе с одинаковой вероятностью могут устанавливаться элементы с различными наработками на отказ, изменяющимися в диапазоне от 0 до  $2t_{\text{ср}}$ .

Допустим, что в системе, при сохранении  $\omega_{\Sigma}$  неизменным, установлен один из наугад выбранных элементов, имеющий наработку на отказ, равную  $t_i = 1 \text{ ч}$ . Вероятность события  $P_1$ , выбора наугад из всей партии элементов именно такого элемента, определится как

$$P_1 = \frac{t_i}{2t_{\text{ср}}}. \quad (4)$$

Поскольку в рассматриваемой системе-аналоге 60 элементов, вероятность события  $P_{60}$ , попадания в нее такого элемента, выше и равна

$$P_{60} = \frac{60 \cdot t_i}{2t_{\text{ср}}}. \quad (5)$$



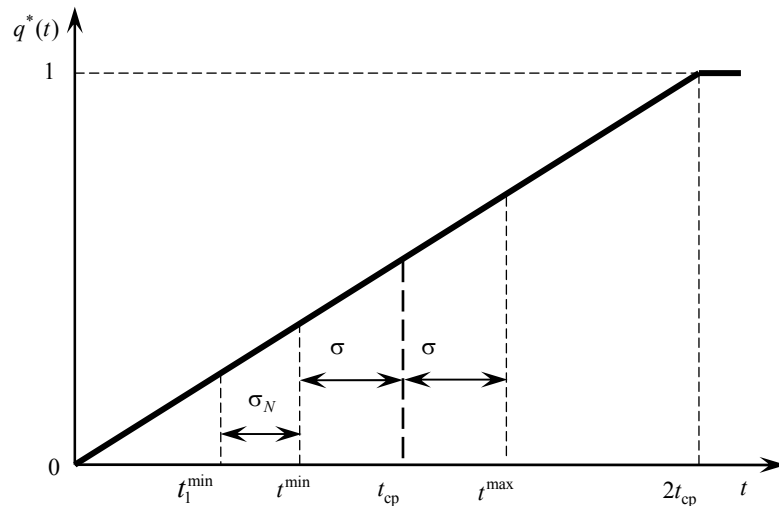


Схема учета среднеквадратических отклонений при определении минимальной наработки на отказ элемента системы

Поскольку рассматриваемый элемент с вероятностью, равной  $q(t) = 1$ , отказывает не в точке времени  $t_i$ , а на интервале  $[0, t_i]$ , то естественно допустить, что он откажет в середине этого интервала, т. е. за время  $t = 0,5 \cdot t_i$ . Отсюда вероятность отказа рассматриваемого элемента на отрезке  $[0, t_i]$  будет

$$q(t_i) = \frac{P_{60}}{0,5 \cdot t_i} \quad (6)$$

Тогда время до отказа этого первого элемента в системе, при условии попадания его в ее структуру, составит

$$t_1 = \frac{0,5 \cdot t_i}{P_{60}} = \frac{t_{ср}}{60} \quad (7)$$

При 60 элементах, имеющих  $t_{ср} = 1 \cdot 10^{-4}$  ч, это время составит 166,6 ч, т. е. тоже, что и  $t_1$ , рассчитанное ранее по (3).

Расчеты показывают, что если принять наработку на отказ выбранного наугад элемента системы равной 10, 100 либо 150 ч, то время до отказа первого элемента в системе  $t_1$  останется прежним и равным  $t_1 = 166,6$  ч, как и определено по выражению (3).

Таким образом, в работе рассмотрена процедура вероятностного комплектования системы элементами выбором их наугад. В соответствии с ней, оценивая время до отказа системы с учетом наименее надежного элемента, необходимо в вероятностной постановке учитывать и вероятности реализации события попадания в систему такого элемента. Второй вывод из полученных результатов указывает на то, что время первого отказа в системе  $t_1$  устойчиво к процедуре ее комплектования выбором наугад элементов и определяется суммарным параметром  $\omega_{\Sigma}$  системы по (3) либо средней наработкой на отказ  $t_{ср}$  по (7).

Таким образом, показано, что  $\omega_{\Sigma}$  и  $t_1$  не зависят от процедуры выбора элементов наугад из некоторой

совокупности. Но поскольку  $\omega_{ср} = \frac{\omega_{\Sigma}}{N}$ , то и  $\omega_{ср}$  и  $t_1$  также не зависят от числа  $N$  выбираемых наугад элементов.

В теории надежности из экспериментально построенного распределения вероятности отказа  $q^*(t)$  используется только одна его числовая характеристика, это  $t_{ср}$  стремящееся к математическому ожиданию. Но если учесть и другую характеристику, т. е. среднеквадратическое отклонение  $\sigma$ , то возможные значения времени до отказа конкретного типа элементов определяются в диапазоне от  $t^{\min}$  до  $t^{\max}$  (см. рисунок), т. е.

$$\begin{aligned} t^{\min} &= t_{ср} - \sigma, \\ t^{\max} &= t_{ср} + \sigma. \end{aligned} \quad (8)$$

Неравенство Чебышева (закон больших чисел) указывает на то, что вероятность отклонений случайной величины от ее математического ожидания может выйти за пределы трех среднеквадратических отклонений не более чем на 1/9. При распределении равномерной плотности вероятность выхода случайной величины за пределы  $\sigma$  составляет 0,71, за пределы  $2\sigma$  – 0,42, и за пределы  $3\sigma$  – 0,13.

В связи с изложенным проблема определения возможных границ отклонения случайной величины, наработки на отказ элемента, от ее математического ожидания представляется актуальной. Ее решение возможно сопоставлением результатов расчета надежности систем с экспериментальными значениями. Выполненные авторами ускоренные испытания восстанавливаемой системы из ламп накаливания показали приемлемость оценки отклонения  $2\sigma$ . При этом для распределения с равномерной плотностью вероятности [9] оценка отклонения примет вид

$$2\sigma = \frac{t_{ср}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

Распределение  $q^*(t)$  определяет надежность одного конкретного типа элементов. Но существует еще рассеяние времени отказов элементов относительно  $t_{cp}$ , зависящее от числа  $N$  выбираемых наугад элементов. Это рассеяние также может быть определено среднеквадратическим отклонением  $\sigma_N$ . Нетрудно понять, что при  $N = 1$   $\sigma_N = \sigma$ , определяемому по (9), а при увеличении  $N$  до бесконечности  $\sigma_N \rightarrow 0$ . Тогда при распределении равномерной плотности  $\sigma_N$  естественно определить как

$$\sigma_N = \frac{t^{\min}}{\sqrt{3 \cdot N}}. \quad (10)$$

Этот же результат получается при использовании одной из основных теорем теории больших чисел теоремы Чебышева [9]. Таким образом, нами получено подтверждение необходимости использования теоремы Чебышева в расчетах надежности систем.

В системах самолетов используются элементы с различными законами распределения вероятности времени до отказа  $q_i^*(t)$ . При стационарном процессе эксплуатации  $q_i^*(t)$  для всех элементов определится распределением равномерной плотности, но со своими числовыми характеристиками  $t_{icp}$  и  $\sigma_i$ . Обобщенная теорема Чебышева для независимых случайных величин доказывает правомерность использования одной из основных теорем закона больших чисел (теоремы Чебышева) и для случаев с различными  $q_i^*(t)$  [9]. Для зависимых случайных величин, правомерность использования теоремы Чебышева доказана в теореме Маркова.

Поскольку для систем самолетов, отказы которых приводят к катастрофическим ситуациям, важно знать нижнюю границу оценки надежности, то в расчетах надежности элементов необходимо использовать оба среднеквадратических отклонения:  $\sigma$ , и  $\sigma_N$ .

Таким образом, вначале необходимо для исходного распределения  $q^*(t)$  конкретного типа элементов определять среднеквадратическое отклонение и минимальное время до отказа как

$$t_1^{\min} = t_{cp} - \frac{t_{cp}}{\sqrt{3}}. \quad (11)$$

Поскольку  $t_{cp}$  и  $t^{\min}$  не зависят от  $N$ , то затем следует учитывать Чебышевское среднеквадратическое отклонение для элементов системы, с учетом их числа в системе. Например, для рассматриваемого случая при равенстве средних наработок на отказ всех элементов минимальное время до отказа первого элемента в системе определится как

$$t_1^{\min} = t^{\min} - \frac{t^{\min}}{\sqrt{3N}}. \quad (12)$$

Тогда с учетом среднеквадратических отклонений  $\sigma$  и  $\sigma_N$  значение параметра потока отказов элемента,

используемое для расчета надежности систем, следует определять в виде

$$\omega = \frac{1}{t_1^{\min}}. \quad (13)$$

Таким образом, показано, что в расчетах надежности систем, при определении параметра потока отказов, необходимо учитывать как значение средней наработки элементов на отказ, определенное по результатам их испытаний, так и среднеквадратическое отклонение этой наработки. Кроме того, поскольку при комплектовании системы элементы из партии берутся наугад, то в расчете надежности системы необходимо учитывать среднеквадратическое отклонение, зависящее от числа элементов в системе и определяемое одной из основных теорем закона больших чисел (теоремой Чебышева).

### Библиографические ссылки

1. Александровская Л. Н., Аронов Н. З. Безопасность и надежность технических систем. М. : Логос, 2008.
2. Теория вероятностей : учебник для вузов / А. В. Печкин [и др.] ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. 3-е изд., испр. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. Вып. XVI.
3. Бойко О. Г. Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации : монография // Избранные тр. Рос. Шк. по проблемам науки и технологий. М. : РАН, 2009.
4. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Моделирование надежности агрегатов функциональных систем самолетов // Проблемы машиностроения и надежности машин. М. : РАН, 2010. № 5. С. 40–47.
5. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Математическое моделирование схемной надежности сложных систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. М. : ВИНТИ РАН, 2010. № 3. С. 82–88.
6. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Метод расчета надежности восстанавливаемых систем с общим резервированием // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники : материалы VII Всерос. науч. конф., посвященной памяти главного конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. С. 223–227.
7. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Исследование методологических подходов к расчету надежности систем с позиций фундаментальных представлений статистической физики // Безопасность и живучесть технических систем : материалы IV Всерос. конф. Красноярск : Изд-во ИФ СО РАН, 2012. Т. 1. С. 229–234.
8. Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г. Новый подход в оценке надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. Казань-Дайтона Бич. 2012. Т. 17, № 2 (35). С. 21–27.
9. Венцель Е. С. Теория вероятностей. М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962.

## Referens

1. Aleksandrovskaya L. N., Aronov N. Z. *Bezopasnost' i nadezhnost' tekhnicheskikh system* (Safety and reliability of technical systems). Moscow, Logos. 2008, 376 p.
2. Pechkin A. V., Teskin O. I., Tsvetkova G. M. et al. *Teoriya veroyatnostey* (Probability theory). Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2004, vol. XVI, 456 p.
3. Boyko O. G. *Nadezhnost' funktsional'nykh sistem samoletov grazhdanskoy aviatsii* (The reliability of the functional systems of civil aircraft). Moscow, RAN, 2009, 119 p.
4. Boyko O. G., Shaymardanov L. G. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*. Moscow, RAN, 2010, № 5, pp. 40–47.
5. Boyko O. G., Shaymardanov L. G. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy*. Moscow, VINITI RAN, 2010, № 3, pp. 82–88.
6. Boyko O. G., Shaymardanov L. G. *Materialy VII Vseros. nauch. konf. "Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii raketno-kosmicheskoy i aviatsionnoy tekhniki"* (Proceedings of the VII All-Russia. Scientific. Conf. "The problems of design, manufacture and operation of the rocket-space and aviation technology"), Omsk, Omsk State Technical University Publishing House, 2012, pp. 223–227.
7. Boyko O. G., Shaymardanov L. G. *Materialy IV Vseros. konf. "Bezopasnost' i zhivuchest' tekhnicheskikh sistem"* (Proceedings of the IV All-Russia. Conf. "Safety and Survivability Technical Systems"), Krasnoyarsk, Publishing House of SB Russian Academy of Sciences IF., 2012, vol. 1, pp. 229–234.
8. Boyko O. G., Shaymardanov L. G. *Aktual'nyye problemy aviatsionnykh i aerokosmicheskikh sistem*, Kazan'-Daytona Bich, 2012, vol. 17, № 2 (35), pp. 21–27.
9. Ventsel Ye. S. *Teoriya veroyatnostey* (Probability). Moscow, Gosudarstvennoye izd. f.-m. lit-ry, 1962, 563 p.

© Фурманова Е. А., Бойко О. Г., 2013

УДК 629.78

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ УПРУГОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С СИЛОВЫМ ГИРОСКОПИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ НА БАЗЕ ГИРОДИНА ГД 02-150

Е. Н. Якимов<sup>1</sup>, В. А. Раевский<sup>1</sup>, М. В. Лукьяненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени М. Ф. Решетнева»

Россия, 662972, Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

Рассмотрены актуальные вопросы исследования динамики системы ориентации и стабилизации (СОС) с учетом нежесткости элементов конструкции космического аппарата (КА). Проведены исследования резонансных упругих колебаний в нежестких элементах конструкции КА, таких как панели батареи солнечной (БС) и антенны бортового радиотехнического комплекса (БРТК), возбуждаемых возмущающими моментами силового гироскопического комплекса (СГК) на базе гиродина ГД 02-150 (далее ГД), при формировании им требуемого управляющего момента. Проведен анализ свободного движения «упругого» КА с непрерывным заданием скорости рамки, динамики свободного движения «упругого» КА при воздействии на него моментов со стороны силового гироскопа (СГ) ГД и ошибок от упругих колебаний при работе СГК в контуре управления. Дана оценка величины динамической ошибки ориентации связанной системы координат относительно заданной и угловых отклонений антенны от номинального положения, обусловленных упругими колебаниями. По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации по устранению резонансных упругих колебаний в нежестких элементах конструкции КА.

Ключевые слова: система ориентации и стабилизации, силовой гироскопический комплекс, элементы конструкции, резонансные упругие колебания, динамическая ошибка ориентации, алгоритм управления, возмущающий момент.

# ANALYSIS OF THE DYNAMIC PERFORMANCE OF THE POINTING AND ATTITUDE CONTROL SUBSYSTEM OF THE RESILIENT SPACECRAFT WITH POWER GYROSCOPIC UNIT ON THE BASIS OF ГД 02-150 GYRODYNE

E. N. Yakimov<sup>1</sup>, V. A. Raevskiy<sup>1</sup>, M. V. Lukyanenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev"

52 Lenin st., Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

<sup>2</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

*The actual issues of the analysis of the dynamic performance of pointing and attitude control subsystem including elasticity of spacecraft construction units are considered. Investigations of the resonant elastic vibrations of elastic spacecraft construction units, such as solar array panels and communication payload antennas excited by perturbing moments of power gyroscopic unit on the basis of ГД 02-150 gyrodyne when required control moment is being formed, are conducted. The analysis of zero-input response of elastic spacecraft with continuous gyro gimbal speed setting, zero-input response dynamic performance of elastic spacecraft when the gyrodyne moments are applied and elastic vibrations errors caused by power gyroscopic unit operation in the subsystem control loop are, are carried out. The assessment of the attitude dynamic error between the connected and the given coordinate systems, and antenna angular deviations from its nominal position caused by the elastic vibrations, is given. Recommendations how to eliminate resonance elastic vibrations of elastic spacecraft construction units are developed basing on the results of the performed investigations.*

**Keywords:** attitude and orbit control subsystem, power gyroscopic unit, construction units, resonant elastic vibrations, attitude dynamic error, control algorithm, perturbing moment.

При исследовании динамики СОС с учетом нежесткости элементов конструкции КА решаются две задачи: синтез алгоритмов управления, обеспечивающих требуемые запасы устойчивости и анализ динамических ошибок от упругих колебаний конструкции в установившемся движении.

В статье проведен анализ резонансных упругих колебаний в нежестких элементах конструкции КА (панели БС и антенны БРТК), возбуждаемых возмущающими моментами СГК на базе ГД, при формировании им требуемого управляющего момента. Дана оценка величины динамической ошибки ориентации связанной системы координат относительно заданной и угловых отклонений антенны от номинального положения, обусловленных упругими колебаниями.

Проведенные исследования позволили выработать рекомендации по устранению резонансных упругих колебаний в нежестких элементах конструкции КА.

При определении амплитуд угловых колебаний корпуса КА и нежестких элементов конструкции, возбуждаемых возмущающими моментами при работе основных исполнительных органов СОС-гиродинов, использовалась математическая модель «упругого» КА. Под возмущающими понимаются моменты, формируемые относительно среднего, требуемого управляющего момента. При изменении возмущающего момента с частотой, близкой или равной собственной частоте упругих колебаний объекта, возможно возникновение резонансных колебаний. Максимальные амплитуды упругих колебаний возникают на низших собственных частотах «упругого» КА, поэтому расчетная модель должна обеспечивать частоты и коэффициенты инерционного влияния в низкочастотной области [1].

Расчетная схема «упругого» КА, полученная при следующих допущениях, приведена на рис. 1:

- корпус КА представляется сосредоточенной массой с его собственными моментами инерции;
- упругие подконструкции (антенны БРТК и крылья панелей БС) представляются упругим безмассовым стержнем, на конце которого сосредоточена вся масса подконструкции;
- учитываются только асимметричные колебания крыльев БС (худший случай).

Имеем:

$$\begin{cases} J\ddot{\omega} + 2J_p\ddot{\gamma}_p + (T_{a1\_c}J_a^a + [R_{0a1} \times] M_a T_{a1\_c} L_{a1}) \ddot{\gamma}_{a1}^{a1} + \\ + (T_{a2\_c}J_a^a + [R_{0a2} \times] M_a T_{a2\_c} L_{a2}) \ddot{\gamma}_{a2}^{a2} = M_{ГД}, \\ \ddot{\omega} + \ddot{\gamma}_p + \frac{\delta}{\pi} \omega_p \dot{\gamma}_p + \omega_p^2 \gamma_p = 0, \\ (T_{a1\_c})^T \ddot{\omega} + \ddot{\gamma}_{a1}^{a1} + \frac{\delta}{\pi} \omega_a^a \dot{\gamma}_{a1}^{a1} + (\omega_a^a)^2 \gamma_{a1}^{a1} = 0, \\ (T_{a2\_c})^T \ddot{\omega} + \ddot{\gamma}_{a2}^{a2} + \frac{\delta}{\pi} \omega_a^a \dot{\gamma}_{a2}^{a2} + (\omega_a^a)^2 \gamma_{a2}^{a2} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Оценка точности совпадения принятой модели с конечно-элементной моделью производилась построением логарифмических амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик каналов управления минимизацией расхождения спектров частот вариацией моментами инерции БС и антенн и их парциальными частотами

Совпадение математических моделей (упрощенной и полной) в низкочастотном диапазоне показано в табл. 1.

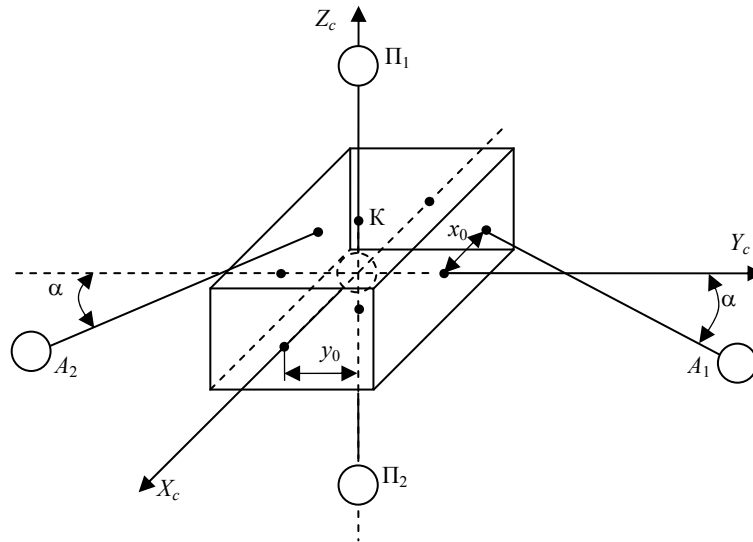


Рис. 1. Расчетная схема «упругого» КА

Таблица 1

| № частоты | Частота, Гц                                                   |           |             |           |               |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-----------|
|           | Канал рыскания                                                |           | Канал крена |           | Канал тангажа |           |
|           | UprModel                                                      | FullModel | UprModel    | FullModel | UprModel      | FullModel |
| 1         | 0,139 4                                                       | 0,140 4   | 0,226 4     | 0,228 2   | 0,176 8       | 0,176 6   |
| 2         | 0,275 9                                                       | 0,276 6   | 0,289 0     | 0,292 0   | 0,471 9       | 0,462 5   |
| 3         | 0,645 0                                                       | 0,659 1   | 0,468 7     | 0,464 5   | –             | –         |
| 4         | –                                                             | 0,873 3   | –           | –         | –             | –         |
| № частоты | Погрешность резонансных частот упрощенной модели от полной, % |           |             |           |               |           |
|           | Канал рыскания                                                |           | Канал крена |           | Канал тангажа |           |
|           |                                                               |           |             |           |               |           |
| 1         | 0,71                                                          |           | 0,79        |           | 0,11          |           |
| 2         | 0,25                                                          |           | 1,03        |           | 2,03          |           |
| 3         | 2,14                                                          |           | 0,90        |           | –             |           |
| 4         | 100                                                           |           | –           |           | –             |           |

Для проведения анализа свободного движения «упругого» КА, в состав которого входит ГД, кроме математической модели «упругого» КА необходима математическая модель ГД [2].

ГД представляет собой механическую систему из двух функциональных частей: СГ и привод вращения рамки (ПВР) (рис. 2).

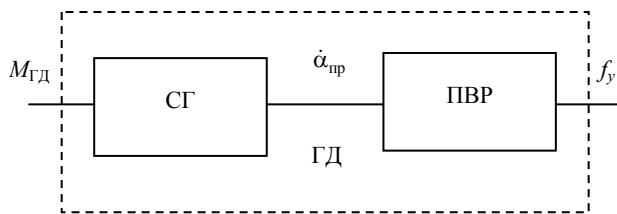


Рис. 2. Функциональная схема гироина

Момент гироина равен  $M_{ГД} = H \cdot \dot{\alpha}_{пр}$ , где  $M_{ГД}$  – момент, создаваемый гироином;  $H$  – кинетический момент маховика ( $H = \text{const}$ ),  $\dot{\alpha}_{пр}$  – скорость вращения рамки, создаваемая ПВР,  $f_y$  – управляющая частота шагового двигателя (ШД) ПВР.

В качестве математической модели ПВР взята модель ШД с вязкостью, которая описывается уравнениями

$$M_d - M_n = (J_d + J_n) \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + K_d \frac{d\alpha}{dt},$$

$$M_d = M_{эм} - M_{\phi} = M_0 \cos(4\alpha) - M_{\phi 0} \sin(16\alpha), \quad (2)$$

$$M_0 = K_m I_{\phi}, \quad M_n = M_c \operatorname{sign} \left( \frac{d\alpha}{dt} \right),$$

где  $I_{\phi}$  – фазный ток ШД,  $J_d$  – момент инерции ротора ШД,  $J_n$  – момент инерции нагрузки, приведенный к ротору ШД,  $K_m$  – коэффициент пропорциональности,  $M_0$  – амплитуда электромагнитного момента,  $M_d$  – динамический момент,  $M_n$  – момент нагрузки (при наличии редуктора момент нагрузки принимаем равным моменту сопротивления, приведенному к ротору ШД),  $M_{\phi}$  – момент фиксации ШД,  $M_{\phi 0}$  – амплитуда момента фиксации,  $M_{эм}$  – электромагнитный момент ШД,  $\alpha$  – угол поворота ротора ШД.

Введя оператор  $s = \frac{d}{dt}$ , преобразуем вышеприведенные уравнения (2) в одно:

$$K_m I_\phi \cos(4\alpha) - M_{\phi 0} \sin(16\alpha) - \\ - M_c \sin(\dot{\alpha}) = \left[ (J_d + J_p) s^2 + K_d s \right] \alpha.$$

Гироскопический момент формируется импульсами, пропорциональными частоте управления.

В процессе отслеживания орбитального движения и парирования внешних возмущающих моментов скорости рамок ГД медленно меняются и могут считаться постоянными. Тогда, задавая частоту импульсов, соответствующую одной из собственных частот

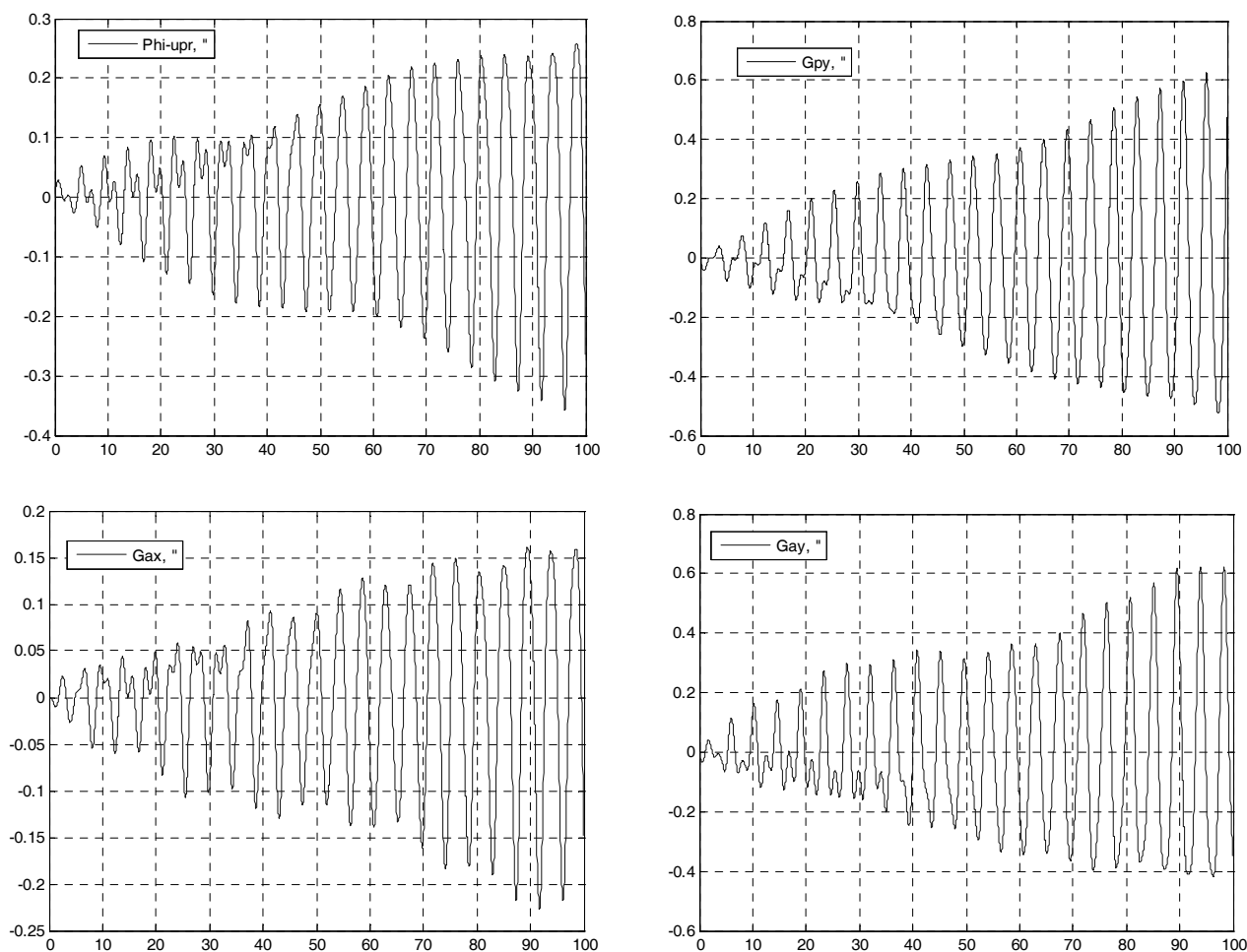
«упругого» КА, можно ожидать возникновения резонансных колебаний конструкции на этой частоте. Было проведено численное моделирование движения «упругого» КА при задании частот управления ПВР, равными частотам упругих колебаний КА.

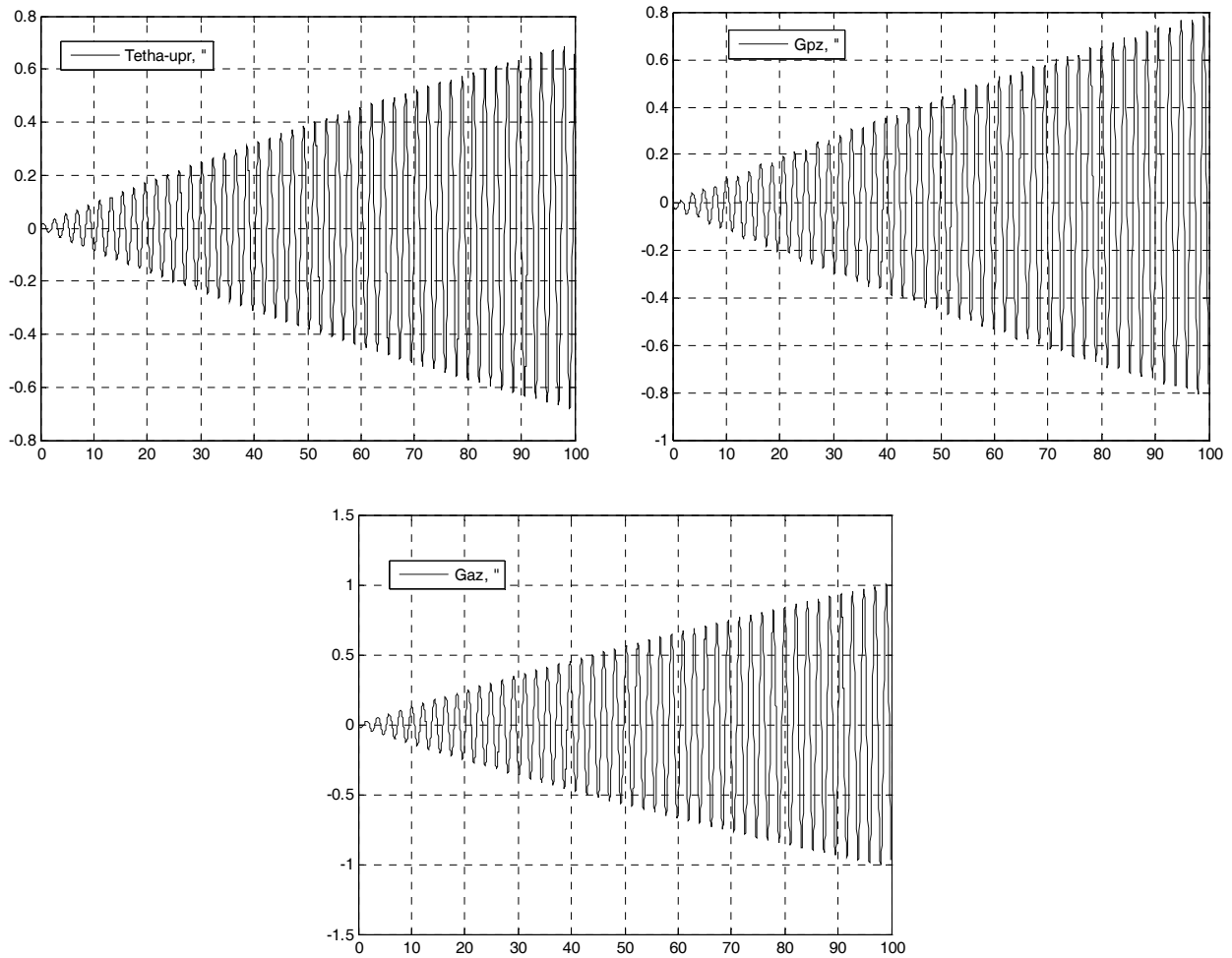
Значения установившихся амплитуд колебаний и времена достижения резонанса полученные численными расчетами при задании управляющих моментов в диапазоне 8–34 г.см, соответствующем установившемуся режиму, приведены в табл. 2.

Резонанс по крену и тангажу для примера показан на рис. 3 и 4.

Таблица 2

| Канал    | $\Omega$ , °/с | $f_{\text{рез}}$ , Гц | Угол КА, " | Угол панели, " | Угол антенны, "                   | $t_{\text{рез}}$ , с |
|----------|----------------|-----------------------|------------|----------------|-----------------------------------|----------------------|
| Рыскание | 0,000 3        | 0,139 4               | 1,81       | 4,83           | $G_{ax} = 0,36$ ; $G_{ay} = 0,11$ | 5 000                |
|          | 0,001 3        | 0,645                 | 1,6        | 1,62           | $G_{ax} = 2,27$ ; $G_{ay} = 0,19$ | 1 200                |
| Крен     | 0,000 5        | 0,226 4               | 2,06       | 3,94           | $G_{ax} = 1,32$ ; $G_{ay} = 3,68$ | 2 500                |
|          | 0,000 6        | 0,289                 | 0,67       | 0,91           | $G_{ax} = 3,4$ ; $G_{ay} = 5,12$  | 2 500                |
|          | 0,000 9        | 0,468 7               | 1,95       | 2,17           | $G_{ax} = 0,98$ ; $G_{ay} = 3,5$  | 1 500                |
| Тангаж   | 0,000 9        | 0,472 0               | 1,95       | 2,25           | 2,86                              | 1 500                |

Рис. 3. Резонанс по каналу крена на частоте  $f_{\text{рез}} = 0,2264$  Гц


 Рис. 4. Резонанс по каналу тангажа на частоте  $f_{\text{рез}} = 0,4719 \text{ Гц}$ 

Для выявления резонансных колебаний, связанных с импульсным характером формирования момента ГД используется упрощенная модель СГ, в которой частоты следования импульсов моментов имеют стационарный характер.

$$\begin{aligned}
 J_M \ddot{\alpha}_M + H \dot{\beta}_M &= M_{\text{ГХ}}, \\
 J_M \ddot{\beta}_M - H \dot{\alpha}_M &= M_{\text{ГУ}}, \\
 M_{\text{ГХ}} &= -C_{\alpha M} [\alpha_M - A_0 \text{sign}(\alpha_M)] - n_{\alpha} \dot{\alpha}_M, \\
 M_{\text{ГУ}} &= -C_{\beta M} [(\beta_M - \alpha_{\text{пр}}) - A_0 \text{sign}(\beta_M - \alpha_{\text{пр}})] - \\
 &\quad - n_{\beta} (\dot{\beta}_M - \dot{\alpha}_{\text{пр}}),
 \end{aligned} \quad (3)$$

причем

$$\text{если } |\alpha_M| \leq A_0, \text{ тогда } C_{\alpha M} = 0, n_{\alpha} = 0,$$

$$\text{если } |\beta_M - \alpha_{\text{пр}}| \leq A_0, \text{ тогда } C_{\beta M} = 0, n_{\beta} = 0.$$

Численные расчеты показали: в случае шагового характера задания скорости рамки возникают резонансные упругие колебания при работе ПВР в рабочем диапазоне скоростей, что соответствует диапазону создаваемых моментов 7,8538–34,0329 г.см. Вве-

дение демпфирования в диапазоне 0,005–0,01 Нмс в подшипниках вала маховика не привело к заметно уменьшению амплитуды, изменился лишь характер протекания процесса.

Значения установившихся амплитуд колебаний и времени выхода на резонанс приведены в табл. 3.

Проведен анализ свободного движения «упругого» КА с непрерывным заданием скорости рамки при воздействии на «упругий» КА, описываемый уравнениями (1), одного гироскопа по каждой оси КА в отдельности. Для определения динамических ошибок при появлении резонансных колебаний проведено численное моделирование свободного движения КА.

Значения установившихся амплитуд колебаний и времени выхода на резонанс приведены в табл. 4.

В соответствии с бюджетом ошибок составляющая динамической ошибки от упругих элементов конструкции КА не должна превышать 12 угл. сек. Видно, что даже при работе одного гироскопа амплитуды резонансных колебаний КА и элементов его конструкций значительно превышают эти требования.

Для оценки суммарных амплитуд резонансных колебаний проведено численное моделирование динамики упругого КА с учетом работы СГК в целом, рис. 5.

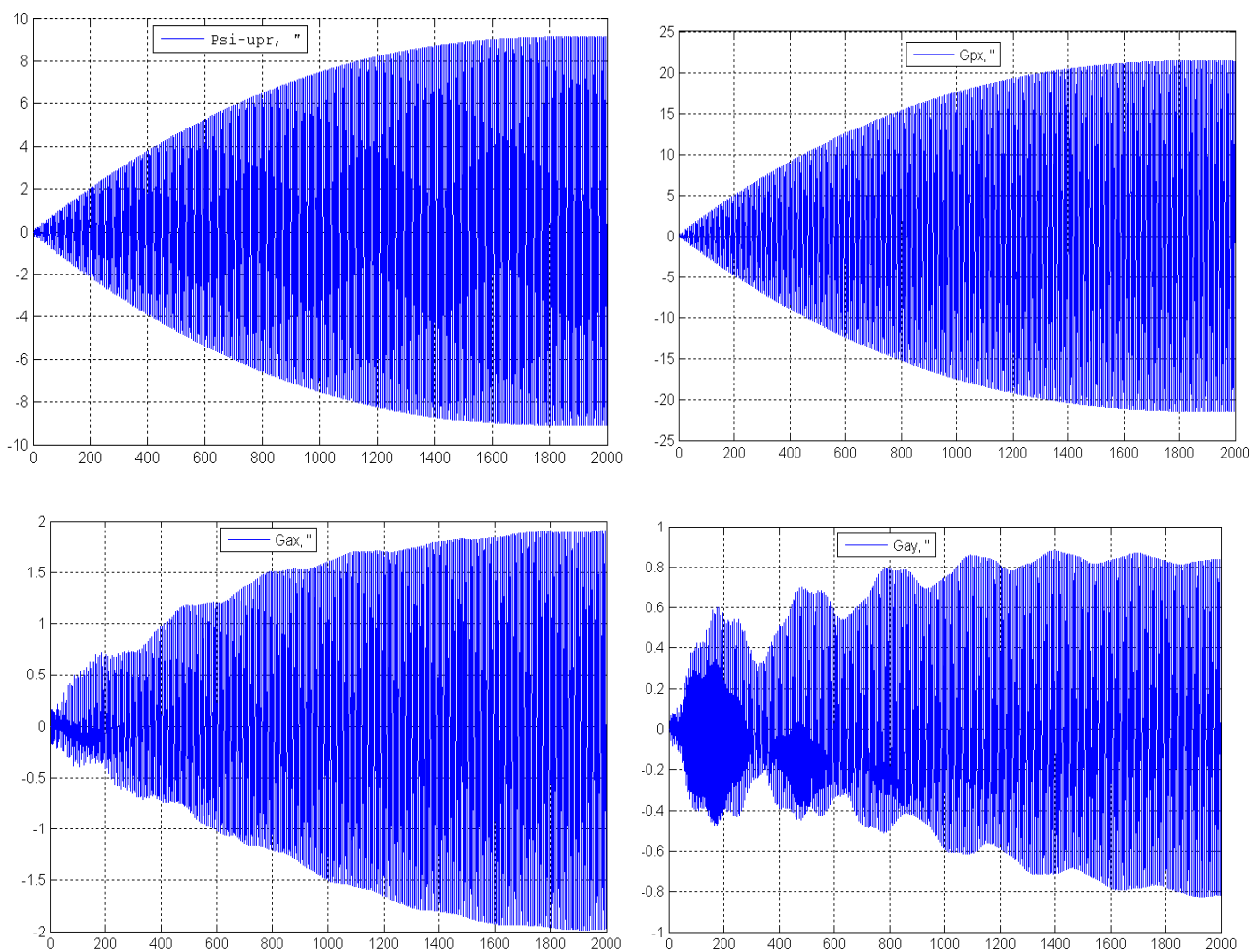
Таблица 3

| Канал    | $\Omega$ , °/с | $f_{\text{рез}}$ , Гц | Угол КА, " | Угол панели, " | Угол антенны, "                   | $t_{\text{рез}}$ , с |
|----------|----------------|-----------------------|------------|----------------|-----------------------------------|----------------------|
| Рыскание | 0,000 3        | 0,139 4               | 1,85       | 4,8            | $G_{ax} = 0,55$ ; $G_{ay} = 0,18$ | 5 000                |
|          | 0,001 3        | 0,645                 | 1,74       | 2,05           | $G_{ax} = 2,53$ ; $G_{ay} = 0,36$ | 1 200                |
|          | 0,001 3        | 0,645*                | 1,85       | 2,11           | $G_{ax} = 2,69$ ; $G_{ay} = 0,38$ | 1 200                |
| Крен     | 0,000 0        | 0,226 4               | 2,32       | 4,26           | $G_{ax} = 1,84$ ; $G_{ay} = 4,43$ | 2 500                |
|          | 0,000 5        | 0,289                 | 0,85       | 1,26           | $G_{ax} = 3,29$ ; $G_{ay} = 5,03$ | 2 500                |
|          | 0,000 6        | 0,468 7               | 2,28       | 2,67           | $G_{ax} = 1,47$ ; $G_{ay} = 4,35$ | 1 500                |
| Тангаж   | 0,000 9        | 0,472 0               | 2,03       | 2,7            | 3                                 | 1 500                |

\* – результаты после введения демпфирования внутри люфта.

Таблица 4

| Канал    | $\Omega$ , рад/с      | $f_{\text{рез}}$ , Гц | Угол КА, " | Угол панели, " | Угол антенны, "                | $t_{\text{рез}}$ , с |
|----------|-----------------------|-----------------------|------------|----------------|--------------------------------|----------------------|
| Рыскание | $3,45 \cdot 10^{-5}$  | 0,139 4               | 9          | 22             | $G_{ax} = 2$ , $G_{ay} = 0,8$  | 1 800                |
|          | $1,649 \cdot 10^{-4}$ | 0,645                 | 11         | 9              | $G_{ax} = 16$ , $G_{ay} = 1,3$ | 500                  |
| Крен     | $5,65 \cdot 10^{-5}$  | 0,226 4               | 11         | 18             | $G_{ax} = 7$ , $G_{ay} = 19$   | 950                  |
|          | $7,22 \cdot 10^{-5}$  | 0,289                 | 2,5        | 3              | $G_{ax} = 13$ , $G_{ay} = 20$  | 850                  |
|          | $1,187 \cdot 10^{-4}$ | 0,468 7               | 13         | 13             | $G_{ax} = 7$ , $G_{ay} = 24$   | 750                  |
| Тангаж   | $1,195 \cdot 10^{-4}$ | 0,471 9               | 13         | 15             | 20                             | 750                  |

Рис. 5. Резонанс по каналу рыскания на частоте  $f_{\text{рез}} = 0,139 4$  Гц



Проведен анализ свободного движения «упругого» КА при воздействии на него моментов со стороны СГ ГД. Исследовано суммарное воздействие на «упругий» КА со стороны ГД, входящих в состав SGK [3] и состоящих из четырех ГД. На вход СГ, входящих в SGK, задавались такие скорости, которые приводили к резонансным упругим колебаниям КА и его элементов.

Один из вариантов уменьшения амплитуд резонансных упругих колебаний заключается в введении в радиальные зазоры подшипников вала маховика вязкого трения. Для определения требуемой величины демпфирования проведено численное моделирование для варианта с наибольшими амплитудами резонансных упругих колебаний.

В табл. 5 приведены значения амплитуд колебаний КА и элементов конструкции при изменении коэффициентов демпфирования.

Введение вязкого трения внутри радиальных зазоров подшипников маховика приводит к уменьшению амплитуды резонансных колебаний КА и элементов его конструкции, рис. 6.

Для оценки допустимого уровня момента со стороны гиродина, обусловленного нестабильностью заданной скорости вращения рамки в варианте моделирования канала крена со скоростью движения рамки  $1,187 \cdot 10^{-4}$  рад/с (максимальные амплитуды резонансов), на задаваемую скорость накладывались синусоидальные колебания, пропорциональные моментам гиродина в диапазоне от 20 гсм до 100 гсм на собственной частоте антенны. Результаты одного из вариантов моделирования приведены на рис. 7.

При амплитуде синусоиды скорости, соответствующей моменту гиродина в 20 гсм максимальная динамическая ошибка от упругих колебаний не превышает 8 угл. сек.

Таблица 5

| Коэффициент демпфирования | Угол КА, " | Угол панели, " | Угол антенны, "     |
|---------------------------|------------|----------------|---------------------|
| 0,005                     | 16,5       | 16,5           | Gax = 8,5, Gay = 30 |
| 0,01                      | 13         | 13             | Gax = 7, Gay = 24   |
| 0,05                      | 5,2        | 5,2            | Gax = 3, Gay = 10   |

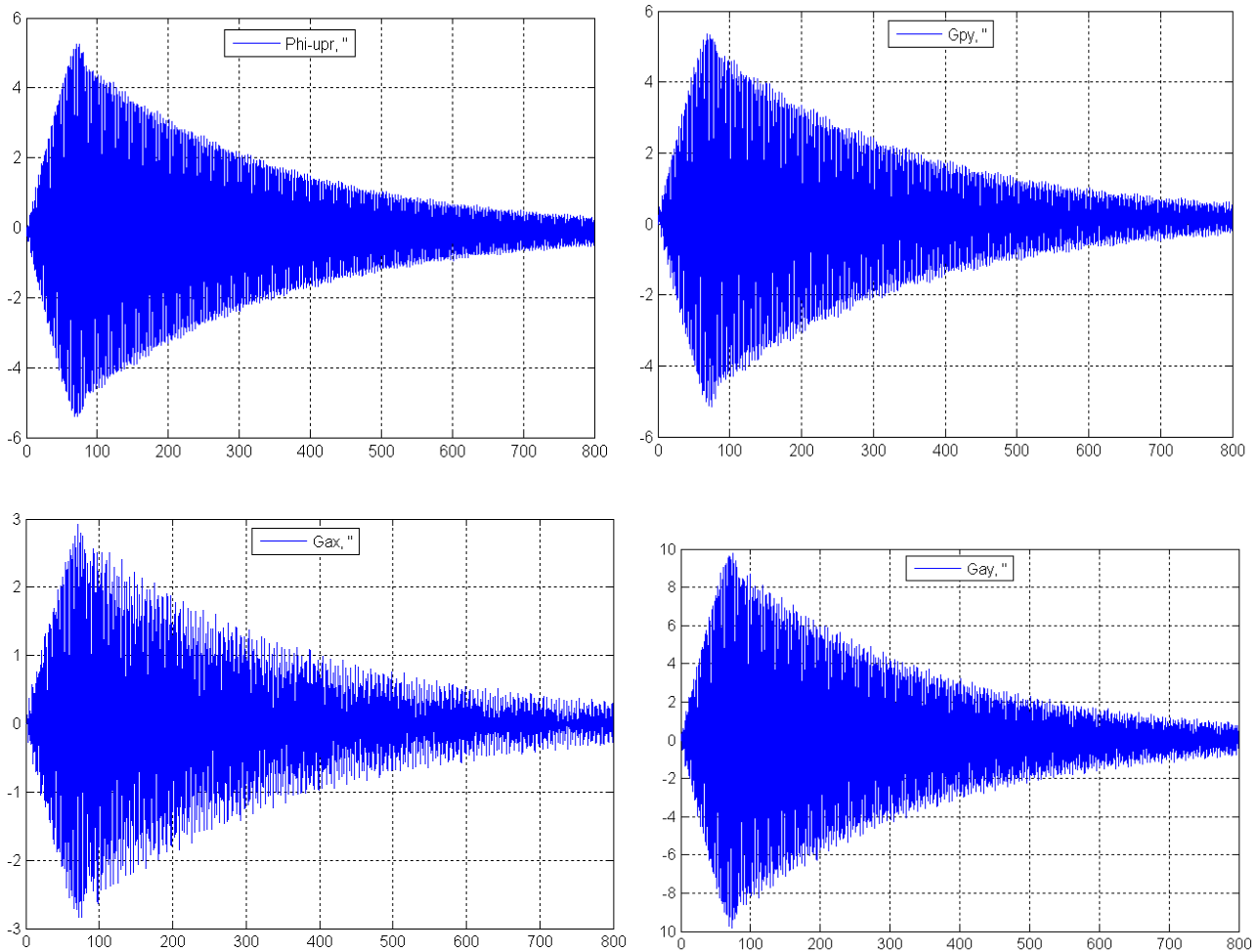


Рис. 6. Резонанс по каналу крена на частоте  $f_{рез} = 0,4687$  Гц (с демпфированием)

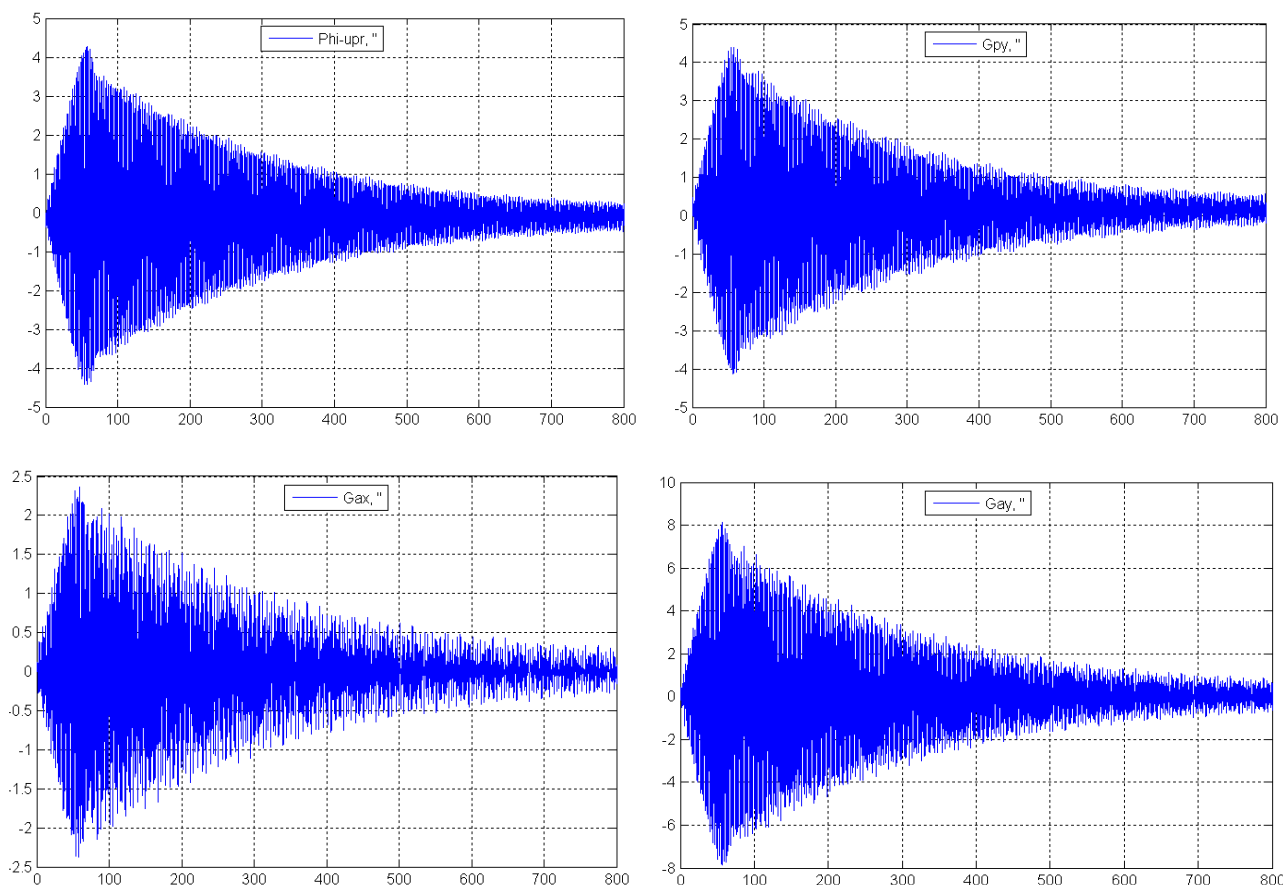


Рис. 7. Резонанс по каналу крена на частоте  $f_{рез} = 0,468\ 7\ Гц$  (с демпфированием от смазки)

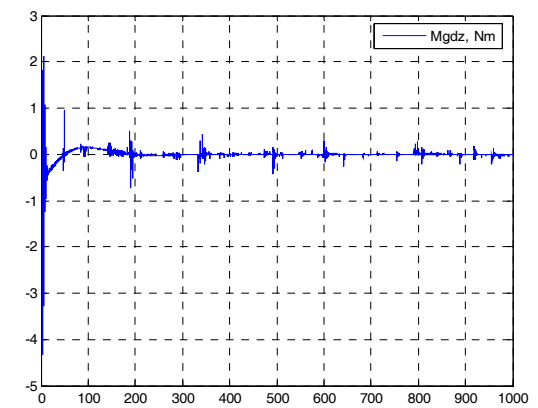
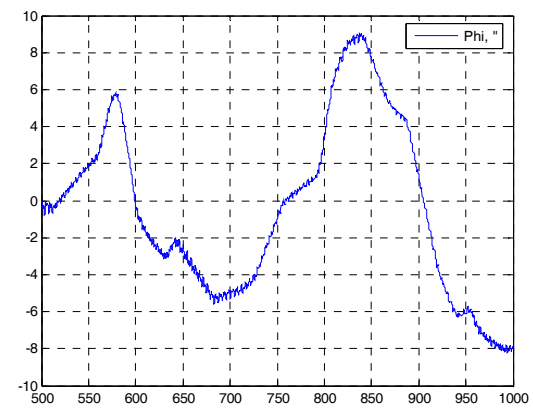
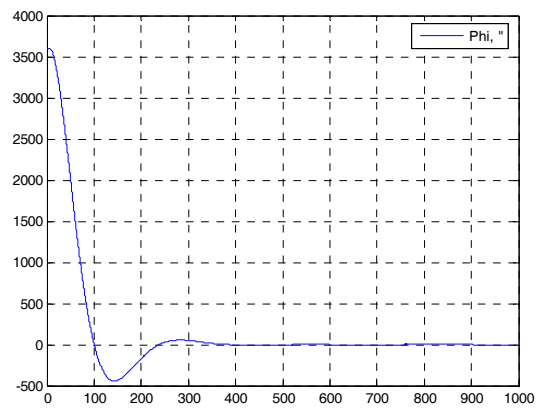
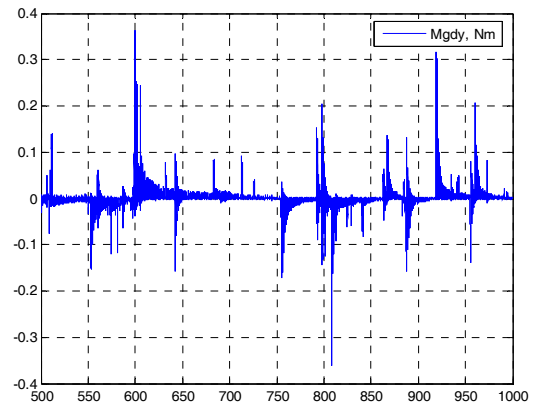
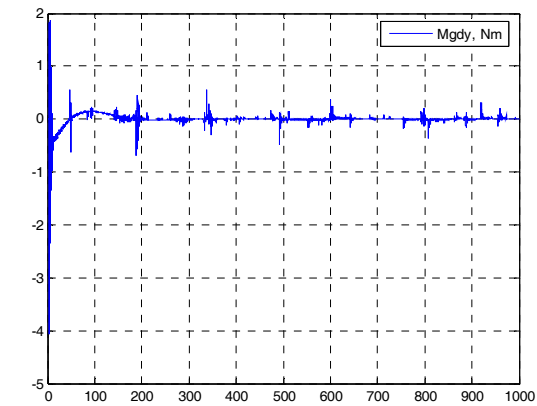
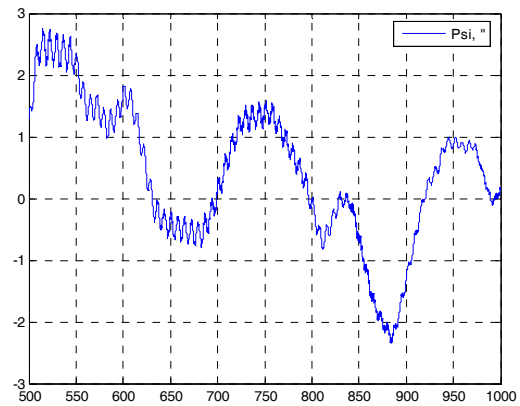
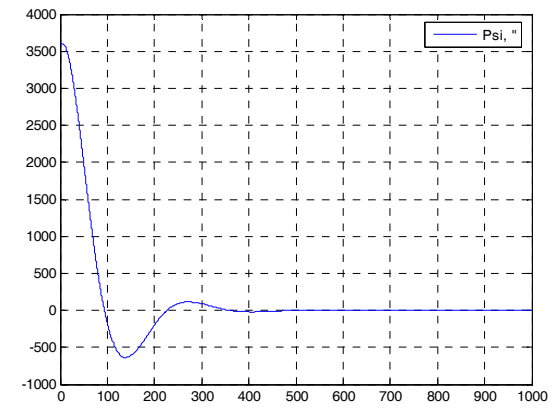
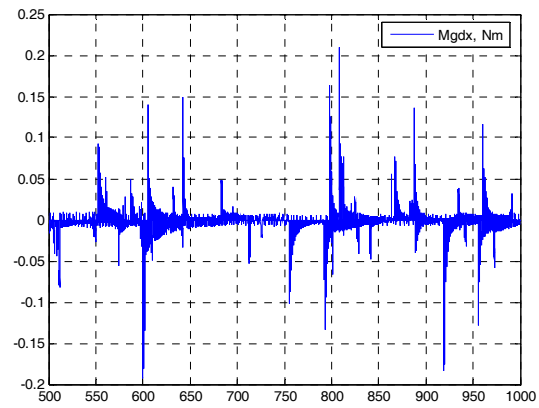
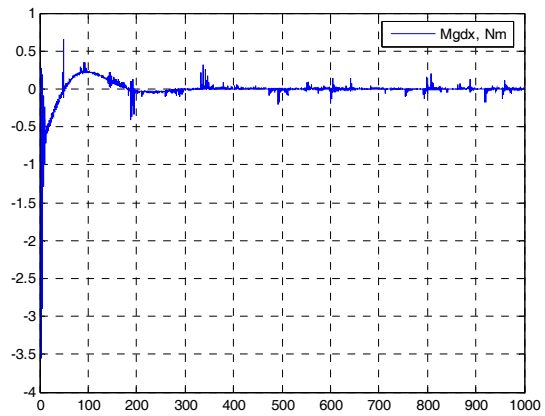
Как отмечалось выше, выявление резонансов с полной моделью СГ затруднено, так как частоты колебания в такой нелинейной системе зависят от амплитуды колебаний в конструкции СГ, поэтому анализировались максимальные амплитуды упругих колебаний конструкции КА при различных скоростях движения рамки. Численное моделирование показало, что амплитуды упругих колебаний КА и его элементов при отсутствии резонансов не превышают допустимых величин. Дополнительно проведено численное моделирование с разными коэффициентами демпфирования на валу СГ и с разными радиальными зазорами подшипников вала маховика, которое показало, что уменьшение радиальных зазоров и введение демпфирования на валу СГ существенно уменьшает амплитуды упругих колебаний КА и его элементов конструкции.

Для определения динамических ошибок от упругих колебаний при работе СГК в контуре управления проведено численное моделирование отработки начальных углов КА с полной моделью СГ. Результаты численного моделирования приведены на рис. 8.

Видно, что динамическая ошибка в установившемся состоянии не превышает 10 угл. сек по угловому движению корпуса, 2 угл. сек по угловому движению панели и 1 угл. сек по угловому движению антенны.

Таким образом, проведенный анализ динамики движения системы «упругий» КА плюс СГ на базе ГД позволяет сделать следующие выводы:

- при совпадении частоты управления скоростью ПВР ГД с собственной частотой упругих колебаний конструкции возникают резонансные упругие колебания нежестких элементов конструкции КА;
- при нулевом коэффициенте вязкого трения внутри зазоров в подшипниках возникают резонансы из-за колебаний маховика ГД, обусловленные нежесткостью вала маховика и радиальными зазорами;
- из-за импульсного характера задания скорости ШД ПВР появляется недопустимо большой уровень «паразитных» моментов, генерируемых ГД;
- при непрерывной постоянной скорости рамок ГД СГК и нулевом вязком трении в зазорах подшипников максимальные амплитуды резонансных колебаний составили по корпусу КА 23 угл. сек, по антенне 41 угл. сек;
- введение вязкого трения в зазорах подшипников СГ с коэффициентом демпфирования не ниже 0,05 Нмс, уменьшение радиальных зазоров подшипников ГД и линейное задание скорости рамки позволяют либо исключить резонансные колебания полностью, либо свести их к периодическим биениям с амплитудами на уровне единиц угловых секунд и длительностью не более 100 с. При этом допустимые величины возмущающих моментов ГД в диапазоне частот от 0–1 Гц, обусловленные нестабильностью задаваемой скорости рамки, не должны превышать 20 гсм.



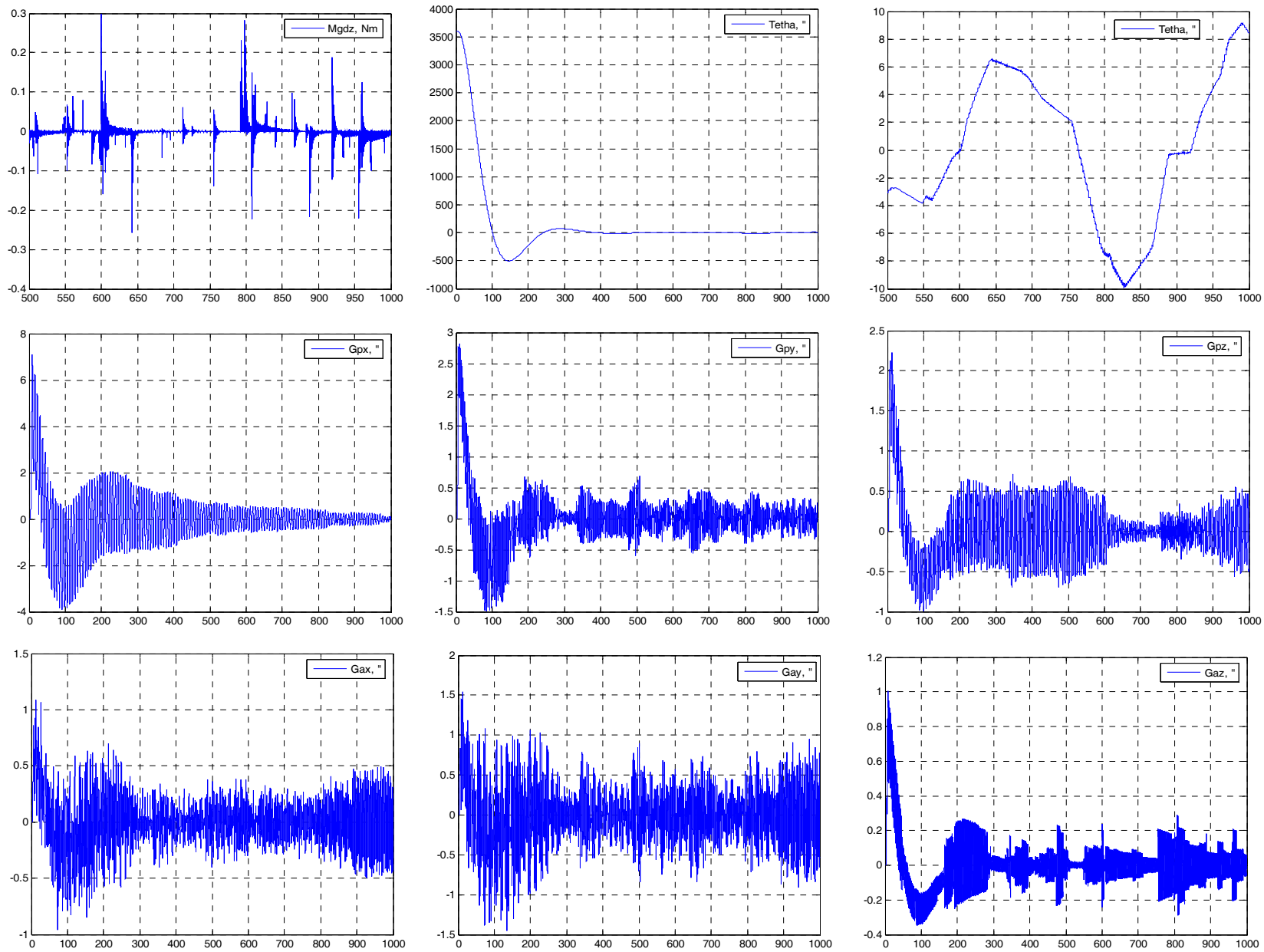


Рис. 8. Результаты численного моделирования отработки начальных углов КА с полной моделью СГ

### Библиографические ссылки

1. Раевский В. А., Якимов Е. Н. Дополнение к эскизному проекту ФЭИТ.371111.004. 2004.
2. Якимов Е. Н. Техническое задание на разработку гиродина ГД-02-150 (771.ТЗ). 2003.
3. Раевский В. А., Лукьяненко М. В. Курбатов Е. М. Современное состояние и перспективы развития систем управления космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2003. Вып. 4. С. 141–147.

### Referens

1. Rayevskiy V. A., Yakimov Ye. N. *Dopolneniye k eskiznomu projektu FEIT.371111.004* (Supplement to the preliminary design FEIT.371111.004), 2004.
2. Yakimov Ye. N. *Tekhnicheskoye zadaniye na razrabotku girodina GD-02-150 (771.TZ)* (Technical specification for development gyrodynes DG-02-150 (771.TZ)), 2003.
3. Rayevskiy V. A., Luk'yanenko M. V. Kurbatov Ye. M. *Vestnik SibGAU*. 2003, № 4, pp. 141–147.

© Якимов Е. Н., Раевский В. А., Лукьяненко М. В., 2013





РАЗДЕЛ  
3



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
ПРОЦЕССЫ  
И МАТЕРИАЛЫ



УДК 539.21:537.86

**МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МУЛЬТИФЕРРОИКОВ  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$** С. С. Аплеснин<sup>1</sup>, В. В. Кретинин<sup>1</sup>, А. А. Остапенко<sup>1</sup>, А. И. Галяс<sup>2</sup>, К. И. Янушкевич<sup>2</sup><sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: apl@iph.krasn.ru<sup>2</sup>Объединенный институт физики твердого тела и полупроводников Национальной академии наук Беларуси  
Беларусь, 220072, Минск, ул. П. Бровки, 19

*Исследуются мультиферроики на основе  $\text{BiFeO}_3$  с пространственно-модулированной антиферромагнитной структурой. Цель работы: определить возможность ориентационных фазовых переходов в магнитной и электрической системах путем замещения висмута 4f-ионом Nd в зависимости от температуры под действием внешнего магнитного поля. На пленках  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  проведены измерения диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь в интервале частот  $100 \text{ Hz} < \omega < 10^5 \text{ Hz}$  в области температур  $300 \text{ K} < T < 1000 \text{ K}$  без магнитного поля и в магнитном поле  $B = 0,8 \text{ Тл}$ . Обнаружен скачок в температурной зависимости диэлектрической проницаемости в магнитном поле. Магнитоэлектрические свойства объясняются в рамках модели изменения магнитной структуры в магнитном поле в результате взаимодействия между электрической и магнитной подсистемами.*

*Ключевые слова:* мультиферроики, магнитоемкость, релаксация, диэлектрическая проницаемость.

**MAGNETOELECTRIC PROPERTIES OF  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  MULTIFERROICS**S. S. Aplesnin<sup>1</sup>, V. V. Kretinin<sup>1</sup>, A. A. Ostapenko<sup>1</sup>, A. I. Galyas<sup>2</sup>, K. I. Yanushkevich<sup>2</sup><sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: apl@iph.krasn.ru<sup>2</sup>United Institute of Solid State Physics and Semiconductors of the National Academy of Sciences of Belarus  
19 Brovki st., Minsk, 220072, Belarus

*Multiferroics based on  $\text{BiFeO}_3$  with spatially-modulated antiferromagnetic structure are investigated. The goal of this work is to define the possibility of orientation phase transitions in magnetic and electric system by replacing Bi with 4f ion of Nd depending on temperature in external magnetic field. On  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  films the measurements of permittivity, loss tangent at frequency shift  $100 \text{ Hz} < \omega < 10^5 \text{ Hz}$  and at temperatures  $300 \text{ K} < T < 1000 \text{ K}$  without magnetic field and in magnetic field with  $H = 0.8 \text{ T}$  were made. A drop in temperature dependence of permittivity in magnetic field was revealed. Magnetoelectric properties are explained in the frames of model of changing of magnetic structure in magnetic field as a result of interaction of electric and magnetic subsystems.*

*Keywords:* multiferroics, magnetic capacity, relaxation, permittivity.

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию материалов с сильной взаимосвязью между электрическими и магнитными свойствами в связи с практическим интересом создания элементарной базы микроэлектроники [1; 2]. Мультиферроики на основе  $\text{BiFeO}_3$  широко и интенсивно исследуются как модельные объекты при изучении механизма взаимодействия между электрической и магнитной подсистемами, так и для возможного использования их в спиновой электронике. В  $\text{BiFeO}_3$  существует пространственно модулированная антиферромагнитная структура с периодом 62 нм [3], которая исчезает при температуре Нееля  $T_N = 643 \text{ K}$  [4], а электрическая поляризация при  $T_C = 1045 \text{ K}$  [5]. Взаимосвязь спиновой циклоиды и поляризации осуществляется за счет антисимметричного обмена Дзялошинского-Мория. Смещение ионов в  $\text{BiFeO}_3$  вдоль оси [111] описывается полярным параметром порядка и характеризуется вектором электрической поляризации. При смещении

ионов кислорода в  $\pi$ -моду кислородный октаэдр становится асимметричным вдоль оси [111], сжатым с одной стороны и расширенным с другой, что приводит к неустойчивым фононным модам. Существуют и другие неустойчивые моды перовскитной ячейки, в которых поляризация направлена вдоль диагоналей граней или ребер куба [6]. В эпитаксиальных пленках с тетрагональной кристаллической структурой электрическая поляризация направлена вдоль оси [001], а в орторомбической – вдоль [110]. Магнитная структура, период спиновой циклоиды и, соответственно, вектор поляризации зависит от температуры, анизотропии и внешних электрических и магнитных полей. Замещение ионов висмута 4f-элементами приведет к изменению кристаллической и магнитной структур, а небольшие концентрации замещения вызовут изменение поля анизотропии, параметра антисимметричного обмена. В результате возможен спин-переориентационный переход. Замещение ионов висмута магнитными



ионами неодима меняет магнитное поле анизотропии и величину обмена. Эти характеристики можно менять также под действием лазерного облучения, что дает дополнительный канал регулирования магнитоэлектрического эффекта.

Цель данной работы – определить возможность ориентационных фазовых переходов в магнитной и электрической системах путем замещения висмута 4f ионом Nd в зависимости от температуры под действием внешнего магнитного поля.

**Диэлектрические свойства.** На пленках  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  толщиной 160 нм проведены измерения диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь в интервале частот  $100 \text{ Hz} < \omega < 10^5 \text{ Hz}$  в области температур  $300 \text{ K} < T < 1000 \text{ K}$  без магнитного поля и в магнитном поле  $H = 0,8 \text{ Тл}$ . Температурное поведение диэлектрической проницаемости, нормированной на величину проницаемости при  $T = 300 \text{ K}$ , и тангенса угла потерь для  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  для состава с  $x = 0,1$  изображены на рис. 1. Производная  $d\varepsilon/dT$  обнаруживает несколько максимумов при температурах  $T_N = 600 \text{ K}$  и  $T_1 = 751 \text{ K}$  и  $T_2 = 890 \text{ K}$ .

Замещение ионов висмута неодимом приводит к понижению температуры Нееля и к максимуму диэлектрических потерь в области магнитного фазового перехода. Температурная зависимость тангенса угла потерь хорошо аппроксимируется двумя функциями: Лоренцевской (сплошная линия) и Гауссовской (пунктирная рис. 1, б) функциями распределения с критическими температурами  $T_N = 600 \text{ K}$  и  $T_C = 1000 \text{ K}$ . Релаксация в диэлектрической системе происходит в результате передачи энергии в магнитную подсистему за счет магнитоупругого взаимодействия при  $T_N$ . Релаксация при  $T_C$  реализуется в результате электрон-фононного взаимодействия. При температурах  $T_1 = 751 \text{ K}$  и  $T_2 = 890 \text{ K}$ , возможно, происходят изменения в кристаллической структуре.

Температурные зависимости  $\varepsilon(T)$  без поля и в магнитном поле приведены на рис. 2. Диэлектрическая проницаемость претерпевает скачок при  $T = 394 \text{ K}$  в магнитном поле и магнитоёмкость  $(\varepsilon(H) - \varepsilon(0))/\varepsilon(0)$  увеличивается на порядок по абсолютной величине. Этот эффект, возможно, обусловлен спин-переориентационным переходом и поворотом вектора поляризации с направления  $[111]$  к  $[110]$  в плоскость пленки.

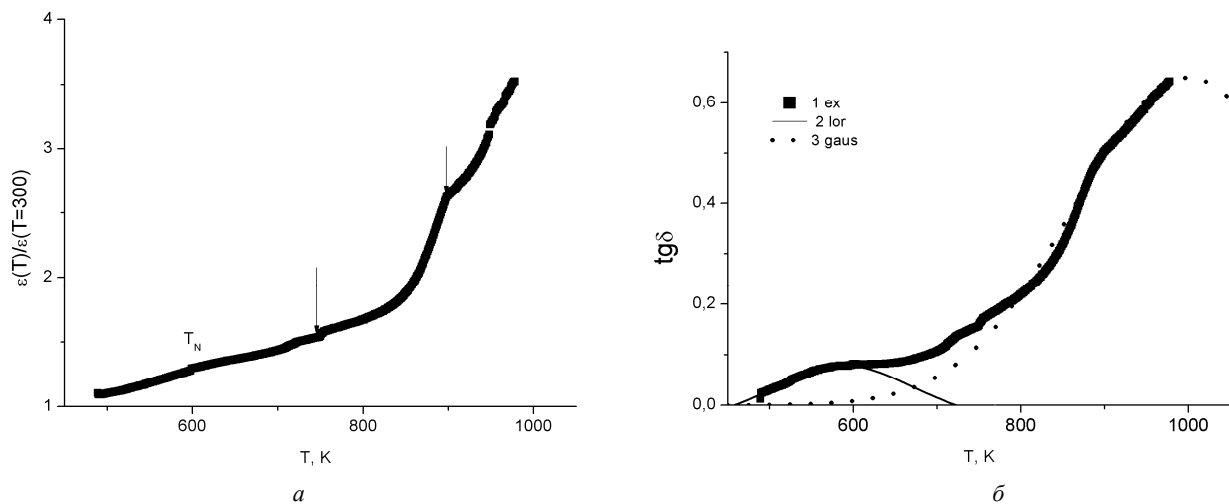


Рис. 1. Диэлектрическая проницаемость, нормированная на величину проницаемости при  $T = 300 \text{ K}$  (а), и тангенс угла потерь (б) для  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  для состава с  $x = 0,1$  на частоте  $10^4 \text{ Hz}$  от температуры. Аппроксимация  $\text{tg } \delta$  суммой функции Лоренца (2) и Гаусса (3)

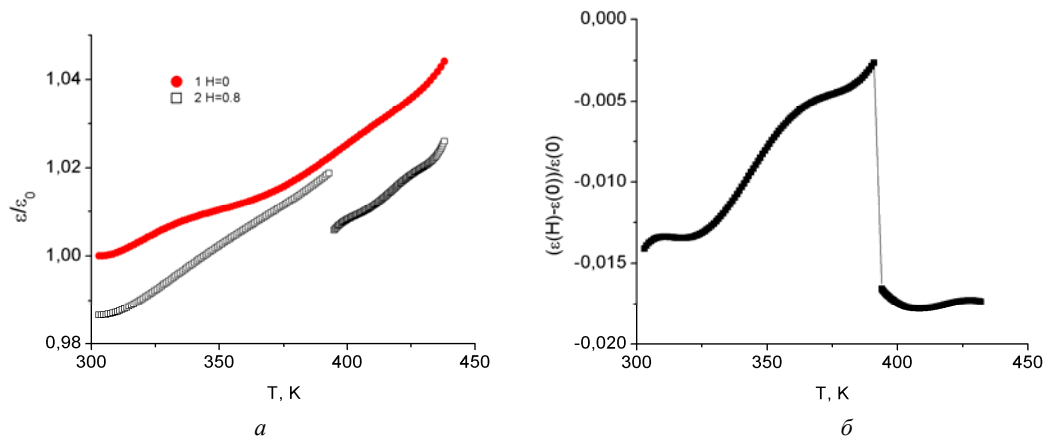


Рис. 2. Зависимости  $\varepsilon(T)/\varepsilon_0$ , где  $\varepsilon_0 = \varepsilon(T = 300 \text{ K})$  (а) без поля (1) и в магнитном поле (2). Магнитоёмкость  $(\varepsilon(H) - \varepsilon(0))/\varepsilon(0)$  (б) для  $x = 0,1$  на частоте  $\omega = 10^5 \text{ Hz}$  от температуры

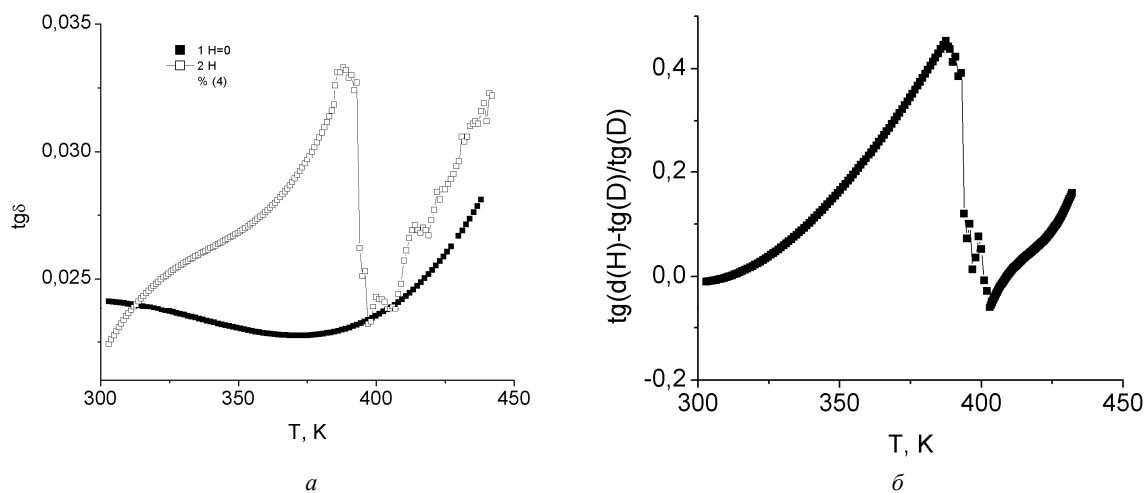


Рис. 3. Тангенс угла диэлектрических потерь от температуры в поле (2) и без поля (1) (а). Относительное изменение диэлектрических потерь в магнитном поле от температуры (б)

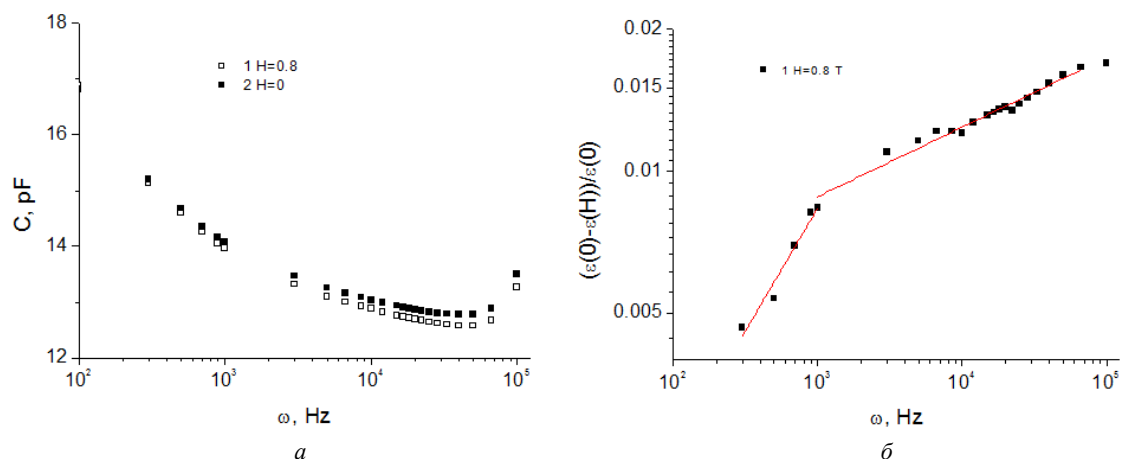


Рис. 4. Емкость  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  с  $x = 0,1$  в поле (1) и без магнитного поля (2) (а) и магнитоёмкость  $\delta_C = (\epsilon(H) - \epsilon(0))/\epsilon(0)$  от частоты при температуре  $T = 300$  К (б)

Это предположение подкрепляется качественно разной зависимостью тангенса угла потерь от температуры в поле и без поля (рис. 3). Во внешнем магнитном поле диэлектрическая релаксация резко растет с температурой, увеличивается в 1,5 раза и достигает максимума в области  $T = 390$  К. Понижение энергии в магнитной системе в магнитном поле в результате спин-фононного взаимодействия приводит к конденсации (к «замораживанию») новой фононной моды колебаний, которая ранее была метастабильна.

На пленках  $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$  проведены измерения диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь в зависимости от частоты при температуре  $T = 300$  К без магнитного поля и в магнитном поле  $H = 0,8$  Тл (рис. 4). Диэлектрическая проницаемость монотонно уменьшается с ростом частоты на 50 %, а отрицательный магнитоёмкостный эффект  $\delta_C = \epsilon(H) - \epsilon(0)/\epsilon(0)$  возрастает по модулю в три раза с 0,5 до 1,7 % при температуре  $T = 300$  К. Частотная зависимость  $\delta_C(\omega) = A\omega^{-1/n}$  обнаруживает кроссовер по частоте от  $n = 2$  при  $\omega < 10^3$  Гц до  $n = 7$ . Тангенс угла диэлектрических потерь и его зависимость от магнитного поля уменьшаются с ростом частоты.

Итак, замещение висмута неодимом приводит к понижению температуры антиферромагнитного и ферроэлектрического фазовых переходов по отношению к  $\text{BiFeO}_3$ . В области высоких температур возможны структурные переходы, связанные с изменением кристаллической структуры. Найдено рост магнитоёмкостного эффекта с ростом частоты по степенному закону. Установлен скачок в диэлектрической проницаемости и максимум диэлектрических потерь в окрестности температуры  $T = 394$  К в магнитном поле  $H = 0,8$  Тл. Этот эффект объясняется в модели спин-переориентационного перехода изменением направления вектора поляризации в результате взаимодействия между электрической и магнитной подсистемами.

#### Библиографические ссылки

1. Аплеснин С. С. Основы спинтроники. СПб.: Лань, 2010.
2. Волков Н. В. Спинтроника: магнитные туннельные структуры на основе манганитов // УФН. 2012. Т. 182, № 3. С. 263–285.

3. Пятаков А. П., Звездин А. К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // УФН. 2012. Т. 182, № 6 (11). С. 583–620.
4. Fisher P., Polomska M., Sosnowska S., Szymanski S. Temperature dependence of the crystal and magnetic structures of BiFeO<sub>3</sub> // J. Phys. C: Solid State Phys. 1980. Vol. 1/3.
5. Teague J. R., Gerson R., James W. J. Dielectric hysteresis in single crystal BiFeO<sub>3</sub> // Solid State Communications. 1970. Vol. 8. P. 1073–1074.
6. Мухортов В. М., Головки Ю. И., Юзюк Ю. И. Гетероэпитаксиальные пленки мультиферроика феррита висмута, допированного неодимом // УФН. 2009. Т. 179, № 8. С. 909–913.

## References

1. Aplesnin S. S. *Osnovy spintroniki* (Basis of spintronics). Saint-Petersburg, Lan', 2010, 283 p.
2. Volkov N. V. *Phys. Usp* (Advances in Physical Sciences). 2012, vol. 182, no. 3, pp. 263–285.
3. Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. *Phys. Usp.* (Advances in Physical Sciences). 2012, vol. 182, no. 6 (11), pp. 583–620.
4. Fischer P., Polomska M. J. *Phys. C Solid State*. 1980, vol. 1/3, 1931 p.
5. Teague J. R., Gerson R., James W. J. *Solid State Commun.* 1970, vol. 8, pp. 1073–1074.
6. Mukhortov V. M., Golovko Yu. I., Yuzyuk Yu. I. *Phys. Usp.* 2009, vol. 179, no. 8, pp. 909–913.

© Аплеснин С. С., Кретьнин В. В., Остапенко А. А., Галас А. И., Янушкевич К. И., 2013

УДК 678.077

## ЦИАНАТ-ЭФИРНЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ. КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРГАНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СОЛЕЙ ДИАЗОНИЯ С КОМПЛЕКСНЫМИ АНИОНАМИ В ОТВЕРЖДЕНИИ ЦИАНАТ-ЭФИРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

В. Ф. Аристов<sup>1</sup>, В. И. Халиманович<sup>2</sup>, В. В. Миронович<sup>2</sup>,  
Т. А. Ислентьева<sup>2</sup>, Д. А. Гуров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт космических и авиационных материалов  
Россия, 152025, Переславль-Залесский, ул. Менделеева, 2р. E-mail: labniikam@gmail.com

<sup>2</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 662972, Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

Цианат-эфирный пластик (ЦЭП) является современным и перспективным материалом. Термостойкость, низкая газо- и влагопоглощаемость, высокие диэлектрические свойства, низкое газовыделение, хорошая сопротивляемость к ионизирующему излучению и радиопрозрачность с учетом размеростабильных свойств делает ЦЭП лучшим кандидатом для применения в космическом аппаратостроении и спутникостроении. Во время экспериментов с импрегнированием цианат-эфирным преполимером высокомолекулярных углеволокон на пропиточной машине PLS-250-2F (Mikrosam, Македония) было выявлено преждевременное отверждение преполимера на нагреваемых металлических валах узла наноса. В связи с этим было исследовано влияние комплексов, содержащих ионы переходных металлов на кинетику полимеризации ЦЭП методами ДМА и вискозиметрии. Показано, что использование стальных валов пропиточной машины приводит к существенному снижению жизнестойкости расплава преполимера. На основании полученных данных рекомендуется использовать керамические поливочные валы, изготовленные, например, на основе нитрида бора. В качестве нового типа катализатора реакции полимеризации для получения ЦЭП с возможностью встраивания в полимерную сетку были впервые исследованы комплексные соли диазосоединений. Полученные данные позволяют отнести новый класс катализаторов реакции отверждения цианат-эфиров в разряд перспективных.

Ключевые слова: цианат-эфирные связующие, пластики, композит, препрег, эпоксида, смолы, влагопоглощаемость, термостойкость, радиопрозрачность, аэрокосмическая отрасль, космические аппараты, рефлектор, катализатор, ионы металлов, соли диазона.

**CYANATE ESTER COUPLING AGENTS IN AEROSPACE INDUSTRY.  
CATALYTIC PROPERTIES OF ORGANOMETALLIC COMPLEXES AND DIAZONIUM  
SALTS WITH COMPLEX ANIONS IN THE CURING REACTION  
OF CYANATE ESTER COUPLING AGENTS**

V. F. Aristov<sup>1</sup>, V. I. Khalimanovich<sup>2</sup>, V. V. Mironovich<sup>2</sup>,  
T. A. Isentyeva<sup>2</sup>, D. A. Gurov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Scientific Research of Space and Aviation  
2r Mendeleev square, Pereslavl-Zalessky, 152025, Russia. E-mail: labniikam@gmail.com

<sup>2</sup>JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev"  
52 Lenin st., Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

*Cyanate ester resin (CER) is the novel and prospective material. Thermal stability, low gas and moisture absorption, high dielectric properties, low outgassing, good resistance to radiation and radio transparency with dimensional stability are the key CER properties that make it the best candidate for the use in space apparatus manufacturing. During the impregnation process of high modulus carbon fibers by cyanate ester prepolymer at Prepreg Line-Type PLS-250-2F (Mikrosam, Makedonia) a premature reaction of polymerization on the heated metal rollers in the resin transfer sector of machine was observed. In this regard the catalytic effects of organometallic complexes containing ions of transition metals on kinetics of CER polymerization by using DMA and viscosimetric methods were studied. It is shown that a usage of stainless steel rollers results in a significant reduction of a lifetime of melt prepolymer. By the results of this research it is recommended to use the ceramic rollers instead, for example made from boron nitride. As a new type of catalyst for curing reaction of cyanate ester prepolymer, with the possibility of incorporation into the polymer network, diazonium compounds were first investigated. The obtained results include a new class of catalysts for curing of cyanate ester prepolymer into the category of a prospective type.*

*Keywords: cyanate ester resins, plastics, composite, prepreg, epoxy, moisture absorption, thermal stability, radio transparency, aerospace industry, space apparatus, reflector, catalyst, metal ions, complex diazonium salts.*

Цианат-эфирные связующие имеют ряд ключевых преимуществ и особенностей, которые делают их исключительно важными в космическом аппарато-строении. Именно уникальная химическая структура скелета формирующейся пространственной трехмерной сетки макромолекулы полимера является ключевой основой для проявляемых важных физико-химических и термомеханических свойств, таких как низкая диэлектрическая проницаемость, высокая термо- и трещиностойкость, сверхнизкая влагопоглощаемость.

Наиболее распространены среди ЦЭП пластики на основе мономера бисфенола А дицианата (БАДЦи), имеющего структурную формулу I (рис. 1). Он полимеризуется, образуя триазиновые звенья. Обычно, в промышленности сначала получают преполимер, который наряду с мономером I содержит главным образом тример (формула II) и пентамер (формула III), а также высшие олигомеры. Этот преполимер является вязкой жидкостью и, в отличие от кристаллического I, технологически удобен для создания композитов. Такая структура сохраняется во всей макромолекуле ЦЭП на основе БАДЦи.

Необычное сочетание свойств, проявляемых ЦЭП основывается на нескольких структурных особенностях, к которым относятся: а) кислородная связь; б) низкая плотность сшивки (это особенно влияет на термомеханические свойства отвержденного пластика, термостойкость и возможность эксплуатации при циклических изменениях температур); в) большой свободный объем. Сравнение основных свойств

эпоксидных и цианат-эфирных связующих [1] показано в табл. 1. Для создания размеростабильной структуры критическими факторами являются коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) и коэффициент гигроскопического расширения (КГР) связующего. Создание структуры с КЛТР, близким к нулевому, достигается выбором определенных волокон, их направлением и содержанием связующего в отвержденном композите. КГР зависит только от типа используемого связующего. Дизайн и изготовление размеростабильных платформ, оптических скамеек и рефлекторов заметно упрощается при выборе цианат-эфирного пластика с минимальным КГР. В противном случае влага, попадающая при изготовлении и хранении рефлектора, приводит к набуханию углепластика, а последующая десорбция влаги в космосе приведет к усадке всей конструкции [1; 2].

Также сравниваются влаго-абсорбционные свойства полимерных матриц на основе ЦЭП и ЭП, используемых в аэрокосмическом производстве композитов, подвергающихся набуханию при контакте с водой, в табл. 1. Для цианат-эфиров диапазон значений влагопоглощения является минимальным, он почти в 10 раз ниже, чем у эпоксидов. Диэлектрическая постоянная растет при увеличении влагонасыщения материала, поэтому у ЦЭП в данном случае имеется двойное превосходство по сравнению с другими материалами, ведь известно, что чем выше диэлектрическая постоянная, тем медленнее распространяется сигнал, ниже волновое сопротивление и выше паразитная емкость линии [3].

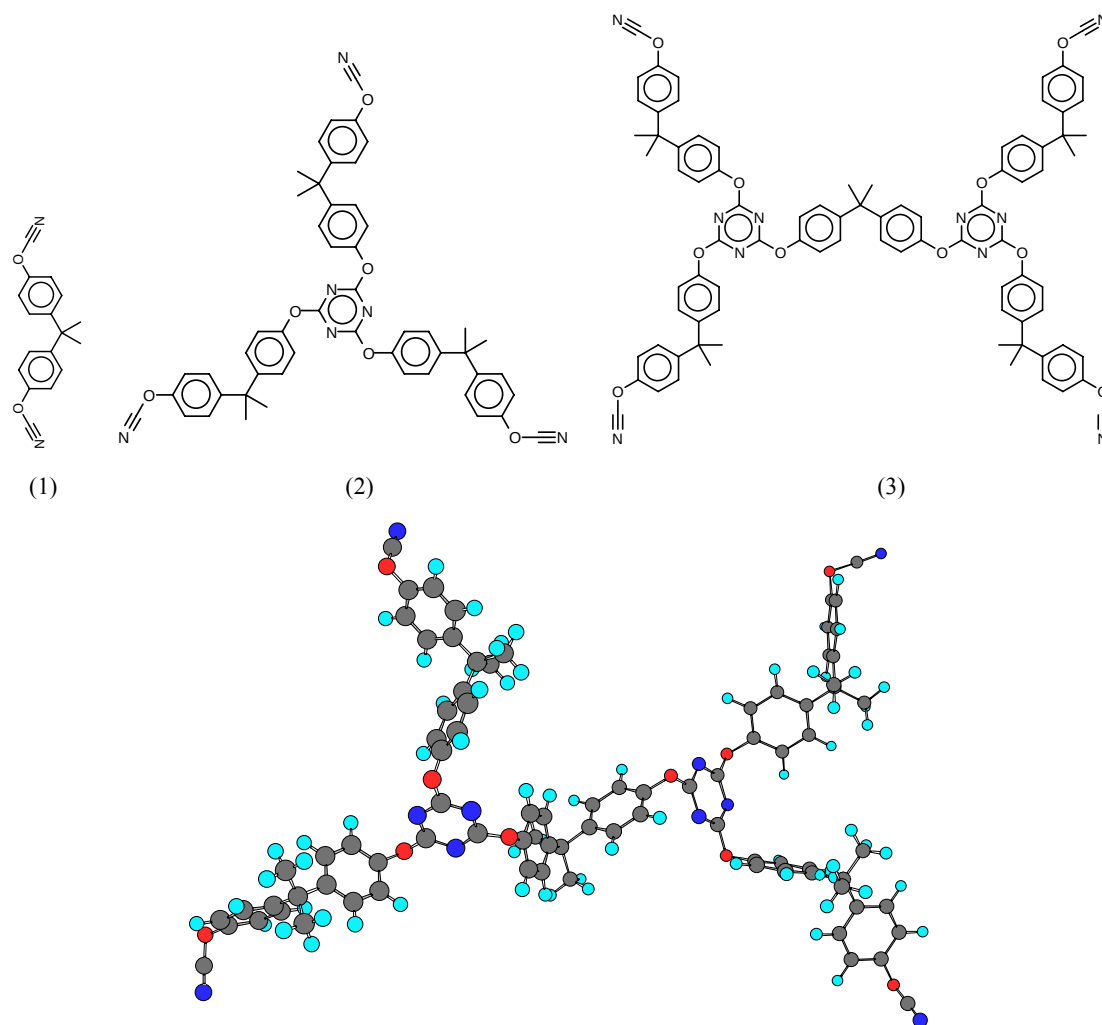


Рис. 1. Пространственная структура пентамера ЦЭП (III) на основе БАДЦи

Таблица 1

Основные свойства отвержденных эпоксидных и цианат-эфирных связующих

| Свойства                                     | Эпоксиды | Цианат-эфиры |
|----------------------------------------------|----------|--------------|
| Плотность, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^{-3}$     | 1,2–1,4  | 1,1–1,22     |
| Модуль Юнга для отвержденной смолы, ГПа      | 3,1–3,8  | 3,1–4,0      |
| Диэлектрическая постоянная, 1 МГц            | 3,8–4,5  | 2,7–3,2      |
| Равновесное влагопоглощение, %               | 0,7–0,9  | 0,05–0,1     |
| КЛТР, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ | 50–70    | 25–35        |

В России цианат-эфирные связующие, по качеству сопоставимые с лучшими мировыми аналогами, не производятся, а применение зарубежных материалов затруднительно из-за малых сроков хранения готовых препрегов при комнатных температурах. Применение в России устаревших эпоксидных связующих, в несколько раз уступающих ЦЭП по основным характеристикам, сдерживает производство современных космических систем в нашей стране [4]. Изготовленные в лабораторных условиях в ООО «НИИКАМ» пластики на основе цианат-эфиров по основным характеристикам соответствуют зарубежным аналогам лучших пластиков, изготовленных, например, на основе ЦЭП EX-1515 фирмы Tencate США [5]. При этом значение КЛТР ниже в два раза, что является особен-

но важным при создании размеростабильных структур и работе с металлической оправкой.

Во время пропитки цианат-эфирным связующим высокомолекулярных углеволокон, одной из первых выявленных проблем была преждевременная полимеризация преполимера на нагреваемых стальных валах узла переноса связующего на антиадгезионную бумагу. В связи с этим были исследованы влияние диффундирующих в расплав преполимера органометаллических комплексов, содержащих ионы металлов, входящих в состав стали, из которой изготовлены металлические валы. Исследования включали в себя вискозиметрические A&D SV-10 и термомеханические ДМА7, Перкин Элмер.

Вискозиметрические исследования времени желатинизации проводились в стеклянной и металлической емкостях при рабочей температуре пропитки препрега 80 °С. Используемая металлическая емкость была изготовлена из стали 12Х18Н10Т, содержащей хром, никель и титан в качестве легирующих элементов. Известно использование активных металлических поверхностей, в частности, оцинкованной стали или нержавеющей стали в качестве катализатора реакции полимеризации цианат-эфирных соединений. При этом во время склейки стальных деталей с помощью цианат-эфирного связующего, введение дополнительного отвердителя не требуется [6]. Механизм гетерогенного катализа в данном случае является сложным. Предположительно, активные центры на стальной поверхности вступают в реакцию с реакционноспособными группами мономера в присутствии кислорода и/или паров воды, содержащихся в воздухе. Образовываются сложные органометаллические комплексы с металлами переходных групп, содержащихся в нержавеющей стали. При этом валентность металлов в этом процессе образования соединений может изменяться и увеличиваться вследствие окисления.

Использование органометаллических соединений в качестве катализатора реакции полимеризации цианат-эфирных соединений широко известно. Использование нафтенатов, ацетилацетанатов металлов переходных групп и других органометаллических комплексов в этом качестве описано в литературе [7].

Были получены данные по изменению вязкости цианат-эфирной смолы в присутствии каталитического комплекса, состоящего из органометаллических соединений, предположительно содержащих катионы железа  $Fe^{2+}$  или  $Fe^{3+}$ , никеля  $Ni^{2+}$ , титана  $Ti^{4+}$  и хрома  $Cr^{3+}$ . Концентрация катализаторов на поверхности емкости, выполненной из легированной нержавеющей стали при этом различна. Исходя из того, что время желатинизации цианат эфирной смолы в присутствии даже очень малых концентраций комплекса на основе катиона  $Fe^{3+}$ , очень мало (табл. 2), можно сделать вывод, что органометаллические комплексы, содержащие катионы железа  $Fe^{3+}$ , являются наиболее сильным катализатором реакции олигомеризации из возможных комплексных соединений, диффундирующих

с поверхности металлических валов пропиточной машины в расплав связующего. При этом действие катализаторов в комплексе является кумулятивным и проявляет синергетический характер, усиливая каталитические способности каждого отдельного катализатора. Скорость реакции олигомеризации существенно возрастает, реакция идет интенсивно и с выделением тепла, оказывая временный «понижающий» эффект на значение вязкости за счет повышения общей температуры расплава. Это хорошо согласуется с литературными данными [2; 7].

Также были проведены исследования с использованием солей металлов переходных групп. Изменение вязкости в зависимости от типа катиона металла, входящего в состав органометаллического комплекса показано на рис. 2. Температура эксперимента равна рабочей температуре пропитки препрега на поливочной машине и со 80 °С. Концентрации введенных в расплав ЦЭП солей были одинаковыми и составляли 0,2 % вес.

Кроме того, были проведены термомеханические испытания с помощью ДМА 7 (Перкин Элмер) (рис. 3). В расплав ЦЭП вводились различные концентрации солей переходных металлов. Заполимеризованную при одинаковых температурных режимах пластину из ЦЭП исследовали с помощью трехточечной системы на изгиб при помощи ДМА7. В результате динамических испытаний температура стеклования в зависимости от типа иона была различной, а значит, была различной и степень сшивки полимера [8]. На основании этого можно судить об интенсивности реакции полимеризации и активности катализатора. В результате этих экспериментов было выполнено сравнение каталитической активности комплексов, содержащих ионы металлов:  $Sn^{4+} > Sn^{2+} > Fe^{3+} > Zn^{2+} > Ni^{2+} > Ti^{4+} > Zr^{4+}$ . Был сделан вывод, что наиболее активны соединения, содержащие ионы олова и железа, при этом комплексы, содержащие ионы титана, никеля и цинка, являются достаточно каталитически активными и могут применяться в качестве катализаторов, но использование их неконтролируемых концентраций на поверхности металлических частей пропиточной машины, находящихся в контакте со связующим, технологически недопустимо (табл. 3).

Таблица 2

Изменение вязкости преполимера БАДЦи

| Время                   | Вязкость смолы, Па·с |                                         |
|-------------------------|----------------------|-----------------------------------------|
|                         | Стеклянная емкость   | Металлическая емкость (сталь 12Х18Н10Т) |
| До введения отвердителя | 2,2                  | 1,65                                    |
| Спустя 1 час            | 2,3                  | 5,17                                    |
| Спустя 2 часа           | 2,4                  | 8,35                                    |
| Спустя 4 часа           | 2,62                 | Отвержденное состояние                  |
| Спустя 6 часов          | 2,85                 | Отвержденное состояние                  |
| Спустя 8 часов          | 3,1                  | Отвержденное состояние                  |

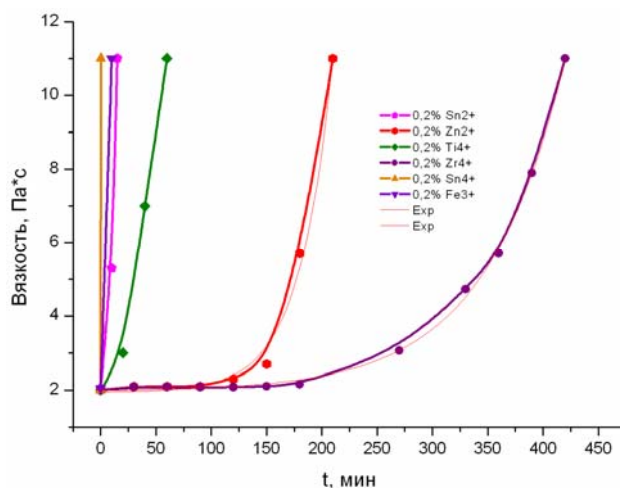


Рис. 2. Изменение времени желатинизации преполимера БАДЦи в зависимости от типа иона металлов переходной группы

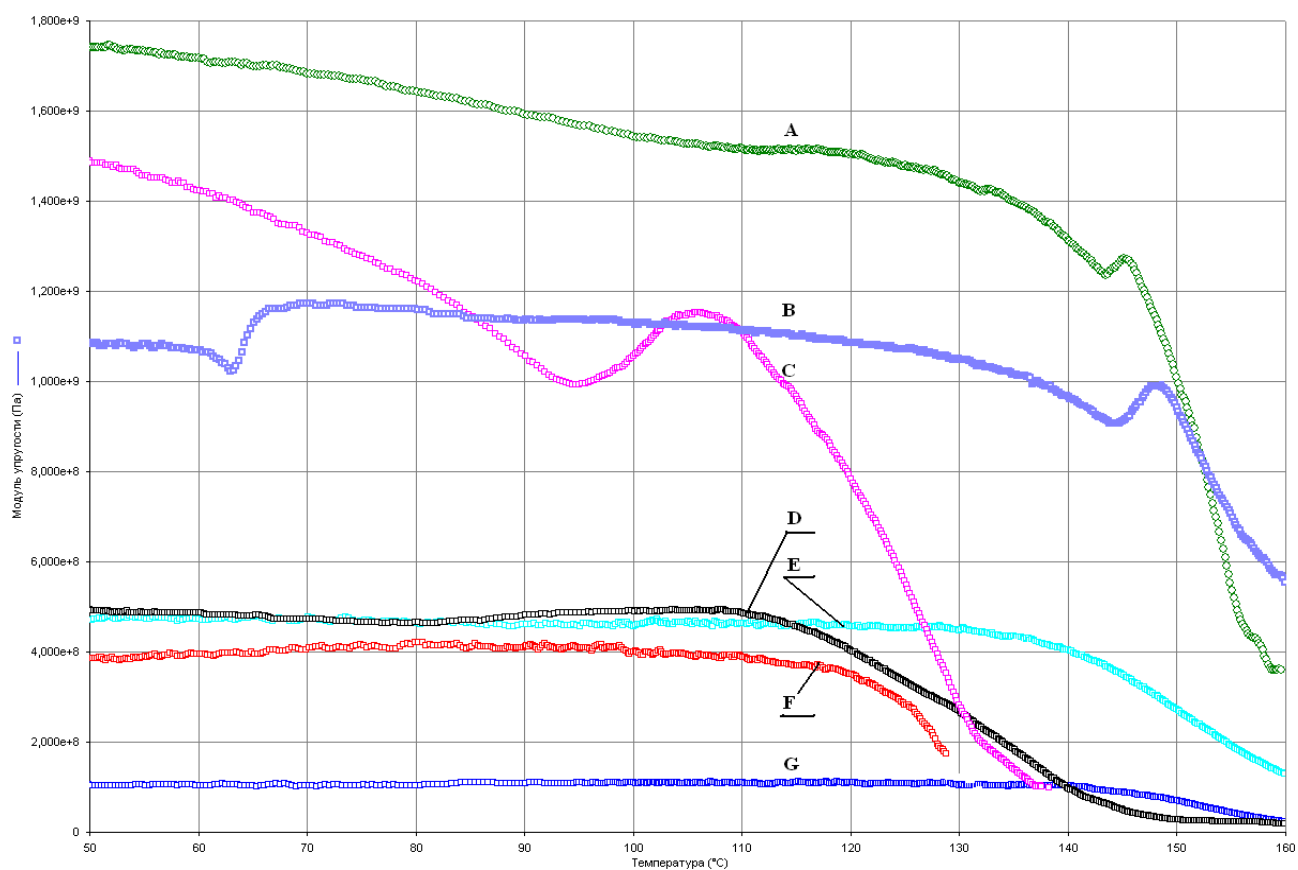


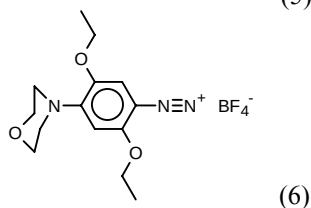
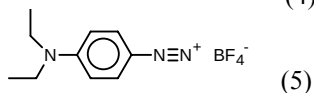
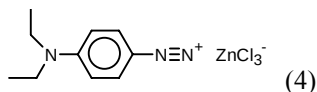
Рис. 3. Исследование отвержденных образцов БАДЦи с помощью различных каталитических органометаллических комплексов на основе ионов металлов переходных групп (A:  $\text{Sn}^{4+}$ , B:  $\text{Sn}^{2+}$ , C:  $\text{Zr}^{4+}$ , D:  $\text{Zn}^{2+}$ , E:  $\text{Fe}^{3+}$ , F:  $\text{Ti}^{4+}$ , G:  $\text{Ni}^{2+}$ )

Таблица 3

Концентрация введенных в расплав ЦЭП солей металлов переходных групп

| Тип катиона          | $\text{Sn}^{4+}$ | $\text{Fe}^{3+}$ | $\text{Sn}^{2+}$ | $\text{Ti}^{4+}$ | $\text{Zn}^{2+}$ | $\text{Ni}^{2+}$ | $\text{Zr}^{4+}$ |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Концентрация, вес. % | 0,05             | 0,1              | 0,05             | 0,2              | 0,3              | 0,5              | 0,5              |

В качестве нового типа катализатора были предложены соли диазония, содержащие комплексный анион. Были исследованы три типа солей с помощью системы параллельных пластин динамического механического анализа ДМА7: 4-дiazодиэтиланилин трихлорцинкат (формула IV), 4-дiazодиэтиланилин тетрафторборат (формула V), 2,5-диэтокси-4-дiazофенилморфолин тетрафторборат (формула VI):



В расплав преполимера БАДЦи были введены растворы солей диазония в ДМФА с одинаковой концентрацией 1 % вес. от массы расплава. Исходя из реометрической теории, модуль упругости и вязкость будет расти с ростом числа олигомеров и степени сшивки, а значит, на основании увеличения модуля упругости на диаграмме (рис. 4) можно сделать вывод о температуре начала реакции [9]. Следовательно, чем она ниже, тем активнее катализатор.

Исходя из этого следует, что наиболее каталитически активным является соединение 4-дiazодиэтиланилин

трихлорцинкат. Под воздействием температуры соединение разлагается и образует хлорид цинка и другие продукты распада. Хлорид цинка, как уже было сказано выше, сам по себе является каталитически активным веществом для тримеризации цианат-эфиров. Также и фторид бора, образующийся при распаде тетрафторборатов диазония, является катализатором полимеризации. В свою очередь, другие продукты распада комплексной соли диазония могут катализировать полимеризацию и встраиваться в полимерную сетку.

Цианат-эфирные пластики, являясь перспективным материалом, имеют большой потенциал в различных отраслях и, в частности, аэрокосмической отрасли. Органометаллические комплексы, содержащие ионы металлов переходных групп, являются каталитически активными для реакции полимеризации цианат-эфирных мономеров и олигомеров и могут быть использованы в растворах и расплавах в качестве отвердителей. Но применение стальных деталей машины, находящихся в контакте с горячим расплавом связующего, недопустимо по причине его преждевременного и неконтролируемого отверждения. Комплексные соли диазосоединений могут быть использованы в качестве отвердителей цианат-эфиров, возможно, имея способность встраиваться в полимерную сетку. Целесообразно организовать в России производство цианат-эфирных связующих для получения препрегов и углепластиков с использованием углеродных и арамидных наполнителей для изготовления на их основе высокоточных размеростабильных конструкций, в первую очередь для аэрокосмического комплекса.

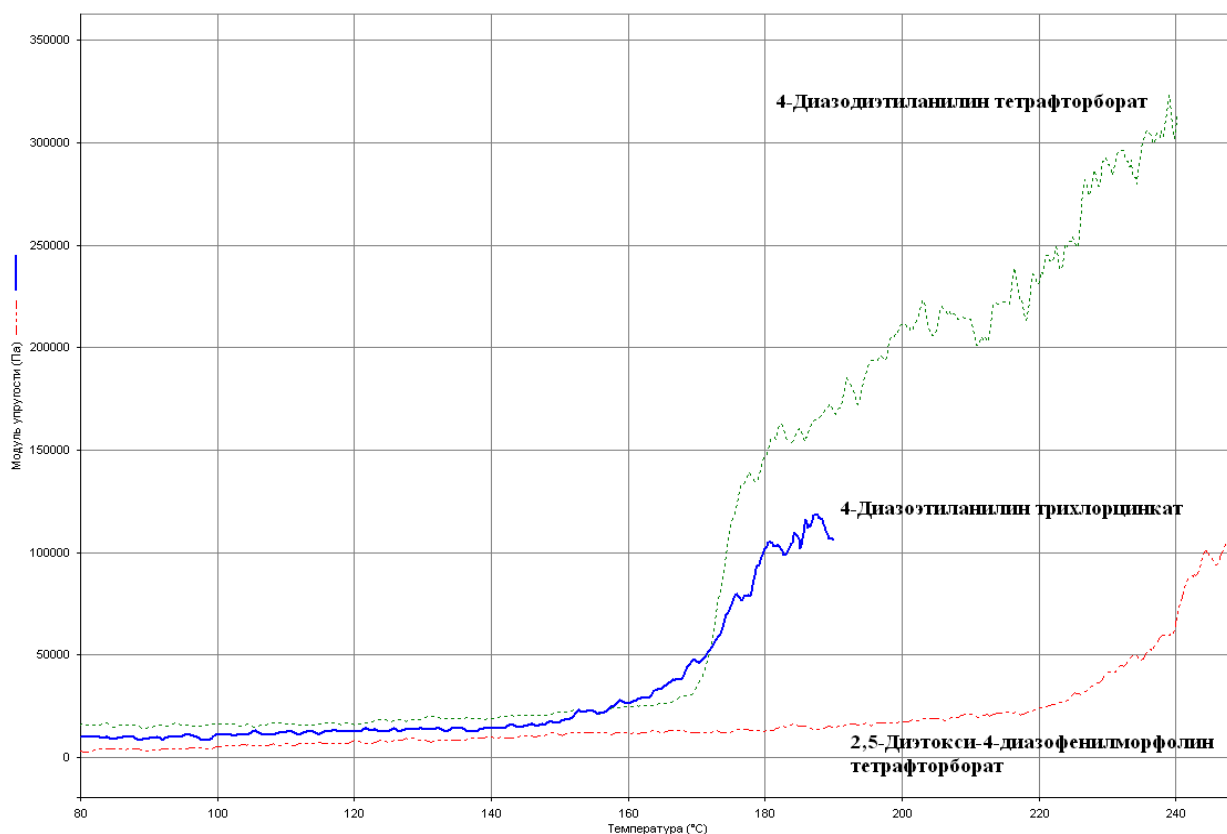


Рис. 4. Термограмма, полученная с помощью ДМА7 (метод параллельных пластин)



## Библиографические ссылки

1. Reghunadhan Nair C. P., Mathew D., Ninan K. N. Cyanate Ester Resins, Recent Developments // *Advances in Polymer Science*. 2001. Vol. 155. P. 84–87.
2. Hamerton I. Chemistry and technology of cyanate ester resins // Springer. 1994. Pp. 30–31, 116–117, 241–245.
3. Щербаченко Л. А., Карнаков В. А., Марчук С. Д. Исследование комплексной диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков при радиочастотах : метод. рекомендации. Иркутск, 2005. Иркут. гос. ун-т.
4. JEC Composites. Overview of the worldwide composites industry, 2010–2015. Source JEC Composites.
5. EX-1515 Resin System Technical Data Sheet [Электронный ресурс]. URL: [www.tencate.com](http://www.tencate.com) (по состоянию на апрель 2013 г.).
6. Attarwala Shabbir. US Patent. No. 7,537,839 B1 (May 26th 2009).
7. Shimp D. A., Craig W. M. Jr. 34<sup>th</sup> Int. SAMPE Symp. 34. 1989. Pp. 1336–1346.
8. Pascault P. J., Williams R. J. J. Polym. Sci. 1990. Pp. 28–85. (Polym. Phys.).
9. Cheng Steven Z. D. Handbook of thermal analysis and calorimetry // Elsevier Science. 2002. Vol. 3. Pp. 297.

## References

1. Reghunadhan Nair C. P., Mathew D., Ninan K. N., Cyanate Ester Resins, Recent Developments, *Advances in Polymer Science*, 2001, vol. 155, pp. 84–87.
2. Hamerton I. Chemistry and technology of cyanate ester resins, Springer, 1994, pp. 30–31, 116–117, 241–245.
3. Shcherbachenko L. A., Karnakov V. A., Marchuk S. D. *Issledovanie kompleksnoi dijelektricheskoi pronicaemosti tverdykh dielektrikov pri radiochastotakh* (The study of complex permittivity of solid dielectrics at radio frequencies). GOU VPO IGU, Irkutsk, 2005.
4. JEC Composites, Overview of the worldwide composites industry, 2010–2015. Source JEC Composites.
5. EX-1515 Resin System Technical Data Sheet, available at [www.tencate.com](http://www.tencate.com) (accessed april 2013).
6. Attarwala Shabbir, US Patent. No. 7,537,839 B1 (May 26th 2009).
7. Shimp D. A., and Craig W. M. Jr., 34<sup>th</sup> Int. SAMPE Symp., 34, 1989, pp. 1336–1346.
8. Pascault P. J., Williams R. J., J. Polym. Sci., Polym. Phys, 1990, pp. 28–85.
9. Cheng Steven Z. D., Handbook of thermal analysis and calorimetry. Elsevier Science, 2002, vol. 3, 297 p.

© Аристов В. Ф., Халиманович В. И., Миронович В. В., Ислентьева Т. А., Гуров Д. А., 2013

УДК 004.896(06)

## АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ПЛАВИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

К. Н. Бискуб

Норильский индустриальный институт  
Россия, 663310, Норильск, ул. 50 лет Октября, 7. E-mail: [apissarev@yandex.ru](mailto:apissarev@yandex.ru)

*Описан алгоритм постоянной адаптации параметров математической модели объекта газоочистки с использованием наблюдающего устройства, который позволяет повысить точность управления объектом. При этом адаптируются исключительно те параметры математической модели, которые позволяют в первую очередь снизить ошибку прогнозирования, учитывая наличие шумов в сигналах входных факторов ММ объекта газоочистки.*

*Ключевые слова: технологические газы, прогнозирующая система управления, скруббер-охладитель, адаптивное управление.*

## ADAPTIVE OBSERVER OF PREDICTING SYSTEM OF PROCESS CONTROL FOR COOLING GASES OF MELTING FURNACE

K. N. Biskub

Norilsk industrial institute  
7 50 years of October, Norilsk, 663310, Russia. E-mail: [apissarev@yandex.ru](mailto:apissarev@yandex.ru)

*The article describes an algorithm that continuously adapt parameters of the mathematical model of the object using a scrubbing observing device that improves the accuracy of object control. In this case only those parameters of the mathematical model are adapted which allow, first of all, to reduce the prediction error, taking into account the noise in the signals of input factors MM gas treatment facility.*

*Keywords: process gases, the predictive control system, scrubber-cooler, adaptive control.*

Процесс плавки медно-никелевого материала в плавильных электропечах на Надеждинском металлургическом заводе имени Колесникова Б. И. (ЗФ ОАО «Норильский никель») сопровождается выделением технологического газа, содержащего  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и пыль цветных металлов. Для исключения выбросов неочищенного газа в атмосферу предусмотрена газоочистка, которая осуществляется в два этапа. Первый этап происходит в мокром механическом пылеуловителе – скруббере-охладителе, в котором улавливается крупная фракция пыли. Второй этап очистки осуществляется в сухом механическом пылеуловителе – рукавном фильтре, в котором улавливается более мелкая фракция пыли.

Многочисленные наблюдения, проводимые в области эксплуатации систем управления процессом охлаждения технологического газ плавильных электропечей, показывают, что, несмотря на постоянно совершенствующиеся принципы и методы управления, не решена задача предотвращения аварийных отключений технологического оборудования очистки технологического (отходящего) газа [1].

В ходе исследований были выявлены следующие наиболее вероятные причины аварийных отключений технологических систем охлаждения и очистки газов из-за превышения критических значений температуры технологических газов  $260^\circ\text{C}$ :

1. Резкий рост температуры технологических газов в результате заливки конвертерного шлака, сопровождающегося стремительным ростом температуры в плавильной электропечи.

2. Включение системы очистки газов после останова, при которой возникает тепловой удар по рукавным фильтрам вследствие неточной первичной установки управляющих воздействий.

Снижение количества аварийных отключений возможно за счет прогнозирующей системы управления, основной целью которой является поддержание постоянного значения температуры технологических газов плавильных электропечей. Поэтому целью управления является минимизация среднеквадратической ошибки:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{пл}}} \int_0^{T_{\text{пл}}} (T_3 - T_{\text{ф}})^2 dt} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $T_{\text{ф}}$  – фактическое значение температуры технологических газов;  $T_3$  – заданное значение температуры технологических газов;  $\sigma$  – целевая функция оптимизации;  $T_{\text{пл}}$  – продолжительность плавки медно-никелевого материала в плавильной печи.

При этом система должна адаптироваться к изменяющимся характеристикам объекта управления за счет использования современных методов адаптивного управления.

Решается поставленная задача путем математического моделирования и экспериментальным тестированием на реальном объекте.

Для получения математических моделей системы управления процессом охлаждения технологических газов при их очистке использовались данные факторного эксперимента. Обработка экспериментальных данных проводилась методами корреляционного анализа. При идентификации математических моделей использовался градиентный спуск первого порядка. Разработанные модели представлены в виде нелинейных регрессионных моделей с элементами динамики.

Разработанные автором модели объекта управления и регулятора позволили реализовать прогнозирующую систему управления (рис. 1) [2].

Прогнозирующая система управления состоит из четырех блоков. Блок «Адаптивный наблюдатель» представляет собой устройство наблюдения, адаптирующее все параметры математической модели скруббера-охладителя (ММСО) к требуемым значениям для оптимального качества управления. К таким параметрам относятся регулируемая величина, возмущения и управляющие воздействия.

Блок «Прогнозатор» – устройство прогнозирования температуры технологических газов скруббера-охладителя на 15 мин, использующее его математическую модель.

Блок «Регулятор» – прогнозирующий регулятор, использующий математическую модель прогнозирующего регулятора, при этом может иметь различное количество управляющих воздействий в зависимости от режима управления.

Блок «Скруббер-охладитель» – объект управления.

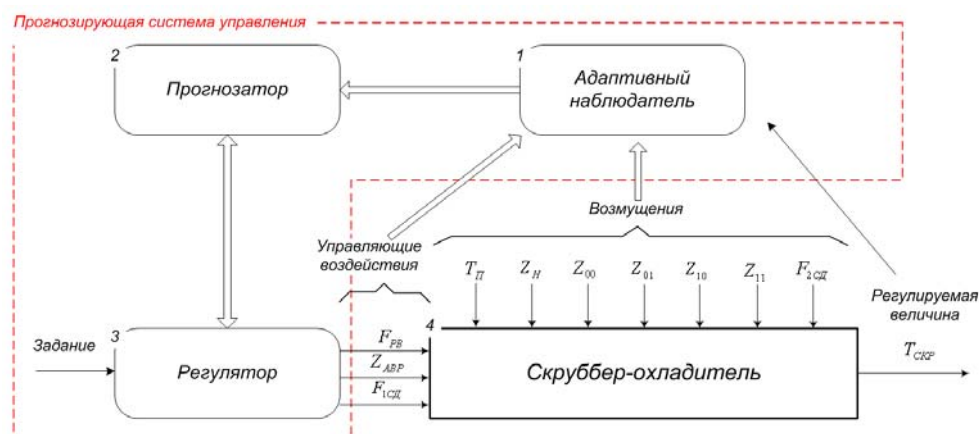


Рис. 1. Структурная схема прогнозирующей системы управления

Важной особенностью прогнозирующей системы управления является наличие в структуре системы блока адаптивного «наблюдателя», который позволяет компенсировать, кроме вышеуказанных возмущений, следующие возмущения:

1) нестабильность параметров модели объекта управления и характеристик датчиков;

2) снижение герметичности установки очистки газов во время ее отключения из-за изнашивания запирающих клапанов рукавных фильтров и направляющей задвижки перед дымососом.

Для точной оценки параметров математической модели (ММ) объекта управления  $K_0, K_1, \dots, K_6, T_0, T_1, \tau_0, \tau_1$  был использован метод наименьших квадратов (МНК – идентификация), т. е. метод оценки параметров математической модели путем минимизации квадратической ошибки:

$$J(M) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N (T(M)_i - T_{i\ominus})^2 \rightarrow \min,$$

где  $M = \{K_0, K_1, \dots, K_6, T_0, T_1, \tau_0, \tau_1\}$  – точка многомерного пространства (параметры ММ скруббера-охладителя),  $T(M)_i$  – рассчитанное значение температуры технологических газов на выходе скруббера-охладителя на  $i$ -шаге;  $T_{i\ominus}$  – экспериментальное значение температуры технологических газов на выходе скруббера-охладителя на  $i$ -шаге.

В качестве алгоритма МНК-идентификации математической модели используется градиентный спуск

первого порядка [3]. На рис. 2 указаны параметры ММ, участвующие в адаптации.

Алгоритм адаптации запускается в каждом цикле управления скруббером-охладителем (1 раз в секунду). Сначала рассчитываются статистические показатели всех факторов за последние 1 000 с:  $T_{\Pi}, F_{PB}, Z_{ABP}, Z_{00}, Z_{01}, Z_{10}, Z_{11}, Z_H, F_{1CD}, F_{2CD}$ .

Статистические показатели следующие:

– математическое ожидание

$$M[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где  $n$  – количество элементов в выборке (равное 1000 элементам),  $x_i$  –  $i$ -й элемент выборки;

– дисперсия

$$D[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M[X])^2; \quad (2)$$

– среднееквадратическое отклонение

$$\sigma[X] = \sqrt{D[X]}; \quad (3)$$

– коэффициент изменения

$$R[X] = \frac{\sigma[X] - \sigma_{\min}[X]}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\min}[X]$  – уровень шума фактора,  $X_{\max}$  – максимальный диапазон варьирования фактора,  $X_{\min}$  – минимальный диапазон варьирования фактора.

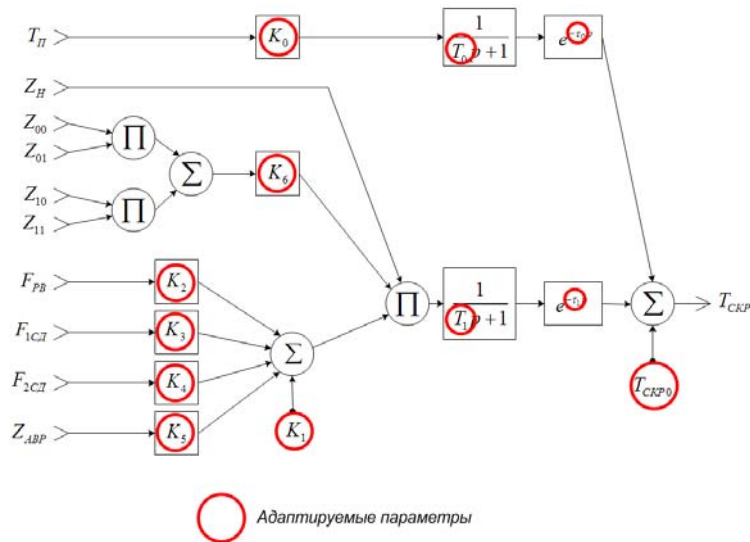


Рис. 2. Параметры математической модели скруббера-охладителя, поддающиеся адаптации:

$T_{\Pi}(t)$  – переменная температура в печи;  $T_0, T_1$  – постоянные времена;  $\tau_0, \tau_1$  – время запаздывания;

$Z_{00}, Z_{01}, Z_{10}, Z_{11}$  – относительные положения входных и выходных запирающих клапанов первого и второго рукавных фильтров соответственно;  $Z_H(t)$  – переменное положение направляющей задвижки;  $Z_{ABP}$  – относительное положение аварийной задвижки;  $F_{PB}(t)$  – переменный расход распылительной воды, подаваемой в скруббер;  $F_{1CD}, F_{2CD}$  – расход воздуха на первой и второй ступени дожига CO;  $K_0, \dots, K_5$  – коэффициенты регрессии;  $K_6$  – нормирующий

коэффициент;  $T_{CKP}(t)$  – переменная температура технологических газов на выходе скруббера-охладителя;

$T_{CKP0}$  – начальная температура технологических газов в скруббере-охладителе

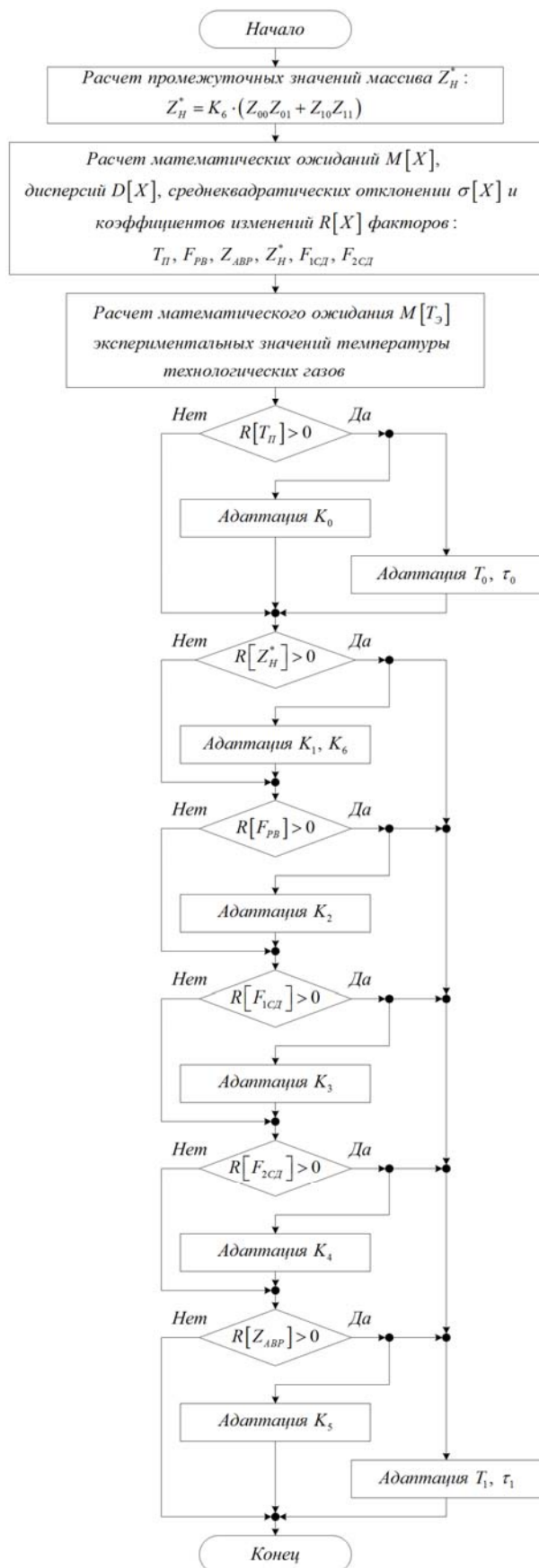


Рис. 3. Блок-схема алгоритма параметрической адаптации

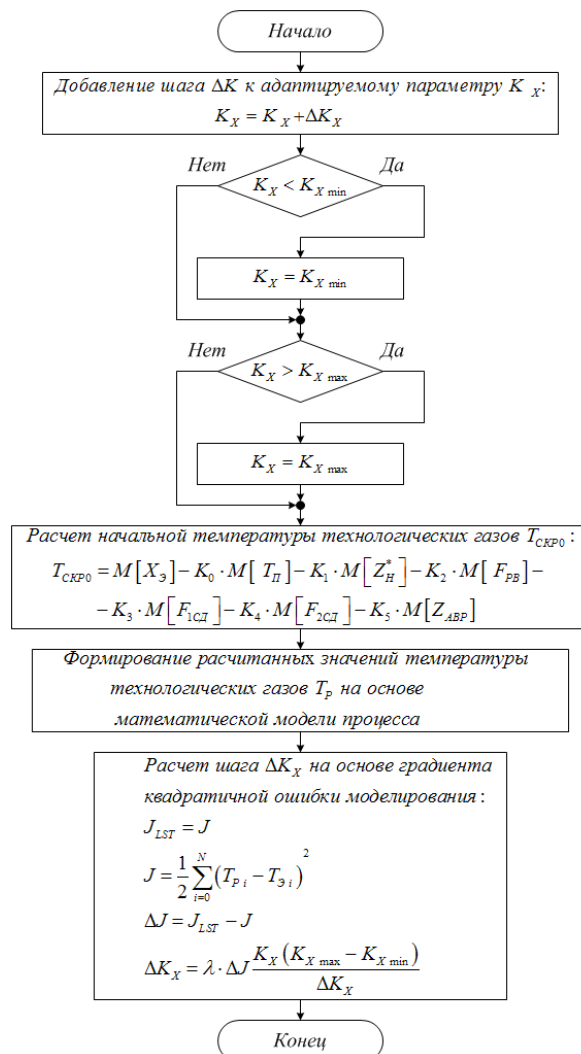


Рис. 4. Блок-схема алгоритма адаптации отдельного параметра ММ:

$\lambda$  – коэффициент адаптации, влияющий на скорость поиска локального минимума в многомерном пространстве  $J(M)$

Коэффициент изменения  $R[X]$  был разработан автором с целью отображения степени изменения фактора относительно своего диапазона варьирования с учетом наличия шума у фактора  $\sigma_{\min}[X]$ , т. е. коэффициент изменения становится больше нуля, когда уровень среднеквадратического отклонения превышает уровень шума. В дальнейшем этот коэффициент используется для определения параметров ММ, которые необходимо оптимизировать с целью снижения ошибки прогнозирования.

Алгоритм параметрической адаптации ММ процесса охлаждения технологических газов в скруббере-охладителе представлен блок-схемой (рис. 3).

Особенность данного алгоритма заключается в том, что он применяется для оптимизации всех адаптируемых параметров ММ: коэффициентов регрессии  $K_0 \dots K_5$ , постоянных времени  $T_0, T_1$  и величин времени запаздывания  $\tau_0, \tau_1$ . Также в алгоритме присутствует проверка на их граничные условия.

Алгоритм адаптации отдельного параметра  $K_X$  ММ процесса охлаждения технологических газов в скруббере-охладителе представлен блок-схемой на рис. 4.

Для проверки работоспособности алгоритма адаптации параметров ММ во время управления объектом был проведен эксперимент, в ходе которого создавались циклические контролируемые возмущения. В качестве возмущения был принят расход 1-й ступени дожига  $CO$ , а в качестве управляющего воздействия,

которое должно компенсировать это возмущение – расход распылительной воды (рис. 5).

Как видим, первые импульсы вызывали большие отклонения температуры технологических газов от задания, чем последние. И каждый последующий импульс вызывал все меньшие отклонения. Это связано с тем, что ПСУ во время управления скруббером следила за адекватностью ММ и подстраивала ее параметры, чтобы повысить прогнозирующую способность (рис. 6). В начале этого эксперимента параметры ММ были равны  $K_2 = -20$  и  $K_3 = -50 \cdot 10^{-3}$ , при этом среднеквадратическая ошибка была равна  $J(M) = 27$ . Но в ходе проведения эксперимента параметры ММ изменились и стали равны  $K_2 = -39,7$  и  $K_3 = -24,3 \cdot 10^{-3}$ , тем самым ошибка прогнозирования  $J(M) = 5$  в итоге снизилась.

Для сравнения, подобный эксперимент с контролируемым циклическим возмущением опасен для ПИ-регулятора, так как вызывает колебания температуры технологических газов, близких к критическим значениям (рис. 7).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Разработан алгоритм для адаптации параметров математической модели скруббера-охладила с целью минимизации среднеквадратической ошибки.
2. Экспериментальные исследования разработанной системы управления с адаптивным наблюдателем показали существенное улучшение качественных показателей управления по сравнению с типовой системой, работающей по ПИ-алгоритму.

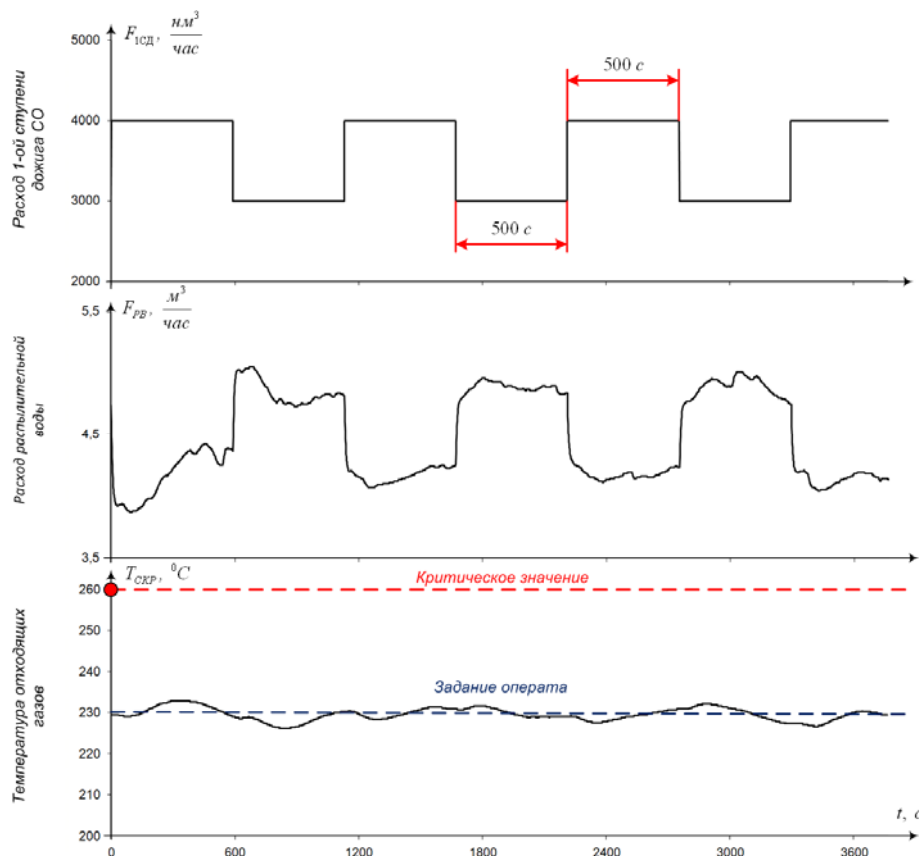


Рис. 5. Графики эксперимента с циклическим возмущением во время управления ПСУ

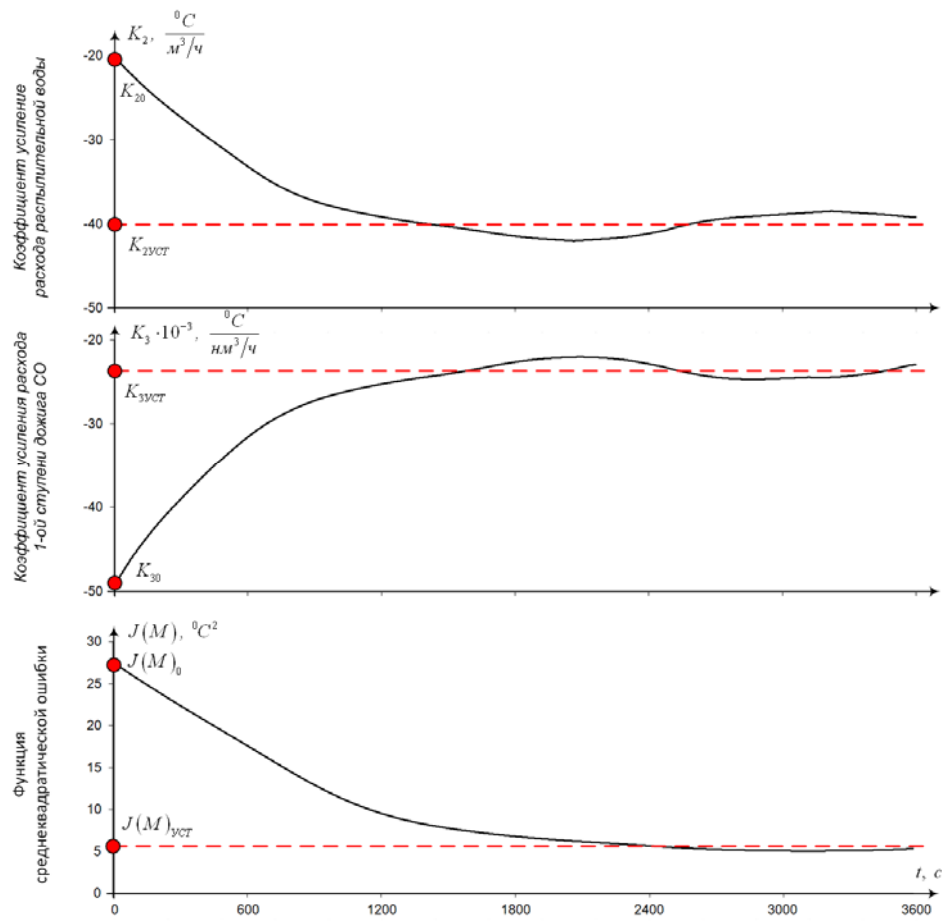


Рис. 6. Динамика изменения параметров ММ и ошибки прогнозирования

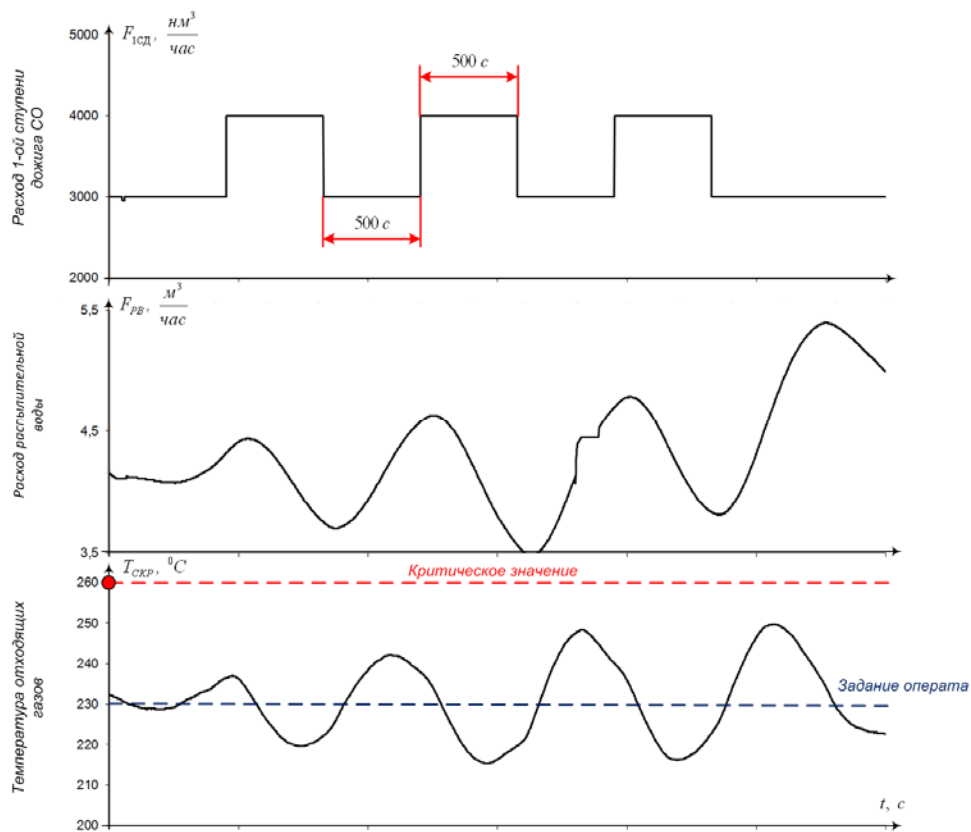


Рис. 7. Графики эксперимента с циклическим возмущением во время управления ПИ-регулятора

## Библиографические ссылки

1. Бискуб К. Н., Писарев А. И. Математическая модель охлаждения технологических газов плавильных электропечей // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2010. Вып. 6 (113). С. 81–86. (Сер. 6. Информатика, телекоммуникации, управление.)
2. А. с. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011610292. Прогнозирующая система управления процессом охлаждения технологических газов плавильной электропечи (версия 2.0) / Бискуб К.Н. ; дата рег. 12.10.2010.
3. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М. : Мир, 1985. С. 213–245.

## References

1. Biscub K. N., Pisarev A. I. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPb GPU*, no. 6. Computer science, telecommunications, management, 2010, vol. 6 (113), pp. 81–86.
2. Certificate of state. registration of the computer № 2011610292, registered in the Registry of the computer programs 12.10.2010. *Prognozirujushhaja sistema upravlenija processom ohlazhdenija tehnologicheskikh gazov plavil'noj jelektropechi* (Predictive process control system cooling process gases melting furnaces) (version 2.0), Biskub K. N.
3. Gill F., Murrey U., Rite M. *Prakticheskaja optimizacija* (Practical Optimization). Moscow, Mir, 1985, pp. 213–245.

© Бискуб К. Н., 2013

УДК 621.791

## МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗЛОЖНИЦ ИЗ ХРОМОВОЙ БРОНЗЫ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛИТКОВ ТИТАНА

В. В. Богданов<sup>1</sup>, Ю. Г. Новосельцев<sup>2</sup>, С. А. Готовко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sibniitm@yandex.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 26. E-mail: gefest\_61@mail.ru

*Тангенциальный ввод в плазмотрон бинарной плазмообразующей инертной смеси газов положительно влияет на сварочный процесс по ряду параметров, но вихревое состояние плазменной дуги при этом вызывает подсос воздуха, что ведет к окислению металла и его хрупкости. При плазменной сварке изложниц из хромовой бронзы БрХ08 во избежание охрупчивания металла шва необходимо содержание в нем хрома в пределах 0,8...1,2 %. Это обеспечивается применением присадка порошковой проволоки, где 22 % Cr и 2 % Ti.*

*Ключевые слова:* плазменная сварка, хромовая бронза, изложница кристаллизатора, горячие трещины, эвтектика, порошковая проволока.

## METALLURGICAL FEATURES OF PLASMA WELDING OF THICK-WALLED MOLDS MADE OF CHROMIUM BRONZE FOR SMELTING LARGE TITANIUM INGOTS

V. V. Bogdanov<sup>1</sup>, Yu. G. Novoselcev<sup>2</sup>, S. A. Gotovko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarsky Rabochy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sibniitm@yandex.ru

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
26 Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: gefest\_61@mail.ru

*Tangential entry of binary plasma-formed inert gas mixture into plasmotron positively influences on the welding process for a number of parameters, but the vortex state of the plasma arc event causes air inflow, resulting in oxidation of the metal and its fragility. To avoid embrittlement of the metal welded by plasma welding of chromium bronze molds BrH08, the content of chromium in the range 0,8...1,2 % is required. This is provided by the use of the additive powder wire with 22 % Cr and 2 % Ti.*

*Keywords:* plasma welding, chrome bronze, mold of the crystallizer, hot cracks, eutectic, cored wire.



При плазменной сварке конструкций из толстолистовой хромовой бронзы типа БрХ08 значительное влияние на свойства металла сварного шва оказывает содержание в нем хрома. Он находится в конструкционном материале в пределах 0,8...1,2 %, т. е. изначально его участие в металлургических процессах в сварочной ванне обусловлено проектом.

Для стабилизации плазменной сварочной дуги, газовой защиты сопла плазмотрона и эффективной теплопередачи от дуги к сварочной ванне (основному металлу) используется тангенциальный ввод плазмообразующей инертной смеси газов аргон-гелий. Поэтому возникает вихревое состояние плазменного потока, в котором более тяжелый и холодный аргон уходит на периферию струи, а теплоноситель гелий концентрируется по ее оси [1].

Однако вихревое состояние плазменной дуги наряду с положительными эффектами обеспечивает подсос воздуха в сварочную ванну, что приводит к окислению легирующего элемента, образованию оксида  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и обеднению сварного соединения хромом. Вследствие этого в металле шва остается порядка 0,2...0,3 % хрома, и он попадает в зону максимальной хрупкости (рис. 1).

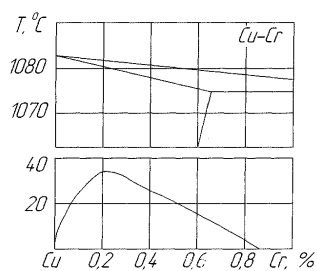


Рис. 1. Горячеломкость сплавов системы Cu-Cr [2; 3]

В сформировавшемся наплавленном металле образуются горячие микротрещины, не обнаруживаемые при рентгеноконтроле и капиллярном (цветном) методе испытаний. Они развиваются и проявляются в про-

цессе дальнейших технологических операций, сопровождаемых деформациями и нагревом изделия (рис. 2).

Особенно эффективно проявляется охрупчивание меди при термодиффузии эвтектики ( $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$ ) в процессе плазменной сварки кислородосодержащей меди МЗ (рис. 3).

Трещины имеют межкристаллитный характер с окисленной поверхностью. В этом случае в проблеме разрушения следует рассматривать два направления [2; 3]:

1. Образование кристаллизационных трещин на конечных стадиях затвердевания, когда в междендритных пространствах находится жидкая фаза – легкоплавкая эвтектика  $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$ , ослабляющая связи между зернами при деформационных усадочных напряжениях, т. е. трещины располагаются в обогащенных межкристаллитных пространствах. Об этом же свидетельствуют работы ИЭС им. Патона [4; 5].

2. Межкристаллитные разрушения (горячие трещины) ниже температур солидуса, когда сварной шов является одновременно твердым раствором с небольшой микрохимической неоднородностью – локальными скоплениями несовершенств кристаллической решетки. Вероятно, хрупкое разрушение сварных швов обусловлено данной неоднородностью и родственно иным видам высокотемпературного межкристаллитного разрушения в твердом состоянии, например, ползучести.

Таким образом, горячие трещины могут быть двух типов – кристаллизационные и подсолидусные.

Запас технологической прочности при сварке (стойкость против образования горячих трещин) зависит от соотношения трех характеристик: температурного интервала хрупкости (ТИХ), деформационной способности в этом интервале и интенсивности нарастания упруго-пластической деформации по мере снижения температуры (темпа деформации). Величина ТИХ определяется химическим составом сплава, дендритной ликвацией, размером и формой кристаллитов, скоростями охлаждения и деформации. Ее можно оценить ориентировочно по диаграмме состояния с учетом неравномерности кристаллизации и влияния примесей.



Рис. 2. Микротрещины в металле шва при плазменной сварке БрХ08 ( $\times 300$ ). Содержание хрома при сварке экспериментального образца менее 0,10 %



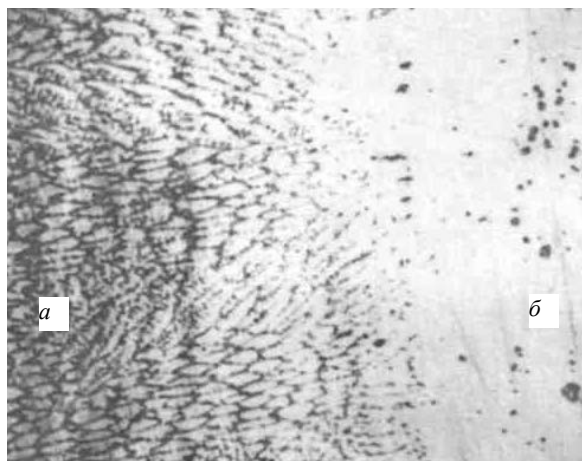


Рис. 3. Термодиффузия эвтектики ( $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$ ) в сторону зоны нагрева меди МЗ мощной плазменной дугой (экспериментальный образец):  
а – скопление эвтектики  $\text{Cu}+\text{Cu}_2\text{O}$  в з.т.в.; б – осветленная (очищенная) от эвтектики зона основного металла

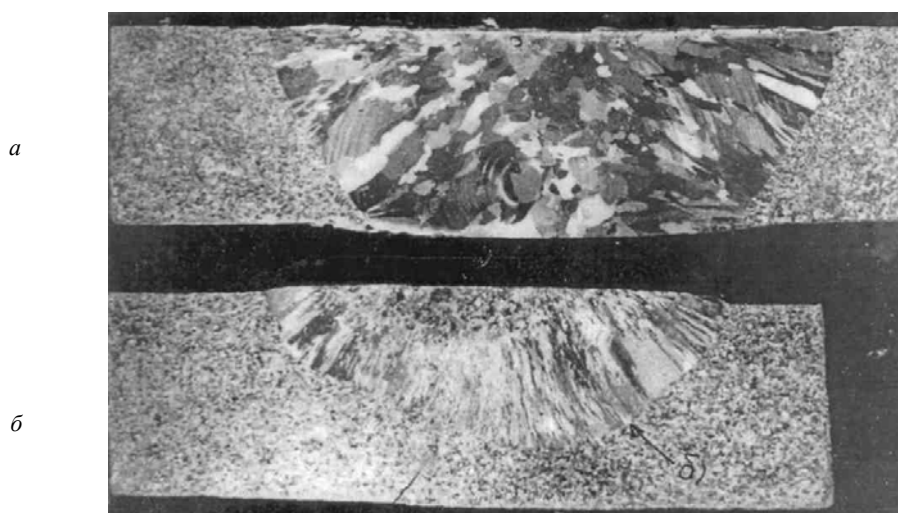


Рис. 4. Модификационное воздействие хрома при плазменной сварке меди и ее сплавов на экспериментальном образце:  
а – содержание хрома 0,2 %; б – содержание хрома 1,2 %

Пластичность сплава в ТИХ зависит от соотношения объемов твердой и жидкой фаз, размеров и форм кристаллитов и характера распределения жидкой фазы, химической и соответствующей структурной микронеоднородности, скорости деформации. Темп деформации определяется термическим коэффициентом линейного сокращения, жесткостью сварного соединения, характером распределения температуры (определяющим степень концентрации деформаций), а также формоизменением свариваемых изделий.

Очевидно, что для увеличения стойкости швов против образования трещин необходимо уменьшить ТИХ, пропорционального эффективному интервалу кристаллизации. Согласно диаграмме  $\text{Cu}-\text{Cr}$  (см. рис. 1), это достигается увеличением содержания хрома в металле шва, и, вследствие этого, повышением пластичности сплава в температурном интервале хрупкости. Хром в виде примеси в меди является элементом, снижающим склонность швов к трещи-

нам, а также модификатором, уменьшающим размеры зерен [4–6] (рис. 4).

Медь и ее сплавы активно поглощают кислород и водород, что резко ухудшает качество металла шва, особенно с образованием пористости при выделении растворенного в меди водорода в процессе охлаждения (рис. 5). Это предъявляет особые требования к качеству подготовки основного металла и присадочной проволоки с целью их обезвоживания.

В то же время отмечено, что поры при сварке меди образуются только в присутствии в металле шва водорода и кислорода одновременно. Учитывая высокую склонность хрома к окислению, делаем вывод, что повышение его содержания в сварном соединении исключает появление пор. Следует отметить хорошую растворимость хрома в меди в твердом состоянии, достигающую при эвтектической температуре  $1\,076,6\text{ }^\circ\text{C}$  максимума 0,73 %. С понижением температуры растворимость резко уменьшается, и при  $400\text{ }^\circ\text{C}$  становится равной 0,02 % (см. таблицу).

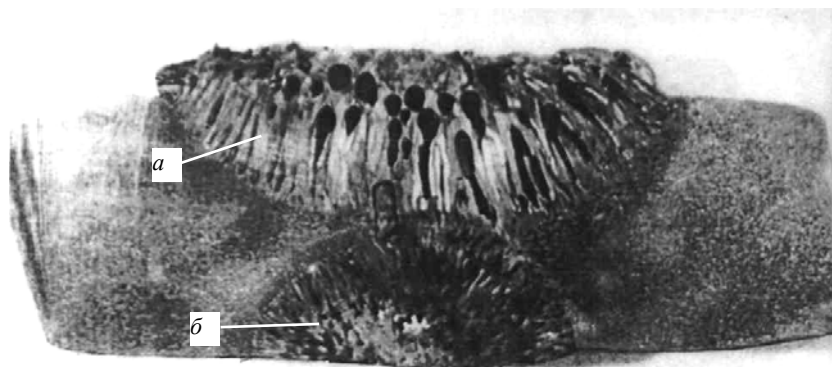


Рис. 5. Плазменная сварка меди М2 (экспериментальный образец, повышенное содержание влаги):  
а – присадок – проволока из меди М1 (пористость, 0 % Cr); б – присадок – порошковая проволока, где 22 % Cr и 2 % Ti

#### Растворимость хрома в меди в твердом состоянии в системе Cu+Cr

| Температура, °C | Растворимость хрома, % |         | Температура, °C | Растворимость хрома, % |         |
|-----------------|------------------------|---------|-----------------|------------------------|---------|
|                 | по массе               | атомные |                 | по массе               | атомные |
| 1076            | 0,73                   | 0,89    | 910             | 0,22                   | 0,27    |
| 1070            | 0,62                   | 0,76    | 900             | 0,19                   | 0,23    |
| 1050            | 0,60                   | 0,73    | 840             | 0,10                   | 0,12    |
| 1030            | 0,44                   | 0,54    | 800             | 0,08                   | 0,10    |
| 1000            | 0,40                   | 0,49    | 700             | 0,08                   | 0,10    |
| 980             | 0,39                   | 0,48    | 600             | 0,07                   | 0,09    |
| 950             | 0,25                   | 0,31    | 400             | 0,02                   | 0,024   |

Попытки введения в сварочную ванну самого активного раскислителя титана приводит при его неполном выгорании к резкому снижению электро- и теплопроводности металла шва, т. е. к снижению служебных характеристик изделия. В то же время дополнительное введение в металл шва хрома и повышение его содержания в сварном соединении незначительно влияет на электропроводность (рис. 6) и на теплопроводность изделия.

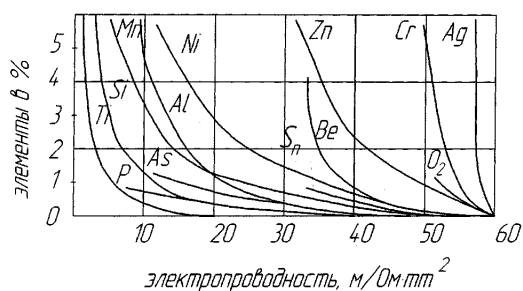


Рис. 6. Влияние элементов на электропроводность основного металла

Очевидно, что в процессе сварки изложниц из хромовой бронзы возникает основная технологическая проблема – сохранение содержания хрома или компенсация его выгорания. Дополнительная защита плазменной дуги от воздуха значительно усложняет и без того достаточно сложную конструкцию плазмотрона и не решает задачу защиты сварочной ванны, которая из-за высокой теплопроводности металла имеет большие размеры (более 90×160 мм). Увеличе-

ние расхода инертного газа с целью защиты расплавленного металла от воздуха вызывает выплескивание жидкой фазы. Поэтому сварка производится по слою бинарной смеси флюсов АН-26 и АФ-4А в соотношении 10:1, где первый защищает сварочную ванну, а второй смывает тугоплавкую окисную пленку  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Для решения задачи компенсации угара хрома авторами были проведены исследования его воздействия на пластичность металла шва и модифицирующего влияния на сварное соединение. В результате разработан присадочный материал на основе специальной порошковой проволоки с содержанием 22 % хрома и до 2 % титана, что позволило при введении его в сварочную ванну восстановить содержание в шве 0,8...1,0 % хрома. Титан выгорает полностью, раскисляя сварочную ванну. Это обеспечивает сохранность деформационной способности сваренных из хромовой бронзы изделий на уровне конструкционного материала [7]. Проволока либо просто накладывается вдоль стыка, либо подается в плазменную дугу (рис. 7), что позволяет получать прочное, пластичное и вакуумно-плотное сварное соединение при изготовлении крупногабаритных конструкций из хромовой бронзы типа БрХ08 (рис. 8).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. При плазменной сварке изложниц кристаллизаторов из толстолистовой хромовой бронзы стабилизационная тангенциальная подача плазмообразующего газа в плазмотрон и, вследствие этого, вихревое состояние плазменной струи приводит к подосу воздуха в сварочную ванну, обедняя хромом металл шва и вводя его в состояние повышенной хрупкости.

2. Для обеспечения пластичности и плотности сварного соединения необходимо в процессе сварки гарантировать в металле шва содержание хрома в пределах 0,8...1,2 %.

3. Требуемое содержание хрома в металле шва при плазменной сварке изделий БрХ08 обеспечивается применением в качестве присадки порошковой проволоки, в составе которой имеется 22 % хрома и 2 % титана.

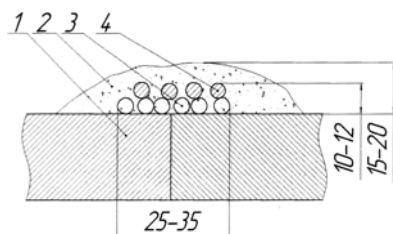


Рис. 7. Использование присадки в виде порошковой проволоки, где 22 % Cr и до 2 % Ti:  
1 – основной металл БрХ08; 2 – смесь флюсов АН-26 и АФ-4А;  
3 – присадочная проволока; 4 – проволока М1



Рис. 8. Изложница кристаллизатора для вакуумной электродуговой выплавки крупных слитков титана. Плазменная сварка, материал БрХ08 толщиной 40 мм

### Библиографические ссылки

1. Новосельцев Ю. Г. Технологические особенности плазменной сварки крупногабаритных изделий из меди и ее сплавов : моногр. Красноярск : ИПК СФУ, 2008.

2. Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. М. : Наука, 1966.

3. Абрамович В. Р., Демянцевич В. П., Ефимов Л. А. Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. Л. : Машиностроение, 1988.

4. Илюшенко В. М., Аношин В. А., Бондаренко А. Н. Исследование влияния примесей и ряда легирующих элементов на образование трещин при сварке меди // Актуальные проблемы сварки цветных металлов : сб. докладов на I Всесоюз. конф. Киев : Наукова думка, 1980.

5. Илюшенко В. М., Аношин В. А. О влиянии примесей на склонность к образованию трещин при сварке меди // Актуальные проблемы сварки цветных металлов : сб. докладов на II Всесоюз. конф. Киев : Наукова думка, 1985.

6. Зенкова Э. К., Гликман Е. Э. Механизм образования горячих трещин при сварке сплавов // Сварочное производство. 1986. № 6.

7. Analysis of the conditions of efficient and stable operation of plasma in welding processes / Y. G. Novoseltsev et al. // Welding International. October. 2012.

### References

1. Novoseltsev Yu. G. *Tekhnologicheskiye osobennosti plazmennoy svarki krupnogabaritnykh izdeliy iz medi i yeyo spлавov* (Technological features plasma welding of large products of copper and its alloys: monograph). Krasnoyarsk, IPK SFU, 2008.

2. Novikov I. I. *Goryachelomkost tsvetnykh metallov i spлавov* (Hot brittleness of nonferrous metals and alloys). Moscow, Nauka, 1966.

3. Abramovich V. R., Demyantsevich V. P., Yefimov L. A. *Svarka plavleniyem medi i spлавov na mednoy osnove* (Fusion welding of copper and copper-based alloys). Leningrad, Mashinostroenie, 1988.

4. Ilyushenko V. M., Anoshin V. A., Bondarenko A. N. *Sb. докладов na I Vsesoyuznoy konferentsii "Aktualnyye problemy svarki tsvetnykh metallov"* (Sat. Reports on I-Union Conf. "Actual problems of welding nonferrous metals"). Kiev, Naukova Dumka, 1980.

5. Ilyushenko V. M., Anoshin V. A. *Sbornik докладov na II Vsesoyuznoy konferentsii "Aktualnyye problemy svarki tsvetnykh metallov"* (Proc. of the II All-Union Conf. "Actual problems of welding nonferrous metals"). Kiev, Naukova Dumka, 1985.

6. Zenkova E. K., Glikman E. E. *Svarochnoye proizvodstvo*, 1986, № 6.

7. Novoseltsev Y. G., Vasilev-Polikin K. S., Krilov V. M., Tuf S. M. Analysis of the conditions of efficient and stable operation of plasma in welding processes. *Welding International*, October, 2012.

© Богданов В. В., Новосельцев Ю. Г., Готовко С. А., 2013

УДК 621.317.44

# СКВИД-МАГНИТОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 4,2–370 К

Д. А. Великанов

Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38. E-mail: dpona1@gmail.com

*Описан магнитометр на основе СКВИДа постоянного тока, предназначенный для исследования широкого спектра веществ в слабых магнитных полях. Динамический диапазон прибора составляет  $2 \cdot 10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-2}$  Гс·см<sup>3</sup>.*

*Ключевые слова:* сверхпроводимость, СКВИД, магнитометр, криостат, динамический диапазон.

## SQUID MAGNETOMETER FOR INVESTIGATIONS OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF MATERIALS IN THE TEMPERATURE RANGE 4,2–370 K

D. A. Velikanov

Institute of Physics named after L. V. Kirenskiy of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: dpona1@gmail.com

*A magnetometer based on DC SQUID is described. It is designed to investigate a wide range of substances in weak magnetic fields. The dynamic range of the device is  $2 \cdot 10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-2}$  emu.*

*Keywords:* superconductivity, SQUID, magnetometer, cryostat, dynamic range.

Среди различных методов магнитных измерений в последнее время наибольшее развитие получила СКВИД-магнитометрия, в основе которой лежат эффекты слабой сверхпроводимости в сверхпроводящих квантовых интерференционных устройствах (СКВИДах) [1]. Прежде всего, это связано с рекордно высокой чувствительностью метода, достигающей  $5 \cdot 10^{-33}$  Дж/Гц (чувствительность по магнитному полю  $\sim 10^{-14}$  Тл). Примечательно, что чувствительность данного метода не зависит от уровня сигнала, на фоне которого проводятся измерения, это позволяет надежно регистрировать малые изменения намагниченности на фоне большой статической величины.

Блок-схема СКВИД-магнитометра представлена на рис. 1. В качестве чувствительного элемента магнитометра применен интегральный СКВИД 1 постоянного тока (ПТ СКВИД), который является высокочувствительным детектором магнитного потока. Сигнал от исследуемого образца 2 к СКВИДу передается посредством короткозамкнутого сверхпроводящего трансформатора магнитного потока, имеющего две приемные катушки 3, включенные встречно-последовательно, и входную катушку 4 СКВИДа. СКВИД через согласующий LC-контур, а также катушка 5 модуляции и обратной связи подключены к блоку 6 электроники, в котором производится усиление и обработка полезного сигнала, а также формируются сигналы для катушки 5. Градиентометрическое включение приемных катушек 3 способствует подавлению помех, вызванных вариациями магнитного поля и микрофонным эффектом. Минимальный и максимальный регистрируемый магнитный момент образца составляет, соответственно,  $2 \cdot 10^{-8}$  и  $5 \cdot 10^{-2}$  Гс·см<sup>3</sup>.

Криогенная часть магнитометра состоит из криостата, подключенного к откачным и газовым коммуникациям, и криогенной вставки. Магнитное поле создается сверхпроводящим соленоидом 7, работающим в короткозамкнутом режиме. И соленоид, и трансформатор потока оборудованы тепловыми ключами 8, 9. Источник тока 10, питающий соленоид, откалиброван так, чтобы на его цифровом индикаторе было отражено текущее значение поля в эрстедах. Диапазон магнитных полей прибора составляет  $0 \dots \pm 1$  500 Э, точность установки поля –  $10^{-2}$  Э.

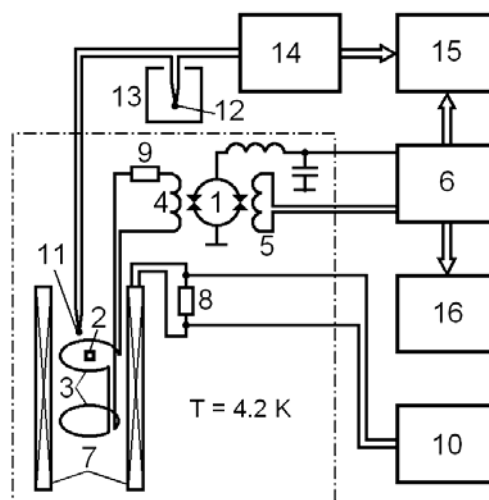


Рис. 1. Блок-схема СКВИД-магнитометра

Исследуемый образец 2 помещается в ампулу, которая теплоизолирована от гелиевой ванны с помощью

вакуумной рубашки. Температуру образца можно изменять, нагревая либо охлаждая ампулу, в пределах 4,2...370 К. Для контроля температуры служит дифференциальная термопара Au/0,07% Fe–Cu [2], ее первый спай 11 размещен вблизи образца, а второй спай 12 помещен в термостат 13. ТермоЭДС данной термопары носит сильно нелинейный характер, при повышении температуры от 4,2 до 370 К чувствительность термопары уменьшается в 7 раз, поэтому сигнал термопары необходимо линеаризовать.

Усиление и линеаризация термоЭДС производится в электронном блоке 14. Усиленный сигнал термопары преобразуется 12-тиразрядным АЦП, с него поступает на адресные входы ПЗУ, затем с выходов данных ПЗУ в виде опять же 12-тиразрядного кода подается на ЦАП, на выходе которого вновь формируется постоянное напряжение, но уже линейно-пропорциональное абсолютной температуре образца. Программа для ПЗУ была разработана специально под используемый тип термопары. Точность измерения температуры равна 0,1 К.

Выходы блоков 6, 14 подключаются к двухкоординатному графопостроителю 15 либо контроллеру. Для настройки и визуального контроля за работой прибора задействован многоканальный осциллограф 16.

Устройство криостата и схема откачных и газовых коммуникаций изображены на рис. 2. Криостат состоит из сосуда Дьюара 1 для жидкого азота, сосуда Дьюара 2 для жидкого гелия, капли 3, уплотнительного кольца 4, фланца 5, амортизационной прокладки 6. Сосуды Дьюара 1, 2 изготовлены из молибденового стекла и имеют цилиндрическую форму. Сосуд Дьюара 1 имеет внешний диаметр 125 мм, внутренний диаметр 105 мм, длину 600 мм. Сосуд Дьюара 2 имеет внешний диаметр 80 мм, внутренний диаметр 60 мм, длину 650 мм. Поверхности стенок, образующих вакуумное пространство сосудов Дьюара, посеребрены. Объем гелиевой ванны составляет 1,2 л.

У сосуда Дьюара 1 на нижнем торце его внешней стенки имеется технологический отросток 7, оставшийся после отпайки откачного патрубка. Пространство 8 между двойными стенками сосуда Дьюара 1 откачано до высокого вакуума при изготовлении сосуда.

В верхней части сосуда Дьюара 2 для жидкого гелия имеется стеклянный патрубок 9, который припаян к внешней стенке 10 выше верхнего края сосуда Дьюара 1 для жидкого азота. Через этот патрубок 9 перед каждой заливкой в криостат криоагентов – жидкого азота 11 и жидкого гелия 12 – производится откачка пространства 13 между двойными стенками сосуда Дьюара 2 до высокого вакуума. Тем самым обеспечивается высокая степень теплоизоляции между азотным экраном и объемом с жидким гелием [3].

Капка 3 и фланец 5 изготовлены из нержавеющей стали – коррозионностойкого материала с низкой теплопроводностью. В капке 3 выполнены выточки 14, 15, а во фланце 5 – выточка 16. Уплотнительное кольцо 4, изготовленное из вакуумной резины, расположено между капкой 3 и фланцем 5, частично заходя в выточки 14, 16, и охватывает внешнюю стенку 10 сосуда Дьюара 2 выше патрубка 9. Внутренний диа-

метр уплотнительного кольца 4 выполняется несколько меньшим, чем внешний диаметр сосуда Дьюара 2, для того чтобы обеспечить натяг соединения и, соответственно, его герметичность.

Вакуумноплотное соединение сосуда Дьюара 2 для жидкого гелия с капкой 3 обеспечивается путем стягивания между собой капли 3 и фланца 5 с помощью винтов 17. Перед сборкой криостата на уплотнительное кольцо 4 наносится вакуумная смазка. При затяжке соединения эластичное уплотнительное кольцо 4 частично выдавливается в кольцевые зазоры 18 между элементами конструкции. Тем самым предотвращается возникновение разрушающих внешнюю стенку 10 механических напряжений.

Амортизационная прокладка 6, изготовленная из пенополистирола, выполняет сразу две функции. Во-первых, смятая под воздействием торца 19, она предохраняет торец 19 от появления в нем разрушающих механических напряжений. Во-вторых, прокладка 6 препятствует току испаряющегося гелия 12 к уплотнительному кольцу 4, защищая тем самым последнее от охлаждения до низкой температуры, при которой происходит отвердевание материала кольца 4 и, как следствие, может происходить разгерметизация вакуумного соединения.

Капка 3 криостата оснащена штуцером 20 для подсоединения криогенной вставки 21, штуцером 22 для подсоединения переливного устройства 23 для жидкого гелия и патрубком 24 для возврата газообразного гелия.

Криостат посредством шлангов 25, 26, выполненных из вакуумной резины, вакуумных вентиляей 27, 28, 29 и тройника 30 подсоединен к вакуумной магистрали 31 и возвратной магистрали 32. Вакуумный насос 33 через ventиль 34 подключен к вакуумной магистрали 31, а через ventиль 35 соединен с атмосферой. Возвратная магистраль 32 через обратный клапан 36 подключена к газгольдеру 37. К возвратной магистрали 32 через ventиль 38 с помощью шланга 39 подсоединяется транспортный сосуд Дьюара 40 для жидкого гелия, например, сосуд типа СТГ–40. Переливное устройство 23 для жидкого гелия имеет ventиль 41. Оно одним концом 42 вставляется в криостат в сосуд Дьюара 2 для жидкого гелия, а другим концом 43 – в транспортный сосуд Дьюара 40. Герметичность соединений достигается уплотнениями в штуцере 22 и в горловине транспортного сосуда Дьюара 40.

После монтажа криостата необходимо из сосуда Дьюара 2 для жидкого гелия удалить воздух и заполнить его газообразным гелием. Для этого ventиль 35 закрывают, включают вакуумный насос 33 и открывают ventили 34, 28. После откачки ventиль 28 закрывают, затем открывают ventиль 29, при этом сосуд Дьюара 2 заполняется газообразным гелием.

Для откачки вакуумного пространства 13 открывают ventиль 27. Откачка производится до вакуума  $\sim 10^{-3}$  мм рт. ст., после чего из транспортного сосуда Дьюара для жидкого азота в сосуд Дьюара 1 заливают жидкий азот через воронку 44. После этого ventили 27, 34 закрывают, насос 33 выключают и открывают ventиль 35 для напуска в насос воздуха.

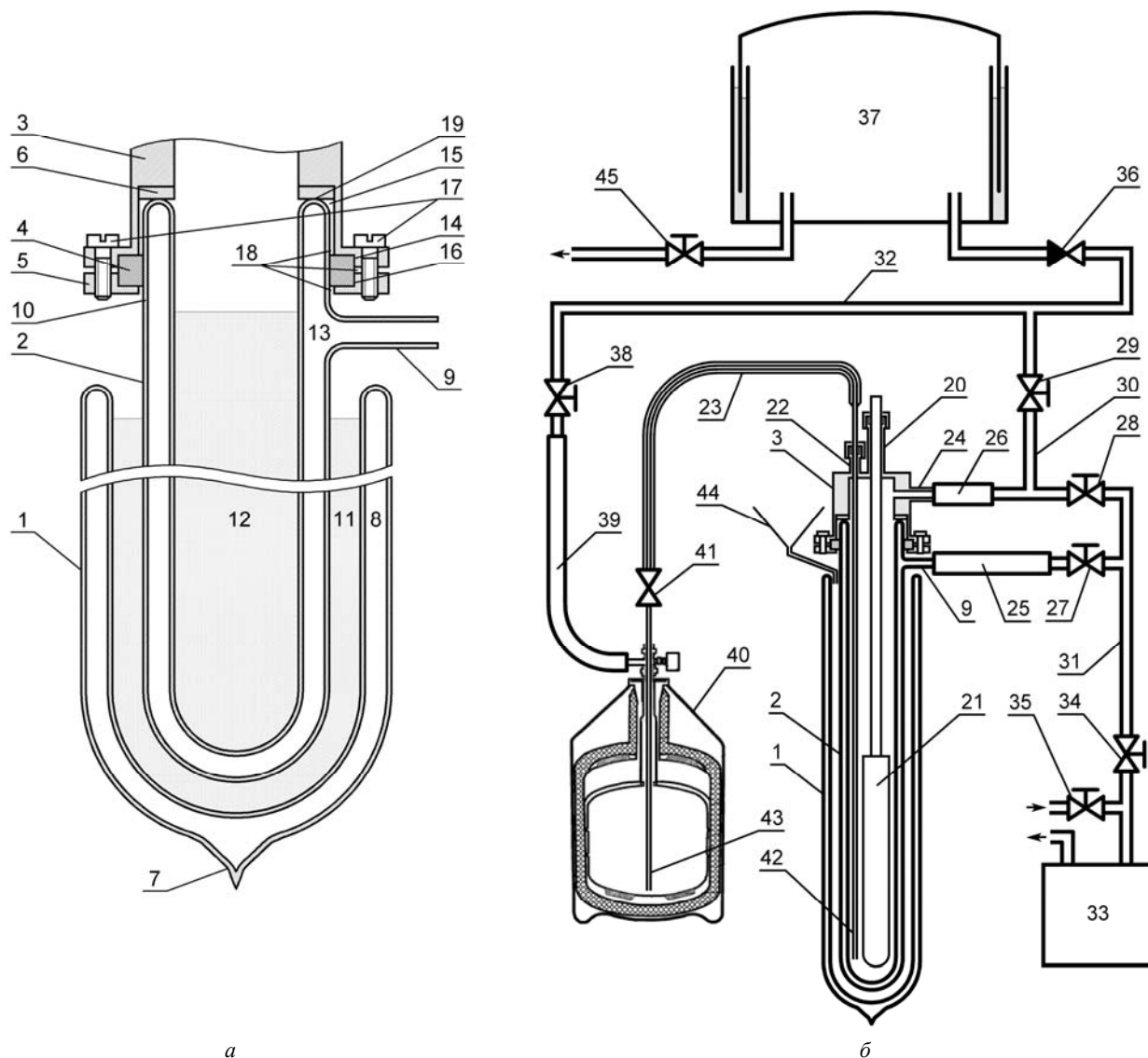


Рис. 2. Устройство криостата (а) и схема его подключения к откачным и газовым коммуникациям (б)

Далее закрывают вентиль 38, вентиль 41 открывают и заливают из транспортного сосуда Дьюара 40 жидкий гелий в сосуд Дьюара 2. После заливки вентиль 38 открывают, а вентиль 41 закрывают. Криостат готов к работе. Физические исследования проводят внутри криогенной вставки 21, внутри которой смонтированы сверхпроводящие элементы СКВИД-магнитометра.

По ходу времени испарившийся гелий из криостата, а также из транспортного сосуда Дьюара 40, по возвратной магистрали 32 поступает в газгольдер 37. Обратный клапан 36 предотвращает обратный ток гелия. По мере наполнения газгольдера 37 периодически открывают вентиль 45, и через него гелий с помощью компрессора закачивают в баллоны высокого давления.

Перейдем теперь к рассмотрению устройства блока электроники СКВИДа (поз. 6 на рис. 1).

Отметим, что для расширения динамического диапазона в практике СКВИДы используются в режиме нуль-детектора. Работа СКВИДа в качестве нуль-детектора основана на использовании периодической

зависимости напряжения на СКВИДе от приложенного к нему магнитного потока [1]. Упомянутая зависимость, а также вольт-амперная характеристика ПТ СКВИДа при различных значениях магнитного потока приведены на рис. 3. Для обслуживания ПТ СКВИДа была разработана электрическая схема, основные функциональные узлы которой представлены на рис. 4. Прототипом для нее послужила схема, приведенная в [4], которая была существенно модернизирована.

Постоянным током смещения задается рабочая точка СКВИДа. Для задействованного в приборе конкретного СКВИДа оптимальное значение тока смещения составило  $I_0 = 32$  мкА. Магнитный поток через контур квантования СКВИДа модулируется сигналом прямоугольной формы частотой 500 кГц с амплитудой  $\pm \Phi_0/4$  ( $\Phi_0$  – квант магнитного потока), который подается от генератора в катушку  $L_m$  модуляции и обратной связи, индуктивно связанную со СКВИДом. Переменное напряжение, возникающее на СКВИДе, через согласующий LC-контур подается на малошу-

мощный предварительный усилитель, усиливается, затем поступает на синхронный детектор. Когда квазистатический поток через контур СКВИДа составляет строго  $\Phi = n\Phi_0$  или  $\Phi = (n+1/2)\Phi_0$ , где  $n$  – целое число, напряжение  $V$  на СКВИДе представляет собой сигнал прямоугольной формы частотой 1 МГц. При синхронном детектировании этого сигнала с опорной частотой 500 кГц напряжение на выходе детектора равно нулю. При других значениях квазистатического потока  $\Phi$  на СКВИДе возникает сигнал частотой 500 кГц. В этом случае на выходе синхронного детектора появляется постоянное напряжение, причем в зависимости от сдвига фаз опорного и полезного сигналов, оно имеет максимальное положительное либо отрицательное значение, когда  $\Phi = (n+1/4)\Phi_0$ , и максимальное отрицательное либо положительное значение, когда  $\Phi = (n+3/4)\Phi_0$ . Напряжение с выхода синхронного детектора интегрируется и, будучи приложенным к резистору  $R_{oc}$  в цепи обратной связи, задает ток обратной связи, который подается в катушку  $L_m$ , поддерживая постоянным полный магнитный поток через контур интерферометра. Таким образом, изменению входного потока соответствует приращение напряжения на выходе интегратора. Тумблер  $\Pi$  служит для размыкания цепи обратной связи во время настройки прибора.

Во входном каскаде предусилителя установлен малошумящий полевой транзистор типа КП307Г, имеющий высокое входное сопротивление  $\sim 10^5$  Ом. Поэтому для его оптимального согласования по шумам с низкоомным ( $\sim 1$  Ом) СКВИДом используется охлаждаемый резонансный  $LC$ -контур, вследствие чего импеданс СКВИДа увеличивается в  $Q$  раз, где  $Q$  –

добротность контура. Полоса пропускания  $LC$ -контура накладывает ограничение на быстродействие магнитометра. Обычно применение схемы с резонансным контуром в цепи согласования СКВИДа с предусилителем позволяет отслеживать изменение магнитного потока с максимальной скоростью  $\sim 10^4 \Phi_0 \text{ с}^{-1}$ . Если необходимо расширить частотный диапазон, то в качестве согласующих элементов следует применять широкополосные трансформаторы [5].

К выходу интегратора подключено устройство установки нуля выходного сигнала магнитометра (устройство УНВСМ). Необходимость в таком устройстве была выявлена на ранней стадии эксплуатации СКВИД-магнитометра. Дело в том, что в ходе проведения магнитных измерений наблюдается постоянный дрейф сигнала, обусловленный влиянием магнитного момента от элементов криогенной вставки. Поэтому необходимо перед снятием каждой экспериментальной точки устанавливать «ноль» на выходе магнитометра. Оказалось, что сделать это качественно традиционными методами [4; 6; 7] не представляется возможным. Как правило, юстировку выходного нулевого напряжения осуществляли путем изменения постоянного тока, подаваемого от дополнительного источника в катушку  $L_m$  обратной связи. При этом в качестве регулирующего элемента использовался переменный резистор, перестраиваемый вручную. Данная процедура занимала существенное время и отвлекала оператора от процесса собственно магнитных измерений, что приводило к потерям полезной информации и криогенных ресурсов. Также имела место недостаточная точность установки «нуля».

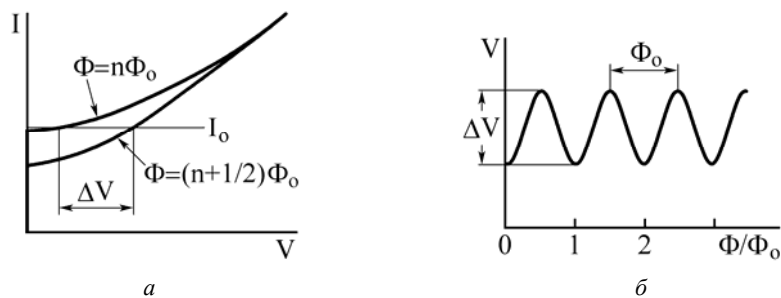


Рис. 3. ПТ СКВИД: вольт-амперная характеристика (а); зависимость напряжения от магнитного потока при постоянном токе смещения  $I_0$  (б)

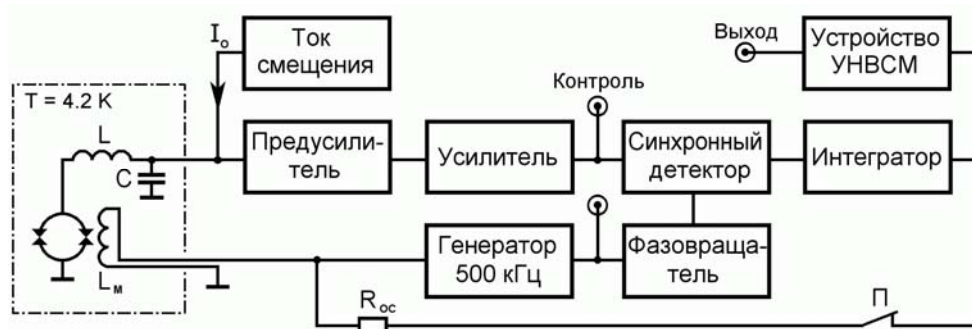


Рис. 4. Электроника ПТ СКВИДа



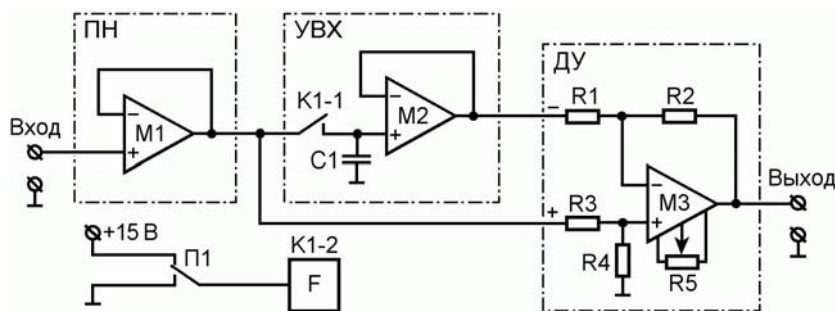


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема устройства УНВСМ:  
 М1, М3 – КР140УД608; М2 – КР544УД1А; К1 – КР590КН7; С1 – К73-17-160В-1,5мкФ $\pm 20\%$ -В;  
 R1–R4 – С2-10-0,25-2,05 кОм $\pm 0,5\%$ ; R5 – СП5-3В-1,0-4,7 кОм $\pm 5\%$ ; П1 – ПКН6-1

Принципиальная электрическая схема устройства УНВСМ показана на рис. 5. Оно содержит повторитель напряжения (ПН) на операционном усилителе (ОУ) М1, устройство выборки-хранения (УВХ) на ОУ М2, запоминающем конденсаторе С1 и электронном ключе К1-1 и дифференциальный усилитель ДУ на основе ОУ М3. ПН является буферным каскадом и служит для устранения воздействия УВХ на устойчивую работу магнитометра. Номиналами постоянных резисторов R1–R4 определяется коэффициент передачи ДУ. Подстроечный резистор R5 служит для балансировки ОУ М3.

Устройство УНВСМ имеет два режима: «установка нуля» и «измерение». Переключение режимов работы устройства осуществляется ключом К1-1. Замкнутое положение ключа К1-1 соответствует режиму «установка нуля», разомкнутое – режиму «измерение». Электронный ключ К1-1 снабжен схемой управления К1-2, подключенной к кнопочному переключателю П1. Оператор с помощью переключателя П1 имеет возможность выбирать нужный режим. Заметим, что в обоих режимах напряжение с выхода ПН постоянно поступает на неинвертирующий вход ДУ.

Установка нулевого напряжения магнитометра происходит в режиме «установка нуля». В этом режиме ключ К1-1 замыкается, и УВХ устанавливается в режим отслеживания входного сигнала. При этом на инвертирующий вход ДУ проходит напряжение с выхода ПН. Напряжения на обоих входах ДУ сравниваются между собой, в результате чего на выходе ДУ устанавливается нулевое напряжение.

В режиме «измерение» ключ К1-1 размыкается, и УВХ переходит в режим хранения мгновенного значения входного сигнала. Таким образом, напряжение на инвертирующем входе ДУ сохраняется постоянным в процессе измерения. В то же время при изменении входного сигнала происходит изменение напряжения на неинвертирующем входе ДУ. Вследствие чего на выходе ДУ появляется напряжение, значение которого равно разности между текущим значением входного напряжения и напряжением, которое было на входе устройства УНВСМ в момент переключения устройства из режима «установка нуля» в режим «измерение».

Наличие устройства УНВСМ позволяет исключить неоднозначность установки нуля, обусловленную мануальным характером действий оператора, что, в свою

очередь, позволяет снизить погрешность измерений на СКВИД-магнитометре, освободить оператора от одновременных действий по настройке «нуля» вручную.

Конструктивно электроника ПТ СКВИДа выполнена в виде двух блоков. Все функциональные узлы, за исключением предварительного усилителя, смонтированы внутри приборного корпуса, имеющего габариты 480×360×100 мм<sup>3</sup>. Предусилитель смонтирован в титановом корпусе с габаритами  $\varnothing 32 \times 80$  мм<sup>3</sup> и закреплен на капке криостата. Предусилитель соединен с основным блоком экранирующим кабелем длиной 2 м.

Калибровка выходного сигнала магнитометра проводилась следующим образом. По известной методике [7] была изготовлена образцовая катушка-эквивалент, имитирующая однородно намагниченный короткий образец цилиндрической формы, и была рассчитана ее константа, составившая 0,104 Гс·см<sup>3</sup>/А. Катушка-эквивалент помещалась на место образца в одну из приемных катушек трансформатора потока, затем через нее пропусклся ток, и регистрировался отклик магнитометра. В ходе калибровки было установлено, что в наиболее чувствительном поддиапазоне напряжение 1 В на выходе прибора соответствует магнитному моменту  $4,6 \cdot 10^{-5}$  Гс·см<sup>3</sup> (emu).

СКВИД-магнитометр предназначен преимущественно для снятия двух типов экспериментальных кривых: 1) зависимостей магнитного момента исследуемых образцов от температуры  $M(T)$  при постоянном магнитном поле; 2) зависимостей магнитного момента от магнитного поля  $M(H)$  при постоянной температуре. Кроме того, предусмотрено изучение релаксационных зависимостей (зависимостей магнитного момента от времени  $M(t)$ ), при неизменных температуре и магнитном поле. Все магнитные измерения проводятся исключительно в режиме короткого замыкания сверхпроводящего соленоида; при этом магнитный поток в контуре соленоида квантуется, а величина магнитного поля принимает строго фиксированные значения.

При измерениях слабомагнитных веществ важно учитывать, что держатель, на который крепится образец, сам по себе тоже обладает магнитными свойствами. Поэтому необходимо, помимо всего, проводить измерение магнитного момента пустого держателя при условиях, идентичных условиям измерения исследуемого образца. При обработке результатов сигнал от держателя вычитается.



Итак, в ходе работ по созданию СКВИД-магнитометра был применен ряд новшеств, в том числе, описанных в [3; 8], которые существенно повысили производительность и улучшили ряд технико-эксплуатационных характеристик прибора по сравнению с известными устройствами аналогичного назначения. Схемотехническое построение блока электроники СКВИДа обеспечивает малое время (~1 мс) и высокую точность (~0,02 % от динамического диапазона на каждом из пределов измерений) установки нуля выходного сигнала магнитометра [8]. За счет конструктивного решения криостата удастся сохранять его теплоизоляционные свойства неизменно высокими, отпадает надобность в периодических ремонтно-восстановительных работах с сосудом Дьюара для жидкого гелия, повышается эффективность использования сосуда Дьюара для жидкого азота [3]. Конструкция криогенной части исключает при захлаживании появление разрушающих механических напряжений в стеклянных сосудах Дьюара, позволяет минимизировать потери дорогостоящего криоагента, каковым является гелий. Так расход жидкого гелия на первичную заливку криостата составляет 4–5 л, а на каждую последующую доливку требуется около 2 л жидкого гелия.

Благодаря высокой чувствительности, магнитометр позволяет исследовать статические магнитные свойства у широкого спектра веществ: от сильномагнитных ферро- и ферримагнетиков до спиновых стекол, мультислойных пленок и наноструктур [9–11]. Метод СКВИД-магнитометрии имеет большие перспективы при исследовании магнитных характеристик веществ, содержащих незначительное количество магнитных примесей, а также микрограммовых образцов. Наконец, высокая чувствительность метода позволяет проводить измерения в очень слабых полях, менее 10 Э. В ряде случаев, в частности, при исследовании высокотемпературных сверхпроводников, это обстоятельство имеет принципиальное значение.

#### Библиографические ссылки

1. Кларк Дж. Принципы действия и применение СКВИДов // ТИИЭР. 1989. Т. 77, № 8. С. 118–137.
2. Температурные измерения : справочник / О. А. Герашенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина и др. Киев : Наук. думка, 1989.
3. Пат. РФ № 2304745. Криостат / Д. А. Великанов. Оpubл. 20.08.2007, Бюл. № 23.
4. Clarke J., Goubau W. M., Ketchen M. B. Tunnel junction dc SQUID: fabrication, operation, and performance // J. Low Temp. Phys. 1976. Vol. 25, № 1/2. P. 99–144.
5. Wellstood F., Heiden C., Clarke J. Integrated dc SQUID magnetometer with a high slew rate // Rev. Sci. Instrum. 1984. Vol. 55, № 6. P. 952–957.
6. Дробин В. М., Лоботка П., Трофимов В. Н. Блок регистрации сверхпроводящего квантового магнитометра // ПТЭ. 1987. № 3. С. 158–161.
7. Клименко А. Г. Универсальный СКВИД-магнитометр для магнитных исследований в слабых полях в диапазоне температур 1,5–300 К // Препринт № 85-1. ИНХ СО АН СССР. Новосибирск, 1985. 42 с.
8. Пат. РФ № 2246119. Магнитометр со сверхпроводящим квантовым интерферометрическим датчиком / Д. А. Великанов. Оpubл. 10.02.2005, Бюл. № 4.
9. Влияние магнитного поля на межслоевое взаимодействие в пленках (Co/Si/Gd/Si)<sub>n</sub> / Г. С. Патрин, В. О. Васковский, Д. А. Великанов, А. В. Свалов // Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75, № 3. С. 188–190.
10. Magnetic Properties of PT and IR Nanoparticles / E. A. Petrakovskaya, V. G. Isakova, D. A. Velikanov et al. // Nanomaterials: New Research Developments. New York : Nova Science Publishers. 2009. P. 21–36.
11. Magnetic and magneto-optical properties of Ni-Ge layered films / I. S. Edelman, D. A. Velikanov, A. V. Chernichenko et al. // Physica E. 2010. Vol. 42. P. 2301–2306.

#### Referens

1. Klark Dzh. *TIIEP*. 1989, vol. 77, № 8, pp. 118–137.
2. Gerashchenko O. A., Gordov A. N., Yeromina A. K. et al. *Temperaturnyye izmereniya: Spravochnik* (Temperature measurement: A Handbook). Kiev, Nauk. Dumka, 1989, 704 p.
3. Velikanov D. A. *Kriostat* (Cryostat). Patent RF № 2304745, publ. 20.08.2007, bull. № 23.
4. Clarke J., Goubau W. M., Ketchen M. B. Tunnel junction dc SQUID: fabrication, operation, and performance. *J. Low Temp. Phys*, 1976, vol. 25, № ½, pp. 99–144.
5. Wellstood F., Heiden C., Clarke J. Integrated dc SQUID magnetometer with a high slew rate. *Rev. Sci. Instrum*, 1984, vol. 55, № 6, pp. 952–957.
6. Drobina V. M., Lobotka P., Trofimov V. N. *Blok registratsii sverkhprovodyashchego kvantovogo magnitometra* (The detection of a superconducting quantum magnetometer). *PTE*, 1987, № 3, pp. 158–161.
7. Klimenko A. G. *Universalnyy SKVID-magnitometr dlya magnitnykh issledovaniy v slabyykh polyakh v diapazone temperatur 1,5–300 K* (Universal SQUID magnetometer for magnetic studies in weak fields in the temperature range 1.5–300 K). Preprint № 85-1, INKH SO AN SSSR, Novosibirsk, 1985, 42 p.
8. Velikanov D. A. *Magnitometr so sverkhprovodyashchim kvantovym interferometricheskim datchikom* (Magnetometer with a superconducting quantum interferometric sensor). Patent RF № 2246119, publ. 10.02.2005, bull. № 4.
9. Patrin G. S., Vaskovskiy V. O., Velikanov D. A., Svalov A. V. *Pis'ma v ZHETF*. 2002, vol. 75, № 3, pp. 188–190.
10. Petrakovskaya E. A., Isakova V. G., Velikanov D. A. et al. Magnetic Properties of PT and IR Nanoparticles. In the book «Nanomaterials: New Research Developments». New York: Nova Science Publishers. ISBN: 978-1-60456-300-9. 2009, pp. 21–36.
11. Edelman I. S., Velikanov D. A., Chernichenko A. V. et al. Magnetic and magneto-optical properties of Ni-Ge layered films. *Physica E*. 2010, vol. 42, pp. 2301–2306.

УДК 519.872 621.312

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ С МНОГОСЛОЙНЫМИ ОБМОТКАМИ\*

В. А. Горемыкин<sup>1</sup>, Е. С. Кинев<sup>2</sup>, Е. А. Головенко<sup>3</sup>, И. С. Гудков<sup>3</sup>, С. С. Бежитский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: virt38@mail.ru

<sup>2</sup>ООО «Резонанс»

Россия, 660042, Красноярск, просп. Свободный, 75. E-mail: evg0770@mail.ru

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 26. E-mail: golovenko\_ea@mail.ru

*Изложен один из подходов к селекции параметров конструкции и электропитанию индукционных нагревателей цветных металлов для выбора траектории многокритериальной оптимизации при конструировании. Проведены многовариантные поисковые расчеты оптимальных характеристик тепловых и электромагнитных полей в среде Ansys с учетом системы электропитания. Реализован алгоритм решения взаимосвязанной электротепловой задачи с учетом температурного состояния нагреваемой заготовки. Введено понятие пространства режимов индукционного нагревателя и определены закономерности влияния его конструктивных параметров на эффективность нагрева и режим работы источника питания.*

*Ключевые слова:* индукционный нагреватель, многослойная обмотка, электромагнитный режим, тепловой режим, параметрический синтез, численное моделирование, пространство режимов нагревателя.

## PARAMETRICAL SYNTHESIS OF OPTIMUM DESIGNS OF INDUCTION HEATERS WITH MULTILAYERED COILS

V. A. Goremykin<sup>1</sup>, E. S. Kinev<sup>2</sup>, E. A. Golovenko<sup>3</sup>, I. S. Gudkov<sup>3</sup>, S. S. Bezhitskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: virt38@mail.ru

<sup>2</sup>Company "Rezonans" Ltd.

75 Svobodnyi prosp., Krasnoyarsk, 660042, Russia. E-mail: evg0770@mail.ru

<sup>3</sup>Siberian Federal University

26 Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: golovenko\_ea@mail.ru

*One of the approaches to selection of design parameters and of non-ferrous metals induction heaters power supply parameters for a multicriteria optimization choice of a trajectory is considered while designing. Multiple search calculations of optimum characteristics of thermal and electromagnetic fields in the environment of Ansys Multiphysics taking into account a power supply system are carried out. The algorithm of the solution of the interconnected electro-thermal task taking into account a temperature condition of heated preparation is realized. The concept of the induction heater modes space is entered and regularities of influence of its design data on efficiency of heating and an operating mode of the power supply are defined.*

*Keywords:* induction heater, multilayered winding, electromagnetic mode, thermal mode, parametrical synthesis, numerical modeling, space of modes of the heater.

Индукционные нагреватели (ИН) сегодня являются неотъемлемой частью большинства технологических цепочек по термической обработке металлов. Возможности ИН позволяют осуществлять нагрев, закалку и отпуск металлических изделий с различными физико-химическими свойствами и абсолютно любыми геометрическими параметрами. Наиболее часто на производствах встречаются ИН для нагрева мерных цилиндрических заготовок или столбов (рис. 1). Такие устройства имеют один существенный недоста-

ток – низкую энергетическую эффективность. Главным образом эта проблема касается нагрева цветных металлов в силу высокой проводимости. Коэффициент полезного действия таких ИН зачастую не превышает 35–40 %.

При создании индукционных нагревателей для сквозного нагрева цветных металлов широко применяют многослойные обмотки, имеющие существенные достоинства перед однослойными [1].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».



Рис. 1. Индукционный нагреватель цилиндрических слитков

Но несмотря на простоту конструкции, при проектировании нагревателей возникает проблемы с определением основных геометрических размеров ИН и параметров индуктора. Поэтому задача создания качественной расчетной модели, является очень актуальной. При этом модель должна отвечать целому ряду требований, например, учет особенностей конструкции ИН и изменение электро и теплофизических свойств нагреваемых слитков. Существуют аналитические [2], полуаналитические [3] и численные [4] методы расчета, которые позволяют решить такую задачу с разной степенью точности. Численные методы наиболее предпочтительны, поскольку легко автоматизируемы, позволяют учесть много факторов и отследить нелинейности влияния конструктивных параметров и свойств на процесс нагрева.

Видимо поэтому практика конструирования ИН опирается, главным образом, на результаты численного моделирования и параметрический синтез конструкции. Применение современных технологических систем в расчетно-конструкторской практике позволяет совместить многочисленные, порой противоречивые и взаимоисключающие критерии, получая весьма сбалансированные решения. Вместе с тем в процессе разработки подобного высокотехнологичного оборудования есть ряд задач, для которых нет удобно совмещаемых программно-аппаратных средств и, соответственно, нет готовых решений [2]. Необходимо построение гибридных систем численного моделирования на основе мощных программных пакетов, таких, например, как ANSYS [2]. В первую очередь подобная гибридная структура должна описывать особенности работы многофазных систем электропитания сравнительно мощных индукционных нагревателей [3], которые работают в существенно несимметричном режиме.

Другой немаловажной проблемой является обеспечение возможности учета особенностей теплового режима, обмоток и заготовок при переборе параметров катушек и магнитопроводов индукционных нагревателей, в том числе для применения в линиях градиентного нагрева. Это делают в локальной расчетном модуле, который состоит из подсистем анализа электромагнитного и теплового поля (рис. 2).

Подсистема анализа электромагнитного поля позволяет решать квазистационарные задачи с возможностью параметрического изменения характеристик и свойств элементов модели. Так как в процессе нагрева электрофизические свойства загрузки меняются, в подсистеме есть можно учитывать влияние на значения удельного электрического сопротивления ( $P(T)$ ) и относительную магнитную проницаемости ( $m(T)$ ) температуры загрузки ( $T$ ).

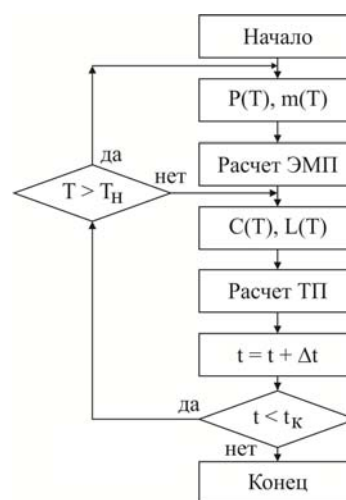


Рис. 2. Алгоритм

Подсистема анализа теплового поля решает нестационарную задачу теплопроводности на основании результатов расчета удельной тепловой мощности в первой подсистеме. Аналогично, как в первой подсистеме, заложена возможность учета влияния температуры на теплофизические свойства нагреваемого тела (теплоемкость ( $C(T)$ ) и теплопроводность ( $L(T)$ )).

В целом подсистемы взаимодействуют по следующему алгоритму. В первой подсистеме задают параметры элементов модели, их свойства. Решению подложит квазистационарная электромагнитная задача (при  $T_n = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), поскольку слишком велика разница электромагнитной и тепловой инерции. Формируется массив удельной тепловой мощности для каждого из элементов нагреваемого объекта. Запускается вторая

подсистема. Нагреваемому объекту присваиваются теплофизические свойства (при  $T_n = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Затем в элементах задаются внутренние источники тепловой энергии из сформированного в первой подсистеме массива. Решается одна итерация нестационарной тепловой задачи. Формируется массив значений температур для каждого из элементов и передается в первую и вторые подсистемы для уточнения электро- и теплофизических свойств. Алгоритм выполняется циклически с фиксированным приращением времени на каждой итерации ( $\Delta t$ ).

Реализация такого алгоритма позволяет в глобальной процедуре оптимизации электромагнитных режимов обеспечить возможность учета несимметрии по питанию в ходе нагрева и ввести процедуры ее коррекции с учетом динамики физических свойств [5]. В эту статью не включены результаты исследования совокупности температурных режимов индуктора, слишком велик объем материала. Полученным результатам будет посвящена отдельная публикация.

Изучение практики эксплуатации индукционного оборудования показало ряд характерных проблем и вопросов, которые следует изучить, и сформулировать еще на этапе математического моделирования [6], предваряя конструирование и производство. Как оказалось, весьма существенное влияние на технико-экономические характеристики ИН оказывает не только оптимальный выбор режимных параметров (плотность тока, частота), не только соотношение диаметров катушек и заготовок, но и соотношение аксиальных геометрических размеров индуктора и нагреваемых заготовок. Причем выбор оптимальной геометрии катушек целесообразно проводить при многовариантных расчетах, по возможности учитывая многоцелевое назначение индукционного оборудования. Например, один и тот же индуктор (секцию) могут использовать при построении гибких технологических систем нагрева как отдельных коротких слитков, так и столбов длиной 5–6 и более метров.

Сложность задач анализа и моделирования требует овладения вычислительными системами, детального изучения их организации и разработки алгоритмов взаимодействия с ними на этапе внедрения специфических расчетных модулей. В результате расчета, как правило, получают колоссальное количество численных данных, которые визуализируют и анализируют их соответствие результатам аналитических научных и инженерных расчетов. Затем приступают к проектированию устройства. Опыт показывает, что встроенные средства визуализации даже таких мощных систем, как ANSYS, не всегда в полной мере позволяют оценить свойства исследуемого объекта в многомерном пространстве его режимов. Поэтому задачу многокритериальной оптимизации индукционных нагревателей и итоговый анализ результатов следует рассматривать как можно более детально, применяя разнообразный сторонний инструментарий, создавая собственные подсистемы.

Задачу численного моделирования целесообразно рассматривать двухмерной осесимметричной, поскольку заготовка и индуктор ИН, симметричны относительно оси вращения. Кроме того, расчетную область в цилиндрической системе координат удобно свести 1/2 плоской модели с последующим интегрированием результатов по  $2\pi$ . Это существенно сокращает ресурсы. Эскиз расчетной модели электромагнитного поля ИН в осесимметричной постановке показан на рис. 3.

Область 1 – индуктор нагревателя, состоящий из двухходовых катушек  $K$ , намотанных из  $N$  слоев медного провода прямоугольного сечения ( $a \times b$ ). На проводниках располагают электроизоляцию (область 5). Внутри индуктора размещен цилиндрический слиток (область 2), поверх которого установлен непроводящий муфель (область 4). Далее расположен магнитопровод (область 3) и наружное воздушное пространство (область 6).

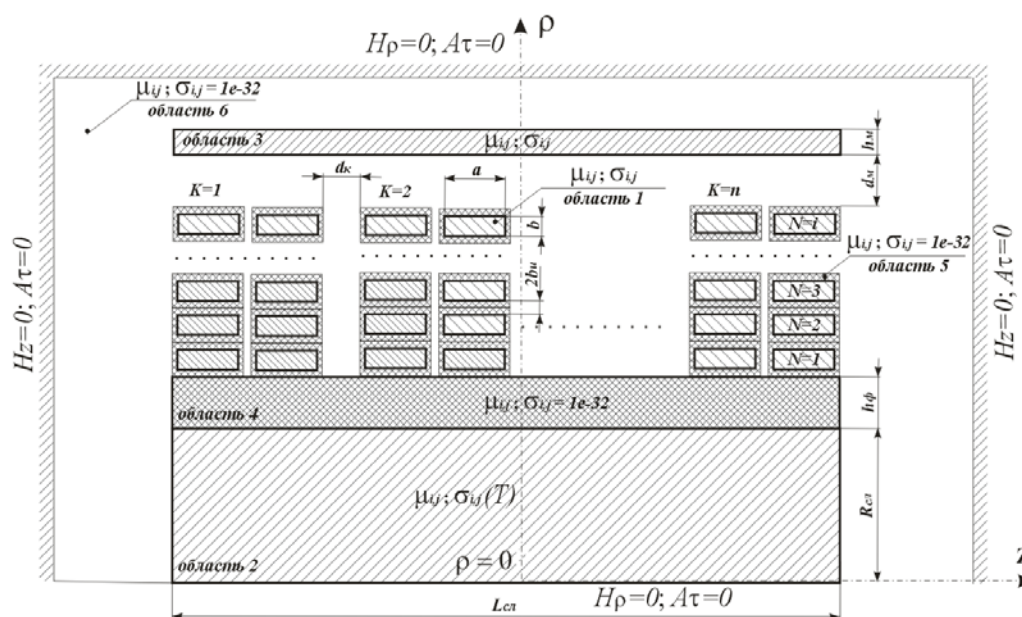


Рис. 3. Расчетная модель ЭМП

Физические свойства расчетных областей:

- область 1:  $\mu_{ij} = 1$  Гн/м,  $\sigma_{ij} = 5,56e + 7$  См/м;
- область 2:  $\mu_{ij} = 1$  Гн/м,  $\sigma_{ij} = f(T)$ ;
- область 3:  $\mu_{ij} = 300$  Гн/м,  $\sigma_{ij} = 1e + 6$  См/м;
- область 4, 5, 6:  $\mu_{ij} = 1$  Гн/м,  $\sigma_{ij} = 1e - 32$  См/м.

Основные допущения модели следующие:

1. Влияние каркаса и крепежных деталей конструкции не учитывают;
2. Влияние электрических выводов на внешнюю картину поля не учитывают;
3. Муфель изготовлен из нержавеющей стали не оказывает влияние на ЭМП;
4. Электрические проводимости и магнитные проницаемости областей 1, 3, 4, 5 и 6 анизотропны по всем координатам;
5. Насыщением магнитопровода (область 3) пренебрегают;
6. Полагают, что на расстоянии  $2R_{cl}$  от всех крайних элементов модели, ЭМП полностью затухает.

Расчетную модель (рис. 1) описывают с помощью уравнений Максвелла и уравнений неразрывности:

$$\begin{aligned} \text{rot} \bar{H} &= j + \frac{\partial \bar{D}}{\partial \tau}; & \text{rot} \bar{E} &= -\frac{\partial \bar{B}}{\partial \tau}; & \text{div} \bar{B} &= 0; \\ \text{div} \bar{E} &= 0; & \bar{j} &= \sigma \bar{E}; & \bar{H} &= \mu \bar{B}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\bar{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\bar{D}$  – вектор электрической индукции;  $\bar{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\bar{H}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $\bar{j}$  – плотность электрического тока проводимости;  $\tau$  – время;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость.

Для решения системы уравнений (1) вводят векторную величину, характеризующую распределение потенциалов магнитного поля. Это векторный магнитный потенциал ( $\bar{A}$ ). Вычисляя распределение  $\bar{A}$ , в расчетной области находят значения любой характеристики ЭМП. Связь с системой уравнений (1) следующая:

$$\bar{B} = \text{rot}(\bar{A}). \quad (2)$$

Применяя математический оператор  $\text{rot}$ , переходят к уравнению для квастационарного случая, описывающего расчетную модель в цилиндрической системе координат (рис. 3):

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r \cdot \mu_z} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - j\omega \frac{1}{\rho} A = -\bar{j}, \quad (3)$$

Уравнение (3) решают совместно с граничными условиями. На границах расчетной области нормальную составляющую вектора напряженности магнитного поля приравнивают к нулю:

$$\bar{H}_n = 0. \quad (4)$$

Касательные составляющие векторного магнитного потенциала считают нулевыми:

$$\bar{A}_\tau = 0. \quad (5)$$

Численную модель для анализа теплового поля и результаты расчетов формируют на базе уравнения Фурье аналогично, применяя средства программной среды.

Решения системы уравнений (3)–(5) выполняют методом конечных элементов в программном пакете ANSYS. Модель описана с помощью внутреннего языка программирования APDL. Для конечно-элементной аппроксимации использован восьмиузловой элемент PLANE53 с осесимметричной степенью свободы. Сеточное разбиение выполнено с использованием триангулированной сетки. Предусмотрена возможность автоматического варьирования геометрических и энергетических параметров расчетной модели, построен соответствующий алгоритм. Исследования проведены многовариантно в разных диапазонах, что дает возможность осуществлять параметрический синтез конструкции с учетом режима питания ИН.

Для оценки влияния совокупности параметров в процессе параметрического синтеза дополнительно разработаны специализированные подпрограммы для определения параметров схемы замещения ИН на основании результатов расчета характеристик электромагнитного поля. Реализован подход к вычислениям через определение активных и реактивных мощностей в соответствующих областях модели:

$$P = \sum_{i=1}^n P_{дж}^i \cdot V^i, \quad (6)$$

где  $P_{дж}^i$  – тепловая мощность в  $i$ -м элементе, Вт/м<sup>3</sup>;  $V^i$  – объем  $i$ -го элемента, м<sup>3</sup>.

$$Q = \sum_{i=1}^n 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{B_{re}^i{}^2 + B_{im}^i{}^2} \cdot \sqrt{H_{re}^i{}^2 + H_{im}^i{}^2} \cdot V^i. \quad (7)$$

На основании определения интегральных показателей, согласно выражениям (6) и (7), для соответствующих областей определено значение входного напряжения ИН ( $U_u$ ), которое выражают из системы уравнений (8):

$$\left\{ \begin{aligned} I_1 - I_2 - I_0 &= 0 \\ \dot{U}_1 + \frac{\dot{Q}_0}{I_0} &= \dot{U}_u \\ \frac{\dot{P}_2}{I_2} + \frac{\dot{Q}_s}{I_2} + \frac{\dot{Q}_2}{I_2} + \dot{U}_1 &= \dot{U}_u \end{aligned} \right., \quad (8)$$

где  $I_1$  – приведенный ток индуктора, А;  $I_2$  – приведенный ток заготовки, А;  $U_1$  – напряжение на обмотке индуктора.

Таким образом, разработанная численная модель позволяет не только получать дифференциальные картины ЭМП и проводить их анализ, но и выполнять расчет интегральных характеристик и параметров схемы замещения. Учитывая значительный объем полученной в ходе расчета информации, для ее анализа потребовалось применить обобщение и представление



в виде взаимосвязанных групп режимных параметров. Для этого было введено понятие «пространство режимов» (ПР) индукционного нагревателя, в котором зависимости отражены в виде криволинейных поверхностей. Под ПР понимают многомерное пространство, взаимосвязанных и взаимнообуславливающих физически реализуемых режимных интегральных характеристик разрабатываемого изделия в установившемся состоянии.

Следует заметить, что режим индукционного нагрева массивных заготовок оценивают во времени от 30 до 180 с. Его описание получают в виде совокупности картин установившихся тепловых и электромагнитных режимов при сравнительно медленном изменении электрофизических параметров. В силу этого обстоятельства понятие ПР трактуют как «пространство установившихся режимов», и фактора времени в нем фактически нет. Это принципиально отличает понятие ПР от понятия «пространство состояний». Причем нужно заметить, что именно понятие ПР имеет больше практической ценности для разработчиков и проектировщиков оборудования, поскольку показывает состояние устройства при совокупном влиянии нескольких режимных характеристик.

При анализе результатов вначале следует обратиться к полученным поверхностям коэффициента полезного действия и коэффициента мощности индукционного нагревателя, связанными друг с другом в пространстве регулирования частоты источника и аксиального зазора между индуктирующими катушками. Характерные зависимости при изменении частоты питающего источника показаны на рис. 4–9. Закономерности поведения энергетических характеристик в целом подтверждаются.

В качестве опорной выбрана координата КПД индуктора и построены рабочие поверхности в зависимости от частоты источника питания и зазора между индуктирующими катушками (рис. 4). КПД во всех режимах не превышает 60 % и имеет низкодобротный максимум 59,8 % при частоте  $f = 50$  Гц и расстоянии  $d_k$  между катушками около 15 мм.

Закономерность монотонного ухудшения коэффициента мощности при увеличении частоты питающего источника (рис. 5) при всех значениях геометрических расстояний между индуктирующими катушками также вполне оправдана практически.

Пространственный характер соотношения мощностей показан на рис. 6, 7.

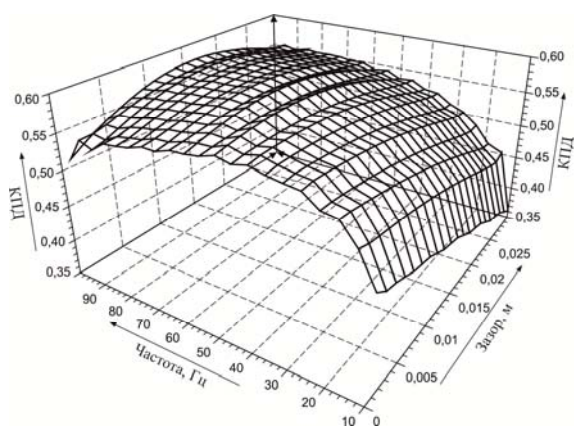


Рис. 4. Зависимость КПД индуктора от зазора между катушками и частоты

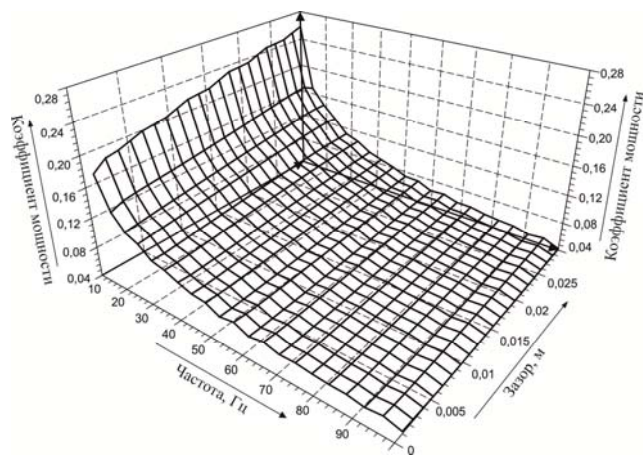


Рис. 5. Зависимость коэффициента мощности от зазора между катушками и частоты

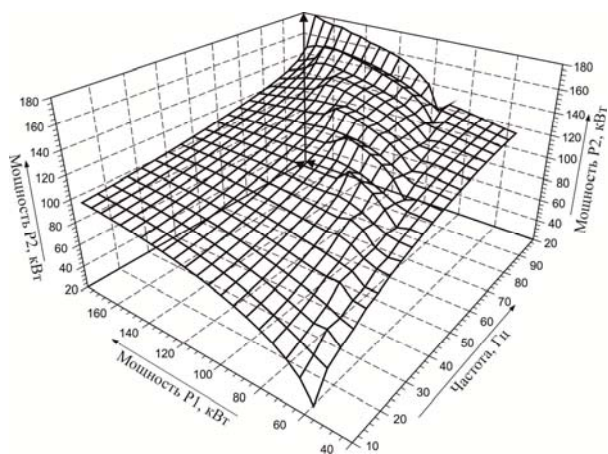


Рис. 6. Зависимость активной мощности в нагрузке от мощности индуктора и частоты

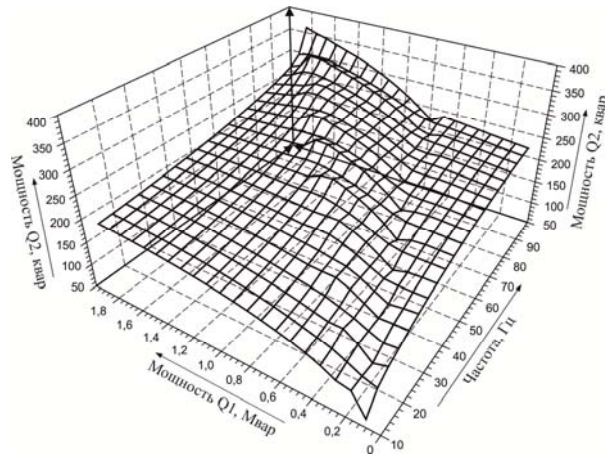


Рис. 7. Зависимость реактивной мощности в нагрузке от мощности индуктора и частоты

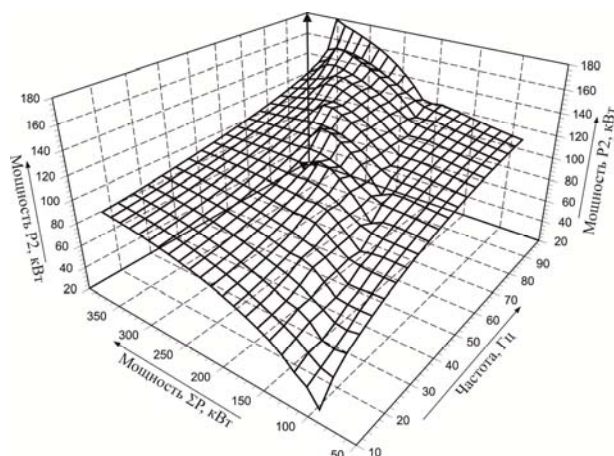


Рис. 8. Зависимость активной мощности в нагрузке от суммарной активной мощности и частоты

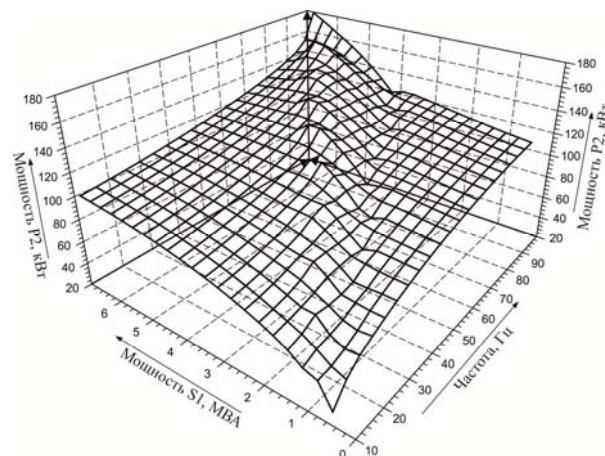


Рис. 9. Зависимость активной мощности в нагрузке от полной мощности индуктора и частоты

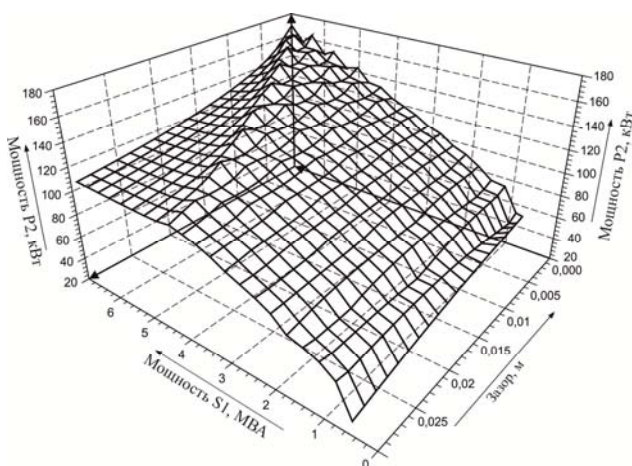


Рис. 10. Зависимость активной мощности в нагрузке от полной мощности индуктора и зазора

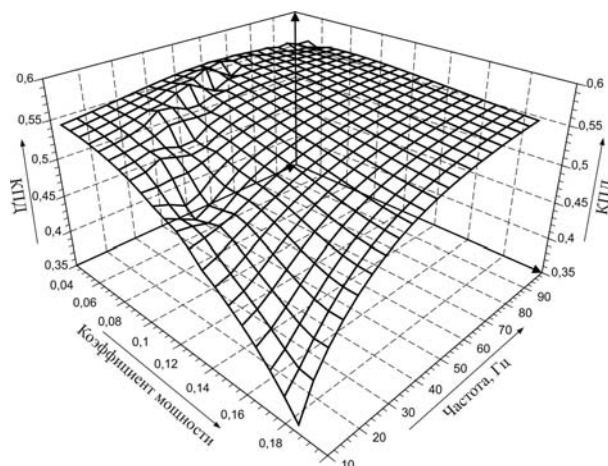


Рис. 11. Зависимость КПД нагрева от коэффициента активной мощности и частоты

Зависимость между выделенной в заготовке мощностью  $P_2$  и активной мощностью в обмотке индуктора  $P_1$  отражена поверхностью режимных параметров (рис. 6). Монотонный характер соотношения мощностей сохраняется при частотах 50–70 Гц. Причем циклический перебор значений зазора между двухрядными индуктирующими катушками при значениях  $d_k$  меньше 10 мм приводит к определению координат характеристик с повышенными значениями полезной мощности  $P_2$ . Однако резко нарушает характер поведения КПД. При понижении частоты менее 30 Герц и увеличении зазора более 20 мм наблюдается явное снижение полезной мощности в нагрузке.

Похожим образом ведет себя реактивная мощность (рис. 7). Причем существенное увеличение реактивной мощности требует применения эффективных компенсирующих устройств, в качестве которых традиционно используют батареи конденсаторов и настройку в режим, близкий резонансу токов.

Изменение доли активной мощности в нагрузке в суммарной активной мощности потребления  $P_2 = F(\Sigma P, f)$  при регулировании частоты источника показано на рис. 8. Соотношение между активной мощностью в нагрузке и полной потребляемой мощностью уст-

ройства  $P_2 = F(S_1, f)$  при изменении частоты источника питания показывает поверхность, приведенную на рис. 9. Характер поверхностей в целом одинаков.

Полученные соотношения для полезной мощности  $P_2$  в нагрузке, отраженные поверхностями  $P_2 = F(\Sigma P, f)$  и  $P_2 = F(S_1, f)$  режимных параметров, показывают, что как при повышении рабочей частоты, так и увеличении габаритов устройств пропорциональность нарушается. Причем существенный рост реактивной мощности (рис. 9) не вызывает пропорционального увеличения полезной мощности, и большей эффективности добиться не удастся. Аналогичное соотношение полезной мощности в нагрузке и изменению активной мощности с учетом потерь показано на рис. 8.

Второй блок информационных массивов можно условно сгруппировать по признакам оценки режимных параметров в зависимости от аксиального зазора. Характерные криволинейные поверхности показаны на рис. 10, 11. Поверхность моделирования активной мощности в нагрузке  $P_2 = F(S_1, d_k)$ , в зависимости от значений полной мощности при изменении частоты источника показана на рис. 10. При всех значениях зазора между катушками наблюдается явный максимум в соотношении полезной и полной мощности



устройства. Видимо, в этой области и следует искать практически реализуемые параметры установки. Причем добротность этого максимума имеет тенденцию к снижению с увеличением зазора.

Портрет поверхности КПД в пространстве режимов  $\eta = F(\cos \varphi, d_k)$  при варьировании расстояния между катушками и регулировании частоты показан на рис. 11, по которому легко оценить режимное соотношение КПД и коэффициента мощности.

Приемлемо-близкие к максимуму значения КПД исследуемой системы обеспечиваются при значениях коэффициента мощности в диапазоне 0,08–0,14 на частотах питающего напряжения от 50 до 70 Гц. Причем провалы на поверхности режимных параметров зафиксированы при крайних (малых) значениях зазоров  $d_k$  между катушками в циклическом итерационном переборе их значений внутри оптимизационного алгоритма.

При крайних значениях интервалов регулирования расстояния между катушками в совокупности с особенностями генетического алгоритма оптимизации дают некоторые паразитные решения, определяющие провалы на поверхности оптимальных параметров режима устройства. Однако общий монотонный характер полученной поверхности и наличие устойчивого решения вблизи практически достигнутых величин КПД и  $\cos \varphi$  позволяет с некоторой уверенностью предположить, что результаты моделирования в целом адекватно отражают действительность. Удовлетворительно совпадающие результаты получены в физическом эксперименте на сериях индукционных нагревателей, исследованных в цеховых условиях.

Кроме представленных здесь материалов, получены семейства поверхностей для других изменяемых параметров. Исследованы зависимости интегральных и дифференциальных характеристик от соотношения диаметров индуктирующих катушек и слитков. Полезными для выбора конструкции нагревателя оказались исследования пространства режимов при приближении и удалении магнитопроводов. Оценка влияния всех факторов позволяет сформулировать некоторые рекомендации для выигрыша дополнительных 3–5 % КПД, при оптимальном сочетании конструктивных параметров.

В целом полученные при математическом моделировании характеристики дают исчерпывающее представление об особенностях поведения эксплуатационных параметров индукционного нагревателя в пространстве установившихся режимов.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Применение гибридных систем на базе современных средств математического моделирования позволяет исследовать совокупность характеристик разрабатываемого оборудования в многомерном пространстве его режимов, детально изучая влияние разных факторов на эксплуатационные характеристики.

2. Предпочтительно выбирать совокупность таких параметров и режимов, которые соответствуют окрестностям низкодобротных экстремумов. Это обусловлено возможностью хорошего повторения рассчитанных режимов на практике. Наличие технологических

погрешностей, возникающих при производстве оборудования, меняет его характеристики.

3. Использование полученных результатов математического моделирования для конструирования индукционных нагревателей целесообразно оценивать, глядя на них сквозь призму технологических особенностей производственной базы.

### Библиографические ссылки

1. Энергоэффективный индукционный нагрев алюминиевых заготовок перед прессованием / В. С. Немков, В. Б. Демидович, И. И. Растворова и др. // Индукционный нагрев. 2012. № 21. С. 10–15.
2. Nemkov V., Goldstein R. Design Principles for Induction Heating and Hardening in Handbook of Metallurgical Process Design // Marcel Dekker. 2004. P. 591–641.
3. Луи С., Немков В. С. Аналитический расчет цилиндрических индукционных систем // Электричество. 1978. № 6. С. 43–47.
4. Курбатов П. А., Аринчин С. А. Численный расчет электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Параметрическая оптимизация многофазных индукционных систем / Е. С. Кинев, Е. А. Головенко, В. В. Ковальский и др. // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2009. Т. 5, № 12. С. 35–40.
6. Кинев Е. С., Головенко Е. А., Кузнецов Е. В. Математическое моделирование нагрева алюминиевых цилиндрических слитков в индукционном нагревателе методического действия // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Математическое моделирование электромеханических процессов: межвуз. сб. науч. тр. Ульяновск: УлГТУ, 2006. С. 29–38.

### References

1. Nekmov V. S., Demidovich V. B., Rastvorova I. I., Chimilenko F. V., Sitko P. A. *Indukcionniy nagrev*. 2012, № 21, pp. 10–15.
2. Nemkov V., Goldstein R. Design Principles for Induction Heating and Hardening in Handbook of Metallurgical Process Design. Marcel Dekker. 2004. P. 591–641.
3. S. Lupi V. S. Nemkov. *Elektrichestvo*. 1978, № 6, pp. 43–47.
4. Kurbatov P. A., Arinchin S. A. *Chislenniy raschet elektromagnitnih polei*. (The numerical calculation of electromagnetic fields). Moscow, Energoatomizdat, 1984, 168 p.
5. Kinev E. S., Golovenko E. A., Kovalsky V. V. et al. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009, vol. 5, № 12, pp. 35–40.
6. Kinev E. S., Golovenko E. A., Kuznetsov E. V. Mathematical modeling of heating aluminum billets in induction heater methodical action [Matematicheskoe modelirovanie nagreva aluminevig slitkov v indukcionnom nagrevatele metodicheskogo deistviy]. *Voprosi teorii i projektirovaniy elektricheskikh mashin. Matematicheskoe modelirovanie elektromekhanicheskikh proccesov. Sbornik nauchnih trudov* (Theory and design of electrical machines. Mathematical modeling of electromechanical processes. Interuniversity. Sat Scientific. tr.). Ulyanovsk, UIGTU, 2006, pp. 29–38.

© Горемыкин В. А., Кинев Е. С., Головенко Е. А., Гудков И. С., Бежитский С. С., 2013



**УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТЕПЛОТДАЧИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА\***

А. А. Зуев, М. И. Толстомятов, Д. А. Жуиков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: dla2011@inbox.ru

*Цель работы – разработка установки, позволяющей проводить экспериментальные исследования процессов вынужденного конвективного теплообмена, а именно: определение средних по поверхности коэффициентов теплоотдачи при реализации вращательного течения рабочего тела. В работе обозначены особенности протекающих процессов и требования к экспериментальной установке. Результаты работы позволят проводить экспериментальные исследования теплоотдачи вращательных течений на различных режимах течения рабочего тела и экспериментально определять коэффициенты теплоотдачи при ламинарном и турбулентном режимах обтекания. В результате проведенной работы спроектирован теплообменный аппарат круглой формы, состоящий из двух полостей объединенных теплопроводящей стенкой.*

*Ключевые слова: турбулентное течение, экспериментальное исследование, коэффициент теплоотдачи, теплообменный аппарат.*

**INSTALLATION FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF CONVECTIVE HEAT  
OF THE ROTATIONAL GAS FLOW**

A. A. Zuev, M. I. Tolstoplyatov, D. A. Zhuikov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: dla2011@inbox.ru

*The purpose of the article is to develop such an installation which will allow to perform the experimental investigations of forced convective heat transfer, namely the definition of average surface heat transfer coefficients in the implementation of rotational flow of the working fluid. In the article the authors point out the features of the processes and requirements for the experimental installation. The scientific results will allow to perform experimental investigations of heat transfer rotational flows at different flow modes the working fluid and determine coefficient of convective heat transfer in laminar and turbulent flow modes. As a result of the work, the circular heat exchanger was designed. It consists of two cavities of the combined heat-conducting wall.*

*Keywords: turbulent flow, experimental research, the coefficient of convective heat transfer, heat exchanger.*

Вращательные или закрученные потоки часто встречаются в энергетических установках различного назначения. Широкая классификация закрученных потоков встречается в энергетических установках летательных аппаратов, это обусловлено интенсивностью протекающих динамических и тепловых процессов. Закрутка потока используется для интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Первым теплообменным аппаратом, разработанным НПО Энергомаш для ЖРД, можно считать кожухотрубчатый теплообменный аппарат, созданный в 1954–1957 гг. для многокамерного кислородно-керосинового двигателя РД107. На базе двигателя РД107 было разработано более 10 модификаций, что говорит о его долговечности

по сравнению с другими двигателями, и он продолжает активно использоваться по сегодняшний день [1]. Теплообменные аппараты в ЖРД служат для нагрева и испарения одного из компонентов топлива, который затем используется для наддува баков ракеты-носителя. Среди современных двигателей, применяющих теплообменные аппараты, следует отметить РД171, РД170 и РД180 [2]. Семейство этих двигателей работает по схеме с дожиганием газогенераторного газа, и использует теплообменный аппарат цилиндрического типа. Вращательное течение также характерно: для подводящих и отводящих устройств газовых турбин и насосов; полостей между ротором и статором турбин; торцевых щелей между диском и корпусом осевого насоса; полости гидродинамических уплотнений.

\*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1584.

Гидродинамика вращательных течений в различных граничных условиях подробно изучена в работе [3], и подтверждена экспериментальными исследованиями [4], однако в этих работах не затронуты вопросы расчета конвективного теплообмена. На основе подхода, изложенного в работе [5], записаны основные уравнения алгоритма для моделирования потенциального вращательного течения газа с учетом конвективного теплообмена, куда входят:

1. Уравнение константы  $C_U$  определения окружной составляющей скорости ядра потока:

$$\frac{dC_U}{dR} = -\frac{2\pi\tau_\alpha R^2}{\rho\dot{V}}; \quad (1)$$

2. Уравнение определения изменения статического давления:

$$\frac{dp}{dR} = \rho\omega_\alpha^2 R + \frac{\rho\dot{V}^2}{4\pi^2 z^2 R^3} + \frac{\mp 2\tau_\alpha - 2\tau_p}{z}; \quad (2)$$

3. Уравнение энергии:

$$h = Cp(T + 273) + \frac{C^2}{2} - \frac{Q}{\dot{m}} + \frac{N}{\dot{m}}; \quad (3)$$

4. Уравнение теплового потока:

$$dQ = kFdT, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи; здесь

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_l}} \quad (5)$$

5. Уравнение состояния:

$$pv = RT. \quad (6)$$

Отметим, что в систему уравнений входят два уравнения движения рабочего тела для потенциального вращательного течения (1) и (2), уравнение энергии (3) и вся система замыкается уравнением состояния рабочего тела (6). Для решения уравнения энергии необходимо решить уравнение теплового потока (4) и определить диссипацию энергии. Для достоверного моделирования вращательных течений с учетом конвективного теплообмена необходимо определять ко-

эффициент теплоотдачи для вращательных потенциальных течений, входящих в выражение для определения коэффициента теплопередачи (5). В работах [6; 7] подробно рассмотрена теория расчета вращательных течений газов, приведены зависимости для оценки локальных коэффициентов теплоотдачи при турбулентном и ламинарном режимах течения как вращательных, так и прямолинейных потоков.

Для верификации полученных теоретических зависимостей и проведения экспериментальных исследований вращательного потенциального потока, с учетом теплоотдачи, разработана экспериментальная установка (рис. 1).

Экспериментальная установка представляет собой теплообменный аппарат круглой формы с тангенциальным подводом рабочего тела (воздуха), и имеет две полости для течения рабочего тела и охлаждающей жидкости, разделенных теплопроводящей стенкой. Полость II – полость течения рабочего тела, полость I – полость течения охлаждающей жидкости. Форма круга дает большее значение площади теплообмена при заданном периметре.

Для обеспечения закрутки и вращательного движения газового потока в полости II (рис. 2), используется тангенциальный подвод рабочего тела. В полости II реализуется вращательное потенциальное течение, распределение окружной составляющей скорости рабочего тела по радиусу описывается выражением  $UR = C = \text{const}$  (рис. 2).

В полость II через коллектор осуществляется кольцевой подвод охлаждающей жидкости, отвод через центр. Для обеспечения прямолинейного равномерного течения охлаждающей жидкости в полости установлены четыре перегородки (рис. 3). Рабочие параметры: массовый расход рабочего тела и охлаждающей жидкости, температуры на входе и выходе из теплообменного аппарата контролируются контрольно-измерительным оборудованием экспериментального стенда. Для упрощения дальнейшей обработки экспериментальных данных массовый расход охлаждающей жидкости рассчитан таким образом, чтобы реализующиеся течение охлаждающей жидкости по всей длине полости I имело ламинарный режим.

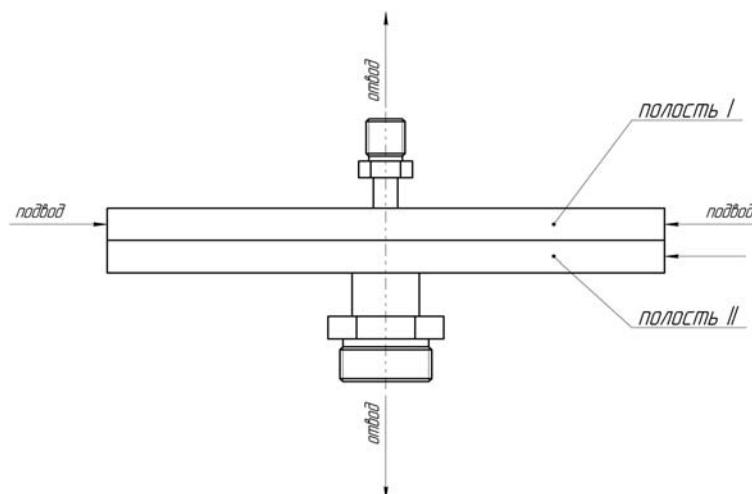


Рис. 1. Принципиальная схема установки

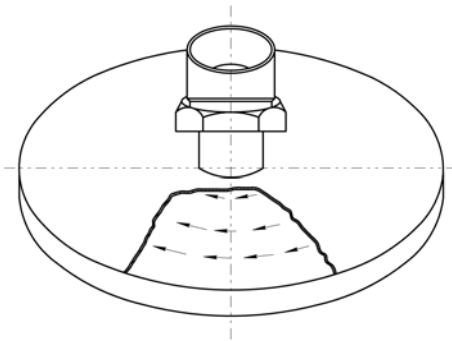


Рис. 2. Схема течения рабочего тела в полости II

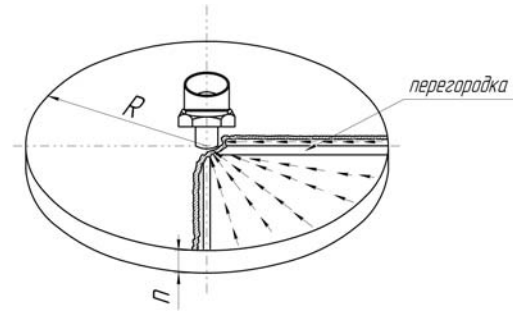


Рис. 3. Схема течения охлаждающей жидкости в полости I

Задача экспериментального исследования состоит в определении среднего по поверхности теплообмена коэффициента теплоотдачи рабочего тела, с учетом реализации в исследуемой полости потенциального вращательного течения, при известной поверхности теплообмена и материала теплопроводящей стенки. Локальный и средний коэффициенты теплоотдачи от теплопроводящей стенки к воде при постоянном тепловом потоке определяют по выражению [8]

$$Nu_x = 0,46 \cdot Re_x^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

$$\overline{Nu} = 0,69 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{st}} \right)^{0,25} \quad (8)$$

где  $x$  – продольная координата, в данном случае  $x = r$  – текущий радиус теплопроводящей стенки;  $Pr_{st}$  – критерий Прандтля для охлаждающей жидкости при температуре стенки. Выражения (7) и (8) используются при продольном обтекании пластины ламинарным потоком жидкости.

Основной сложностью при определении среднего коэффициента теплоотдачи рабочего тела к стенке теплообменного аппарата является достоверный расчет коэффициента теплоотдачи от стенки к охлаждающей жидкости. Данная сложность обусловлена круглой формой теплообменного аппарата. Массовый расход охлаждающей жидкости постоянен, а площадь проходного сечения полости изменяется с радиусом, за счет этого фактора происходит увеличение скорости потока и числа Рейнольдса.

Использование теплообменника в качестве установки при проведении экспериментальных исследований позволяет исключить измерение температуры теплопроводящей стенки, что существенно упрощает проведение эксперимента и обработку экспериментальных данных. Для контроля теплового баланса в экспериментальном участке за счет контрольно-измерительного оборудования экспериментально стенда производится замер температур рабочего тела и охлаждающей жидкости на входе и выходе. Количество тепла, переданного от рабочего тела в экспериментальной установке, находят по выражению

$$Q_g = \dot{m}_g \cdot C_{p_g} \cdot (T_{g1} - T_{g2}).$$

Для контроля теплового баланса определяется количество тепла, полученного охлаждающей жидкостью:

$$Q_l = \dot{m}_l \cdot C_{p_l} \cdot (T_{l2} - T_{l1}),$$

где  $C_{p_l}$  и  $C_{p_g}$  – среднее значение теплоемкостей охлаждающей жидкости и рабочего тела;  $\dot{m}_l$  и  $\dot{m}_g$  – массовые расходы, с. Причем должно выполняться равенство:

$$Q_g \geq Q_l.$$

Невыполнение равенства может говорить о неверно проведенном замере показаний при проведении эксперимента, либо о выходе из строя одного или нескольких компонентов системы контрольно-измерительного оборудования. Относительно компактные размеры установки позволяют использовать теплоизоляцию при проведении исследований, и свести утечки тепла в окружающую среду к минимальным значениям.

В результате проведенной работы спроектирована установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования вращательных потенциальных течений на различных режимах течения рабочего тела. Проведение исследований позволит провести сравнительный анализ полученных теоретических зависимостей и экспериментально определенных средних по поверхности теплообмена коэффициентов теплоотдачи рабочего тела. Основные геометрические размеры установки приведены в таблице:

|                                                   |          |                                   |
|---------------------------------------------------|----------|-----------------------------------|
| Радиус полостей I и II                            | $R$      | 100 мм                            |
| Ширина полостей I и II                            | $n$      | 8 мм                              |
| Диаметр штуцера подвода рабочего тела             | $d_1$    | 4 мм                              |
| Диаметр штуцера отвода рабочего тела              | $d_2$    | 40 мм                             |
| Максимальная площадь проходного сечения полости I | $f_1$    | $5,024 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ |
| Минимальная площадь проходного сечения полости I  | $f_2$    | $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$   |
| Толщина теплопроводящей стенки                    | $\delta$ | 1 мм                              |
| Площадь поверхности теплообмена                   | $S$      | $0,628 \text{ м}^2$               |

#### Библиографические ссылки

1. Громыко М. Б., Ключева О. Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Ч. 1. Кожухотрубчатый испаритель азота

двигателя РД107 // Тр. XXIV / под ред. акад. РАН Б. И. Каторгина. М. : НПО Энергомаш, 2006.

2. Ключева О. Г. Совершенствование теплообменников для наддува баков ракеты-носителя. Ч. 2. Цилиндрический теплообменник двигателя РД171 // Тр. XXIV / под ред. акад. РАН Б. И. Каторгина. М. : НПО Энергомаш, 2006.

3. Кишкин А. А., Краев М. В., Жуйков Д. А. Течение несжимаемой вязкой жидкости в зазоре конической щели между вращающимся диском и неподвижной стенкой // Известия вузов. 2002. № 3. С. 76–80. (Сер. Авиационная техника.)

4. Экспериментальные исследования течения несжимаемой жидкости вязкой жидкости в торцевой щели между вращающимся диском и неподвижной стенкой / Д. А. Жуйков, В. О. Фальков, А. А. Кишкин и др. // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 5 (45). С. 123–126.

5. Течение с теплоотдачей в полостях вращения энергетических установок космических и летательных аппаратов / А. А. Зуев, А. А. Кишкин, Д. А. Жуйков, М. И. Толстомятов // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 7 (40). С. 63–68.

6. Теплоотдача вращательных течений в турбомашинах на основе двухслойной модели турбулентного пограничного слоя / А. А. Зуев, А. А. Кишкин, М. И. Толстомятов, Д. А. Жуйков // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 5 (45). С. 127–129.

7. Прямолинейное равномерное течение газов с теплоотдачей в энергетических установках летательных аппаратов / М. И. Толстомятов, А. А. Зуев, А. А. Кишкин и др. // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 4 (44). С. 134–138.

8. Теплотехнический справочник / под ред. В. Н. Юренина, П. Д. Лебедева. М. : Энергия, 1976. Т. 2.

## References

1. Gromyko M. B., Klyueva O. G. *Trudy XXIV*. Moscow, NPO Energomash, 2006, pp. 246–255.

2. Klyueva O. G. *Trudy XXIV*. Moscow, NPO Energomash, 2006, pp. 256–271.

3. Kishkin A. A., Kraev M. V., Zhuikov D. A. *Izvestiya vuzov, serya Aviacionnaya tekhnika*. 2002, № 3, pp. 76–80.

4. Zhuikov D. A., Falkov V. O., Kishkin A. A., Zuev A. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 5(45), pp. 123–126.

5. A.A. Zuev, A.A. Kishkin, D.A. Zhuikov, M.I. Tolstopyatov. *Vestnik SibGAU* 2011, № 7 (40), pp 63–66

6. Zuev A. A., Kishkin A. A., Tolstopyatov M. I., Zhuikov D. A. *Vestnik SibGAU*, 2012, № 5 (45), pp. 127–129.

7. Tolstopyatov M. I., Zuev A. A., Kishkin A. A., Zhuikov D. A., Nazarov V. P. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 4 (44), pp. 134–138.

8. *Teplotekhnicheskii spravochnik* (Heat Engineering handbook). Moscow, Energy, 1976, Vol. 2, 896 p.

© Зуев А. А., Толстомятов М. И., Жуйков Д. А., 2013

УДК 004.896(06)

## АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ В ПЕЧАХ ВАНЮКОВА

Е. В. Костин

Норильский индустриальный институт  
Россия, 663310, Норильск, ул. 50 лет Октября, 7. E-mail: kostinev87@gmail.com

*Представлен подход построения алгоритмического обеспечения сложной технологической системы на примере процесса плавки в печах Ванюкова. Предложен способ управления качеством конечных продуктов посредством комбинированного использования нейросетевых моделей процесса и модификации алгоритма динамического программирования Беллмана.*

*Ключевые слова: печь Ванюкова, самоорганизующаяся сеть Кохонена, нейросетевая модель, динамическое программирование Беллмана.*

## ALGORITHMIC SUPPORT OF PRODUCTS QUALITY CONTROL IN MELTING FURNACES OF VANUKOV

E. V. Kostin

Norilsk Industrial Institute  
7 50 years of October st., Norilsk, 663310, Russia. E-mail: kostinev87@gmail.com

*This paper presents an approach to the construction of algorithmic support of complex technological systems on the example of the melting furnaces of Vanukov. The author offers a method for controlling the quality of final products through the combined use of neural network models of the process and modification of the dynamic programming algorithm of Bellman.*

*Keywords: furnace of Vanukov, Kohonen self-organizing network, neural network model, dynamic programming Bellman.*

В настоящее время широко распространена задача разработки алгоритмического обеспечения управления сложными технологическими системами (СТС). Современный подход чаще всего использует мульти-модельности на всех стадиях: предварительной обработки методами фильтрации и сглаживания, моделирования путем создания искусственных нейронных сетей и управления с применением методов нечетких множеств [1].

Пирометаллургические процессы справедливо относят к СТС, поскольку они обладают всеми их качествами: существенной неопределенностью, многопараметричностью, сложными взаимосвязями между отдельными переменными и т. д. [2].

Процесс Ванюкова, реализуемый в печи Ванюкова на Медном заводе «ГМК «Норильский никель», предназначен для переработки сульфидного медно-никелевого сырья и получения штейнов с высоким 55–60 % содержанием меди [3]. Однако в условиях существенной неопределенности информации решить поставленную задачу оператор может не всегда [2]. Поэтому задачу управления процессом Ванюкова решают с помощью автоматизации, предполагающей использование различного алгоритмического обеспечения.

В настоящей работе описана методика разработки нейросетевой модели процесса Ванюкова и синтеза системы управления, основанной на модификации алгоритма динамического программирования и принципе оптимальности Беллмана [4].

*Нейросетевое моделирование процесса Ванюкова.* В момент времени  $t$  процесс Ванюкова характеризуется множеством контролируемых  $\mathbf{M}(t) = \{a_1(t), \dots, a_n(t), b_1(t), \dots, b_m(t)\}$ , и неконтролируемых  $\mathbf{Z}(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_r(t)\}$  факторов, где  $a_i(t)$ ,  $b_j(t)$ ,  $i = 1 \dots n$  – входные и  $j = 1 \dots m$  – выходные значения соответственно. Объединив множества  $\mathbf{M}(t)$  по вектору времени  $\mathbf{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  с дискретностью 120 мин (взятие проб штейна на химанализ), получим матрицу исторических данных  $\mathbf{D}_M$  размера  $(n+m) \times k$ . Количество

временных отсчетов  $k$  выбирается не более месяца, поскольку с течением времени может изменяться вид и состав перерабатываемого сырья.

Аппроксимация исторических данных осуществляется посредством самоорганизующейся нейронной сети Кохонена [5; 6]. Она относится к классу самонастраивающихся искусственных нейронных сетей для решения задачи классификации и разделения исходных данных на группы (классы) по мере их близости друг к другу. Структурная схема модели управления процессом представлена на рис. 1.

Процесс настройки нейронной сети Кохонена включает следующие этапы [5; 6]:

1. Из матрицы исторических данных  $\mathbf{D}_M$  последовательно выбирается множество входных и выходных факторов  $\mathbf{M}(t_1)$ ,  $\mathbf{M}(t_2)$ , ...,  $\mathbf{M}(t_k)$ .

2. Для настройки сети входной вектор должен быть безразмерным, поэтому выбранное множество подвергается нормализации, которая осуществляется путем наложения на шкалу [0, 1] по выражению

$$x_i = \frac{a_i - a_i^{\min}}{a_i^{\max} - a_i^{\min}},$$

где  $x_i$  –  $i$ -й фактор из множества нормализованных входных и выходных параметров  $\mathbf{X}(t) = \{x_1(t), \dots, x_n(t), y_1(t), \dots, y_m(t)\}$ .

3. Для каждого нейрона сети Кохонена рассчитывается Евклидово расстояние [5] между входными факторами и соответствующими весовыми коэффициентами нейрона:

$$d_j(\mathbf{X}(t)) = \sum_{i=1}^n (x_i(t) - w_{i,j})^2,$$

где  $j$  – номер нейрона сети Кохонена,  $w_{i,j}$  – весовой коэффициент между  $i$ -м входным фактором и  $j$ -м нейроном.

4. Нейрон, обладающий минимальным Евклидовым расстоянием, помечается как нейрон «победитель».

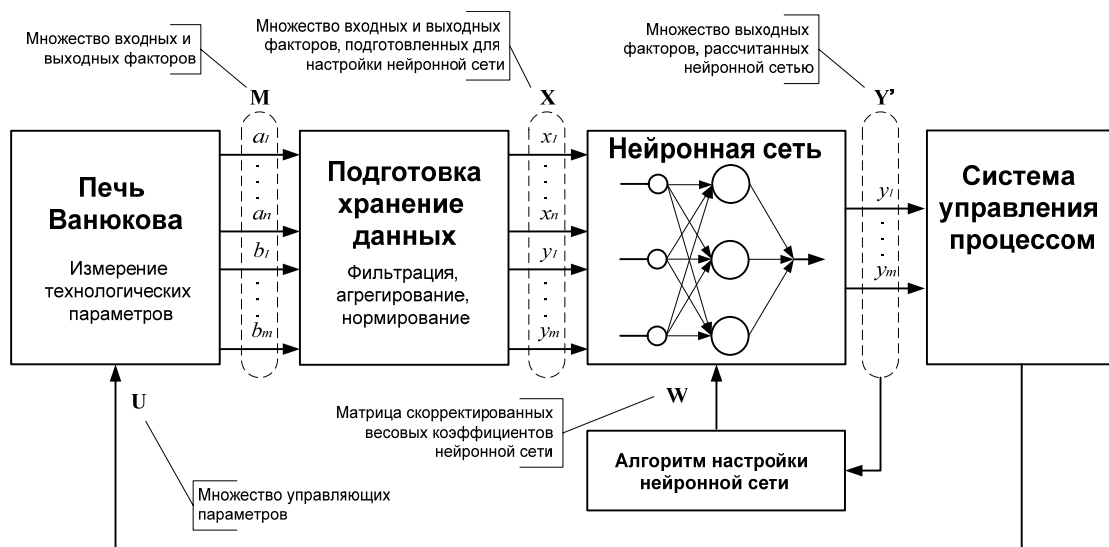


Рис. 1. Структурная схема модели управления процессом Ванюкова

5. Корректируются весовые коэффициенты нейрона победителя и нейронов, находящихся в его окрестности на плоскости сети Кохонена, по выражению:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha(t) \cdot h(t) \cdot (x_i(t-1) - w_{ij}(t-1)),$$

где  $w_{ij}(t-1)$  и  $w_{ij}(t)$  – весовой коэффициент до и после корректировки;  $\alpha(t)$  – коэффициент скорости обучения;  $x_i(t-1)$  –  $i$ -й входной фактор в момент времени;  $h(t)$  – функция окрестности нейрона победителя (функция Гаусса).

Процедура настройки сети Кохонена подразумевает проведение нескольких переборов всех экземпляров множества входных и выходных факторов (эпоха обучения). С наступлением новой эпохи увеличивается коэффициент скорости обучения.

В результате настройки сети Кохонена предложенным способом получают поверхности распределения входных и выходных факторов по весовым коэффициентам нейронов сети. Так, на рис. 2. представлено трехмерное распределение выходного фактора – содержание меди в штейне (ось  $z$ ). По оси  $x$  отложены

координаты нейрона в структуре сети Кохонена, по оси  $y$  – значения весовых коэффициентов для входного фактора.

По рельефу распределения можно сделать выводы:

– переменная «медь в штейне» обладает несколькими экстремумами, что свидетельствует о сложности и нелинейности влияния управляющих воздействий, а также взаимосвязей между ними;

– сделав срез поверхности, например на уровне 56 %, как показано на рис. 3, вместо перебора в дальнейшем всех вариантов можно выделить заранее желаемые (затемненные) области изменения меди в штейне. Тогда достижение какой-либо одной из областей будет свидетельствовать о выборе траектории управления процессом на заданных значениях.

Оценку результата моделирования сетью Кохонена выходного фактора «Медь в штейне» проведем прямым сравнением с данными химанализов двухчасовых проб (рис. 4). Размещение основной тенденции по диагонали квадрата свидетельствует об отсутствии систематических ошибок, что очень важно в задачах аппроксимации.

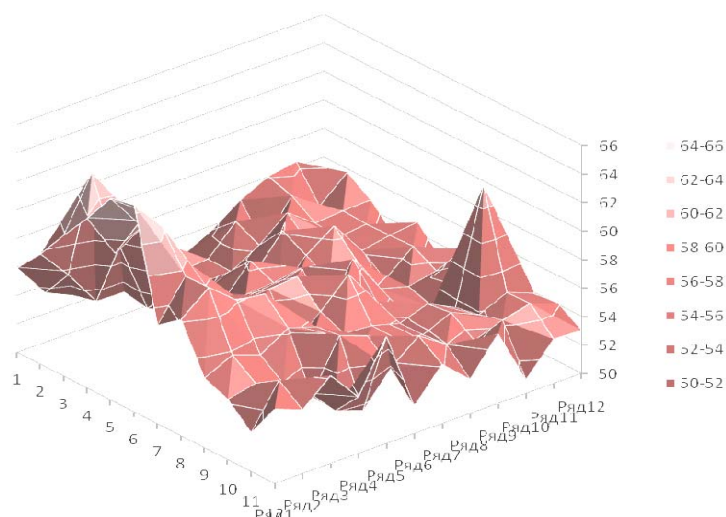


Рис. 2. Поверхность распределения «Медь в штейне»

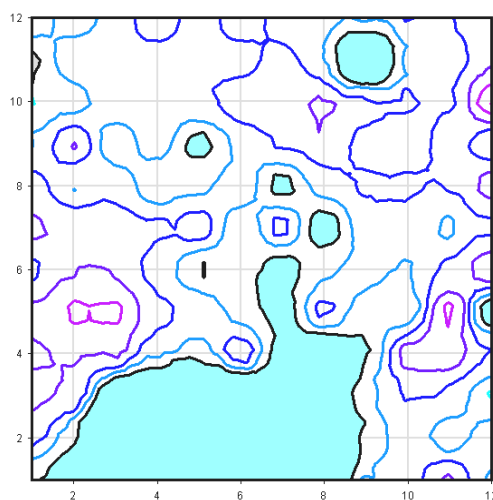


Рис. 3. Диаграмма распределения «Медь в штейне» по группам

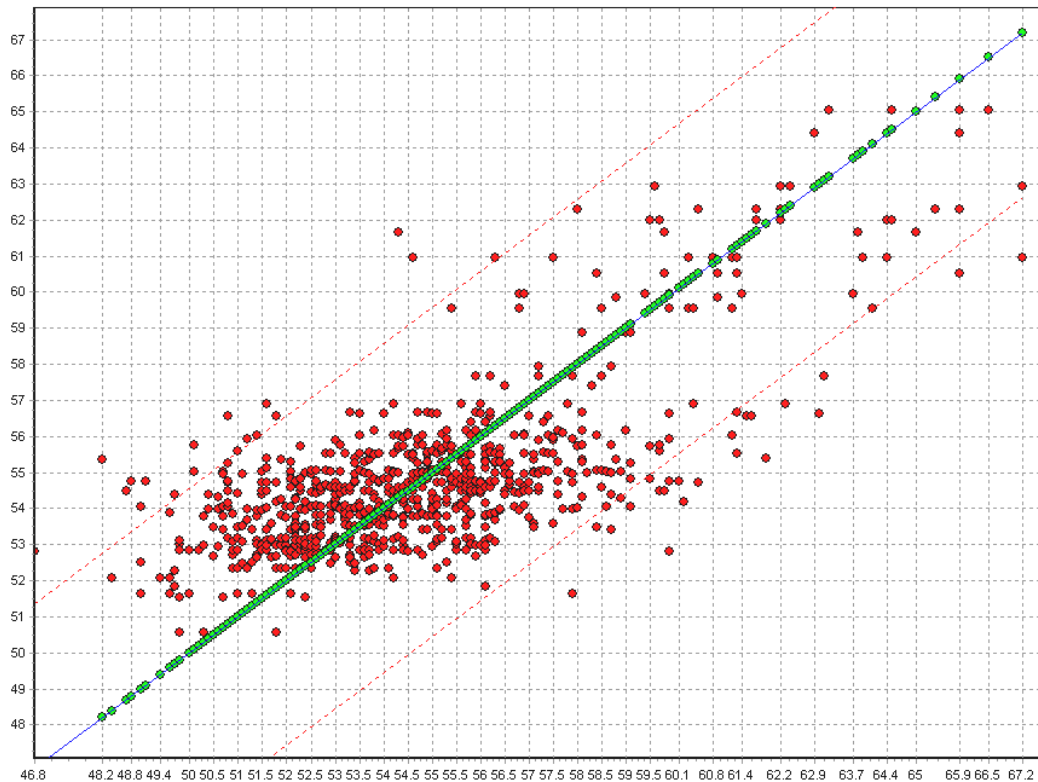


Рис. 4. Сравнение фактических (ось  $x$ ) и расчетных по модели значений меди в штейне

Это говорит о хороших обобщающих способностях сети Кохонена, позволяющих выделить основную тенденцию изучаемого процесса. Применительно к процессу Ванюкова, прогнозирование результатов плавки позволяет синтезировать модель управления качеством конечных продуктов плавки.

*Синтез модели управления сложной системой.* Согласно регламенту производства, содержание меди в штейне должно быть на уровне 50–65 % при ограничении содержания ее в шлаке не более 0,72.

Тогда критерий управления качеством конечной продукции можно записать следующим выражением:

$$J = \int_0^T ((q_{\text{шт}} - d_{\text{шт}})^2 + (q_{\text{шл}})^2) dt \rightarrow \min,$$

где  $q_{\text{шт}}$  и  $q_{\text{шл}}$  – текущее содержание меди в штейне и в шлаке соответственно;  $d_{\text{шт}}$  – регламентированное значение меди в штейне.

Для решения задачи управления по заданному критерию необходимо построить функцию, определяющую управляющее воздействие. Как видно на рис. 3, функция управления имеет несколько областей решения (затемненных) поставленной задачи. Достижение заданного критерия необходимо осуществить наикратчайшим путем. Такую задачу решает метод динамического программирования и принцип оптимальности Беллмана [5].

Классический подход Беллмана предполагает разбиение процесса управления на дискретные моменты времени  $t$ . Для каждого момента времени принимается такое управляющее воздействие  $U(t)$ , которое обеспечивает кратчайший путь на весь

период управления  $T$ . Тогда критерий управления принимает следующий вид:

$$J = \sum_{i=1}^T [(q_{\text{шт}}(t_i, U(t_i)) - d_{\text{шт}})^2 + (q_{\text{шл}}(t_i, U(t_i)))^2] + F(\mathbf{M}(t_k)) \rightarrow \min,$$

где  $F(\mathbf{M}(t_k))$  – точность приведения в конечное состояние.

Введем понятие – «значение критерия» для момента времени  $t$  и управляющего воздействия  $U(t)$ . Оно характеризует отклонение процесса от регламентированного состояния:

$$S(t, U(t)) = (q_{\text{шт}}(t, U(t)) - d_{\text{шт}})^2 + (q_{\text{шл}}(t, U(t)))^2.$$

Рекуррентное уравнение Беллмана вычисления вектора управления для каждого дискретного момента времени имеет вид

$$U(t_i) = \arg \min_{U(t_i) \in U} [S(t_i, U(t_i)) + J(t_{i+1})],$$

где  $J(t_{i+1})$  – значение критерия на следующем шаге, которое определяется по выражению

$$J(t_i) = \min_{U(t_i) \in U} [S(t_i, U(t_i)) + J(t_{i+1})].$$

Процедура вычисления наикратчайшего пути управления включает два этапа:

- «попятная» процедура вычисления всех возможных векторов управления, начиная с момента времени  $t_k$ ;
- «прямая» процедура вычисления наикратчайшего пути и соответствующих векторов управления, начиная с момента времени  $t_1$ .

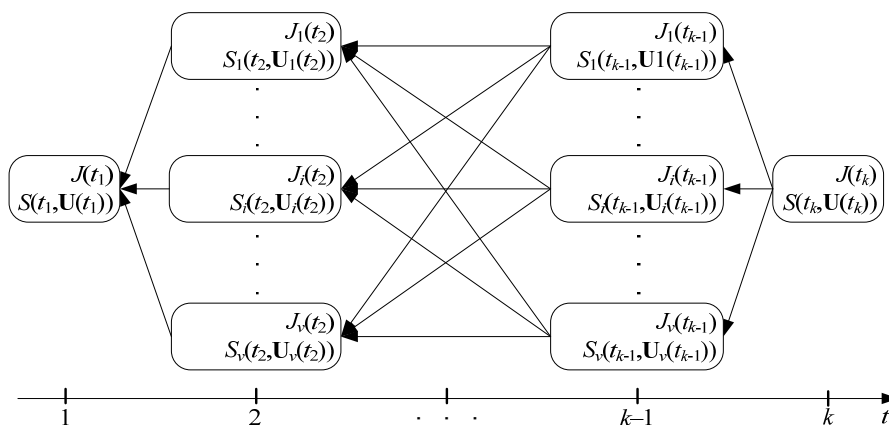


Рис. 5. Структурная схема расчета «попятной» процедуры

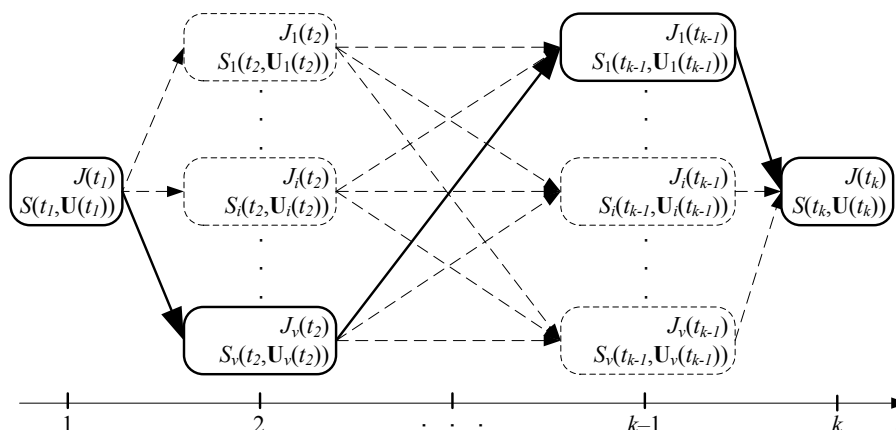


Рис. 6. Структурная схема расчета «прямой» процедуры

Структура расчета «попятной» процедуры показана на рис. 5. В момент времени  $t_k$  будем считать, что заданное состояние процесса находится в оптимальной точке  $J(t_k) = F(\mathbf{M}(t_k))$ . Исходя из конечного состояния, определяем все возможные векторы управляющих воздействий для момента времени  $t_{k-1}$ .

Пусть  $v$  – количество возможных вариантов управления на момент времени  $t$ . Тогда векторы возможных управлений, состояний и критериев качества обозначим нижним индексом  $i$  и рассчитаем  $\mathbf{U}(t_{k-1})$ ,  $S_i(t_{k-1}, \mathbf{U}(t_{k-1}))$ , и  $J_i(t_{k-1})$  для каждого варианта  $i = 1 \dots v$ .

Таким образом, рассчитываются управляющие воздействия, состояния процесса и значения критерия оптимальности для каждого предшествующего момента времени до момента  $t_1$ . В результате определяются все возможные пути проведения процесса.

Основываясь на результатах «попятной» процедуры, «прямой» расчет подразумевает процесс нахождения пути, обеспечивающего минимальное значение критерия управления на всем промежутке времени:  $t = 1 \dots k$ , т. е. нахождение наикратчайшего пути (рис. 6). Наикратчайший путь отображается стрелками со сплошными линиями.

Процесс вычисления вектора управления по методу динамического программирования и принципа оптимальности Беллмана является относительно простой, но при этом очень трудоемкой процедурой, по-

этому целесообразно ввести модификации в «попятную» процедуру, позволяющую упростить и сократить количество вычислений.

**Модификация первая.** Зная области изменения выходных факторов (меди в штейне и шлаке), контуры которых отображены на рис. 3 (затемненные области), можно исключить состояния процесса, не попадающие в области содержания меди в штейне 56 %.

**Модификация вторая.** Количество расчетов можно целенаправленно уменьшить путем введения критерия группировки состояний процесса:

$$|S_n - S_m| \leq \delta, \quad n = 1..q, m = 1..v, n \neq m,$$

где  $\delta$  – критерий точности группировки.

Если указанное условие выполняется, можно сказать, что разные управляющие воздействия (с индексами  $n$  и  $m$ ) приведут к одному и тому же состоянию. Из этого следует, что можно выбрать всего одно из управляющих воздействий (например, с индексом  $n$ ), и соответственно, уменьшить количество возможных вариантов управления  $v$ .

**Пример расчета пути управления.** В качестве примера расчета пути управления рассмотрим моделирование по начальным условиям процесса плавки в печи Ванюкова:

– содержание меди в штейне на предыдущем шаге  $q_{шт} = 50,30 \%$ ;



- загрузка металлосодержащих компонентов шихты  $U_1 = 111,40$  т/ч;
- расход флюсов на плавку  $U_2 = 26,17$  т/ч;
- удельный расход кислорода на тонну металлосодержащих компонентов шихты  $U_3 = 115,25$  м<sup>3</sup>/т.

Необходимо построить «траекторию движения» процесса к содержанию меди в штейне на уровне 56 %. Для этого смоделируем период плавки в 1 ч с дискретностью управления 15 мин. Шаг изменения управляющих воздействий примем равным 10 % от рабочего диапазона. В результате работы модифицированной «попятной» процедуры получаем 8 состояний на 1-м шаге, 11 состояний на 2-м шаге, 16 состояний на 3-м и 4-м шагах. При классическом методе с дискретным перебором управляющих воздействий на каждом шаге количество состояний составило бы 121.

Методом комбинаторики получаем варианты и значения критерия для каждого из возможных путей управления. При модифицированной «попятной» процедуре количество возможных оптимальных путей управления составляет  $1 \times 8 \times 11 \times 16 \times 16 = 22\,528$ . При классическом подходе количество путей управления составило бы  $1 \times 121 \times 121 \times 121 \times 121 = 214\,358\,881$ .

Полученные варианты сортируем по сумме критериев и определяем наикратчайший путь управления печью Ванюкова (рис. 7).

На рис. 7 видно, что изменение управляющих воздействий только на первых двух шагах расчета плана

управления стабильно повышает содержание меди в штейне до регламентированного уровня.

Предполагаемый план управления может изменяться на протяжении расчетного периода из-за возникновения возмущающих воздействий. Предложенная модификация метода динамического программирования Беллмана позволяет оперативно рассчитывать новый план, не затрачивая значительных вычислительных и временных ресурсов.

Таким образом, в результате проведенных исследований синтезирована система для оценки состояния сложной технологической системы на примере процесса Ванюкова. Она включает в себя алгоритм подготовки статистических данных, систему моделирования и модифицированный алгоритм Беллмана.

Разработанная имитационная модель позволяет на основе вектора входных факторов производить мониторинг процесса и определять его техническое состояние на заданном промежутке времени. При этом с увеличением времени прогноза естественно возрастает и ошибка прогнозируемых величин.

Синтезированная система обладает свойством универсальности, поскольку ее можно настроить для разных по своему назначению процессов, не лимитируя при этом количество входных и выходных факторов. Путем целенаправленного выбора необходимого критерия управления можно получать различные по своему назначению системы.

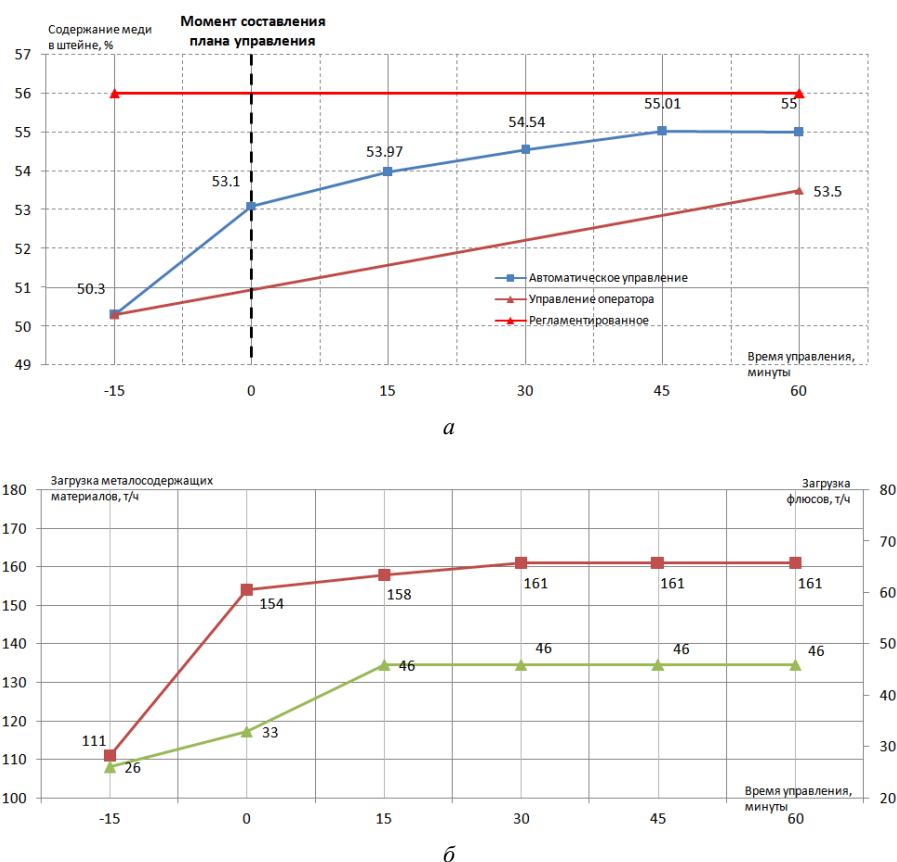


Рис. 7. Графики изменения содержания меди в штейне (а) и управляющих факторов (б)

## Библиографические ссылки

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
2. Спесивцев А. В. Металлургический процесс как объект изучения: новые концепции, системность, практика. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004.
3. Плавка в жидкой ванне / А. В. Ванюков, В. П. Быстров, А. Д. Васкевич и др.; под ред. А. В. Ванюкова. М.: Металлургия, 1988.
4. Костин Е. В., Писарев А. И. Подготовка статистических данных для построения нейросетевой модели процесса плавки в печах Ванюкова // Науч. вестник Норильского индустр. ин-та. 2011. № 9. С. 45–49.
5. Kohonen T. Self-Organizing Maps, Springer, 1995.
6. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Харьков: Основа, 1997.

## References

1. Okhtilev M., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Intellektualnyye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh obektov* (Intelligent technologies for monitoring and control of structural dynamics of complex technical objects). Moscow, Nauka, 2006, 410 p.
2. Spesivtsev A. V. *Metallurgicheskiy protsess kak ob'yekt izucheniya: novyye kontseptsii, sistemnost', praktika* (The steel making process as an object of study: new concepts, consistency, practice). SPb., Izd-vo Politekh. un-ta, 2004, 306 p.
3. Vanyukov A. V., Bystrov V. P., Vaskevich A. D. et al. *Plavka v zhidkoy vanne* (Melting in a liquid bath). Moscow, Metallurgy, 1988.
4. Kostin E. V., Pisarev A. I. *Nauchnyy vestnik noril'skogo industrial'nogo instituta*. 2011, № 9, pp. 45–49.
5. Kohonen T. Self-Organizing Maps, Springer, 1995.
6. Voronovskiy G. K. *Geneticheskiye algoritmy, iskusstvennyye neyronnyye seti i problemy virtual'noy real'nosti* (Genetic algorithms, neural networks, artificial and virtual reality problems). Khar'kov, Osnova, 1997, 112 p.

© Костин Е. В., 2013

УДК 548.571

## ВЛИЯНИЕ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Ю. Ю. Логинов<sup>1</sup>, А. В. Мозжерин<sup>1</sup>, А. В. Брильков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: loginov@sibsau.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: abrilkov@sfu-kras.ru

Методом просвечивающей электронной микроскопии исследованы закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках CdTe, HgTe, ZnTe, ZnSe, ZnS, Si и GaAs. Установлено, что при одних и тех же условиях обработки в полупроводниках группы  $A_2B_6$  образуются дефекты наибольших размеров и с более высокой плотностью по сравнению с Si и GaAs. При этом степень нарушений кристаллической решетки и интенсивность дефектообразования убывает в следующей последовательности: от  $ZnS \rightarrow ZnSe \approx CdS \rightarrow CdTe \approx HgTe \rightarrow ZnTe \rightarrow GaAs \approx Si$ . Экспериментальные результаты объясняются на основе анализа упругих напряжений, создаваемых в материале в результате образования структурных дефектов.

Ключевые слова: структурные дефекты, упругие постоянные, электронная микроскопия, полупроводники.

## EFFECT OF ELASTIC STRESSES ON THE FORMATION OF STRUCTURAL DEFECTS IN SEMICONDUCTORS

Yu. Yu. Loginov<sup>1</sup>, A. V. Mozherin<sup>1</sup>, A. V. Brilikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: loginov@sibsau.ru

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
79 Svobodnyi prosp., Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: abrilkov@sfu-kras.ru

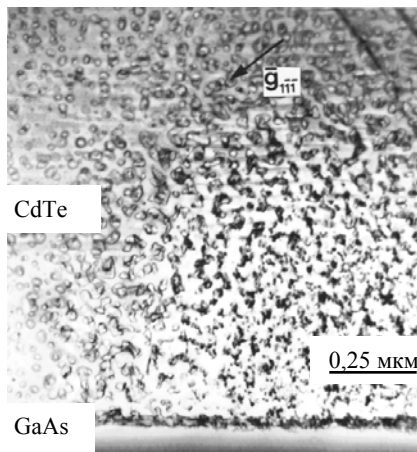
The structural defects formation in semiconductors CdTe, HgTe, ZnTe, ZnSe, ZnS, Si and GaAs were investigated by method of transmission electron microscopy. It is found that the same processing conditions in semiconductors  $A_2B_6$  defects are formed with largest dimensions and higher density as compared with Si and GaAs. The degree of crystal lattice irregularities and defect formation intensity decreases in the following order of  $ZnS \rightarrow ZnSe \approx CdS \rightarrow CdTe \approx HgTe \rightarrow ZnTe \rightarrow GaAs \approx Si$ . The experimental results are explained on the basis of analysis of the elastic stresses in the material generated as a result of the formation of structural defects.

Keywords: structural defects, the elastic constants, electron microscopy, semiconductors.

Полупроводниковые материалы и приборы широко применяются в космических аппаратах, устройствах электроники, изготовлении солнечных элементов [1]. В процессе выращивания полупроводниковых кристаллов и эпитаксиальных структур, облучения и термообработки в них формируются структурные дефекты, размеры и плотность которых зависят от условий обработки и природы материалов [1; 2]. Методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что при сравнении полупроводников группы  $A_2B_6$  (CdTe, HgTe, ZnTe, ZnSe, ZnS), кремния и GaAs при идентичных условиях обработки наиболее интенсивное дефектообразование наблюдается в полупроводниках  $A_2B_6$ , а не в Si и GaAs [2]. Легче всего процесс дефектообразования происходит в ZnS и CdS, в которых образуются дефекты с наибольшими размерами и высокой плотностью. Труднее всего процесс дефектообразования происходит в Si и GaAs, в которых наблюдаются дефекты с небольшими размерами и меньшей плотностью.

В данной работе методом просвечивающей электронной микроскопии исследованы полупроводниковые кристаллы CdTe, HgTe, ZnTe, ZnSe, ZnS, Si и GaAs.

На рисунке показаны структурные дефекты, образующиеся в CdTe, выращенном методом металл-органической парафазовой эпитаксии на монокристаллической подложке GaAs, в результате облучения структуры CdTe/GaAs электронами с энергией 100 кэВ непосредственно в электронном микроскопе. Дефекты представляют собой преимущественно скопления вакансий в виде пор и скопления атомов в форме темных образований. Непосредственно на границе «эпитаксиальный слой – подложка» также формируется переходный слой толщиной  $\Delta x \approx 35$  нм, который расширяется с ростом дозы облучения и связан со стоком точечных дефектов на границу раздела. Каких-либо изменений в GaAs не происходит, т. е. GaAs является радиационно-стойким материалом к облучению электронами данной энергией.



Формирование структурных дефектов в CdTe, выращенном на подложке GaAs, при облучении электронами с энергией 100 кэВ, интенсивностью  $4,7 \cdot 10^{18}$  электрон/(см<sup>2</sup>·с), потоком  $2,5 \cdot 10^{21}$  электрон/см<sup>2</sup>

В результате электронно-микроскопических исследований установлено, что степень нарушений в полупроводниках уменьшается от ZnS → ZnSe ≈ CdS → CdTe ≈ HgTe → ZnTe → GaAs ≈ Si, что можно объяс-

нить увеличением значения энергии дефекта упаковки (ЭДУ) материалов [2]. При этом размеры скоплений вакансий и междоузельных дефектов в виде пор и дислокационных петель больше в CdTe, чем в других исследованных полупроводниках  $A_2B_6$ , и значительно меньше в Si и GaAs при идентичных условиях обработки.

С точки зрения упругих напряжений, создаваемых в материале в результате образования структурных дефектов, можно рассчитать плотность внутренней энергии  $U$ , связанной с образованием скоплений точечных дефектов. Зная компоненты тензоров модулей упругости  $C_{ijkl}$  и податливости  $S_{ijkl}$ , выражение можно записать в общем виде [3]:

$$U = \frac{1}{2} S_{ijkl} A_{ijkl}^{\sigma}, \quad (1)$$

где  $A_{ijkl}^{\sigma}$  – тензор дисперсии внутренних напряжений, связанных со структурными дефектами. Для кристаллов с кубической симметрией, содержащих скопления вакансий или междоузельных атомов в виде дисков или дислокационных петель, значение  $U$  можно вычислить по формуле [3]:

$$U = \frac{g^2}{30} [L(S_{11} + 2S_{12}) + 11S_{11} + 7S_{44}], \quad (2)$$

где  $g^2 = \frac{\delta b^2 \langle \mu \rangle^2}{h^2}$ ; здесь  $\delta$  – относительный объем, занятый дислокационными дисками,  $b$  – величина вектора Бюргерса,  $L = 96m^2 - 64m + 7$ ; здесь  $m = 2 \frac{3\langle K \rangle + \langle \mu \rangle}{3\langle K \rangle + 4\langle \mu \rangle}$ ,  $h$  – толщина дисков,  $\langle K \rangle, \langle \mu \rangle$  – усредненные значения объемного модуля упругости и модуля сдвига, которые в случае кубической симметрии определяются стандартными выражениями:

$$\langle K \rangle = \frac{1}{3} (C_{11} + 2C_{12}),$$

$$\langle \mu \rangle = \frac{1}{5} [(C_{11} - C_{12}) + 3C_{44}]. \quad (3)$$

Принимая  $h \approx b$  и зная упругие постоянные [3; 4] (табл. 1) можно рассчитать плотность внутренней энергии на единицу относительного объема, занимаемого структурными дефектами,  $U/\delta$ , например, при 300 К.

В табл. 2 приведены расчетные значения  $U/\delta$  для исследованных материалов. Из табл. 2 видно, что  $U/\delta$  меньше в CdTe и HgTe, затем несколько выше в ZnTe, ZnS и ZnSe и значительно больше в GaAs и Si.

Таким образом, из упругих свойств рассмотренных материалов следует, что в полупроводниках  $A_2B_6$  энергетически оправданно образование скоплений точечных дефектов с размерами больше, чем в Si и GaAs, а скопления вакансий или междоузельных атомов в виде дисков в CdTe и HgTe могут занимать больший относительный объем, чем в ZnS, ZnTe или ZnSe. Это согласуется с экспериментальными данными, когда при идентичных условиях облучения электронами размеры образующихся скоплений точечных дефектов в CdTe больше, чем в ZnTe, ZnS и ZnSe, и практически равны нулю в Si и GaAs [2].

Таблица 1

**Упругие постоянные  $C_{ij}$  ( $10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>) и  $S_{ij}$  ( $10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н)  
соединений  $A_2B_6$ , GaAs и Si**

| Материал (кубич. сист.) | $C_{11}$ | $C_{12}$ | $C_{44}$ | $S_{11}$ | $S_{12}$ | $S_{44}$ |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| CdTe                    | 5,35     | 3,69     | 2,02     | 4,27     | -1,74    | 4,95     |
| HgTe                    | 5,32     | 3,68     | 2,08     | 4,33     | -1,77    | 4,80     |
| ZnTe                    | 7,15     | 4,08     | 3,11     | 2,39     | -0,85    | 3,25     |
| ZnSe                    | 8,50     | 5,02     | 4,07     | 2,11     | -0,78    | 2,46     |
| ZnS                     | 10,10    | 6,44     | 4,43     | 1,97     | -0,76    | 2,26     |
| GaAs                    | 11,80    | 5,35     | 5,94     | 1,175    | -0,366   | 1,68     |
| Si                      | 16,50    | 6,40     | 7,92     | 0,774    | -0,216   | 1,26     |

Таблица 2

**Значения упругих параметров  $\langle K \rangle$ ,  $\langle \mu \rangle$ ,  $m$ ,  $L$  и  $U/\delta$   
для исследованных полупроводников  $A_2B_6$ , Si и GaAs**

| Материал | $\langle K \rangle$ , $10^{10}$ Н/м <sup>2</sup> | $\langle \mu \rangle$ , $10^{10}$ Н/м <sup>2</sup> | $m$   | $L$     | $U/\delta$ , $10^{10}$ Дж/м <sup>3</sup> |
|----------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------|---------|------------------------------------------|
| CdTe     | 4,243                                            | 1,544                                              | 1,509 | 129,305 | 1,46                                     |
| HgTe     | 4,23                                             | 1,576                                              | 1,50  | 127,0   | 1,50                                     |
| ZnTe     | 5,10                                             | 2,48                                               | 1,41  | 107,62  | 2,527                                    |
| ZnSe     | 6,18                                             | 3,14                                               | 1,394 | 104,33  | 3,21                                     |
| ZnS      | 7,66                                             | 3,39                                               | 1,44  | 113,906 | 3,40                                     |
| GaAs     | 7,50                                             | 4,854                                              | 1,31  | 87,91   | 5,0                                      |
| Si       | 9,77                                             | 6,77                                               | 1,28  | 82,37   | 6,95                                     |

С ростом температуры размеры скоплений точечных дефектов будут увеличиваться, поскольку численные значения упругих постоянных  $C_{ij}$  и  $S_{ij}$  при этом уменьшаются [3; 4], а следовательно, уменьшается и величина  $U/\delta$ . Так, значение  $U/\delta$  в CdTe составляет  $3,42 \cdot 10^{10}$  и  $1,42 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup> при 77 и 300 К соответственно. Это проявляется, в частности, в укрупнении пор, образовавшихся в ZnS, CdTe и CdS в результате электронного облучения, при последующем термоотжиге, что наблюдалось нами ранее [2].

Таким образом, проводя анализ упругих постоянных, можно объяснить обнаруженную закономерность образования структурных дефектов в полупроводниках CdTe, HgTe, ZnTe, ZnSe, ZnS, GaAs и Si.

#### Библиографические ссылки

1. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике / под ред. А. Л. Асеева. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004.

2. Логинов Ю. Ю., Браун П. Д., Дьюроуз К. Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках  $A_2B_6$ . М. : Логос, 2003.

3. Шермергор Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М. : Наука, 1977.

4. Landolet-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Group III. Crystal and Solid State Physics / Ed. K.-H. Hellwege. Berlin ; Heidelberg ; NewYork : Springer-Verlag, 1979.

#### References

1. *Nanotehnologii v poluprovodnikovoi elektronike* (Nanotechnology in semiconductor electronics). Ed. A. L. Aseev. Novosibirsk, SO RAN, 2004. 368 p.

2. Loginov Y. Y., Brown P. D., Durose K. *Zakonomernosti formirovaniya strukturnih defektov v poluprovodnikah  $A_2B_6$*  (The structural defect formation in semiconductors  $A_2B_6$ ). Moscow, Logos, 2003, 304 p.

3. Shermergor T. D. *Teoria uprugosti mikroneodnorodnih sred* (The theory of elasticity of microinhomogeneous media). Moscow, Nauka, 1977, 400 p.

4. Landolet-Bornstein numerical data and functional relationships in science and technology. Group III. Crystal and solid state physics. Ed. K.-H. Hellwege. Berlin; Heidelberg; NewYork, Springer-Verlag, 1979, vol. 11, 854 p.

© Логинов Ю. Ю., Мозжерин А. В., Брильков А. В., 2013

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ

Р. А. Мирзаев, Н. А. Смирнов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
 Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
 E-mail: ramirzaev@mail.ru, 2008smirnov@mail.ru

*Описано создание системы управления манипулятором. В качестве двигателей используются сервоприводы. Система автоматического управления сервоприводами состоит из персонального компьютера и управляемого с него контроллера сервоприводов. Приведены принципы работы сервоприводов и управления ими. Для управления сервоприводами применен пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор. Описан метод, позволяющий провести отладку и тестирование элементов системы управления при помощи виртуального моделирования. После отладки элементов системы управления на виртуальной модели создан контроллер. Используя написанную программу, реализовано управление сервоприводами. Предложенный метод позволяет проверить работоспособность системы управления до создания электронных устройств. Возможно использование данного метода виртуального моделирования систем управления при разработке различных управляющих систем, в которых команды подаются с компьютера через USB-порт.*

*Ключевые слова:* система автоматического управления, сервопривод, дельта-механизм, устройства параллельной кинематики, манипулятор.

## AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF A MANIPULATOR

R. A. Mirzaev, N. A. Smirnov

Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev  
 31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia.  
 E-mail: ramirzaev@mail.ru, 2008smirnov@mail.ru

*This work is dedicated to the creation of the manipulator control system. In the manipulator we used servo drive group. The automatic control system consists of a personal computer and the controller of servo. We describe the principles of operation and control of servo drive group. We used proportional-integral-differential controller to control motors. We describe a method that allows to debug and test the control system, with the use of virtual simulation. We created a controller after debugging the control system on the virtual model. We implemented control of servo drive group. We used the created control program of microcontroller. The proposed method allows to test the control system before the production of electronic devices. You can use this method of virtual simulation of control systems in the development of various control systems. Method can be used to control systems in which the commands are given from computer via a USB-port.*

*Keywords:* automatic control system, servo drive group, delta mechanism, device parallel kinematics, manipulator.

Для разработки и отладки системы автоматического управления (САУ) необходим мониторинг работы каждого элемента системы управления. Важно отметить, что в начале разработки проверку работоспособности схемотехнических и программных решений целесообразно проводить до того, как будет создан реальный прототип устройства. Поэтому актуально использовать виртуальную модель системы управления [1].

В данной работе проводилось моделирование системы управления сервоприводами для устройства параллельной кинематики.

Система управления сервоприводами состоит из персонального компьютера (ПК) и, управляемого с него, контроллера сервоприводов (рис. 1) [2].

Управляющая программа подает команды с компьютера на контроллер, в которых содержится ин-

формация о номере двигателя и его требуемом положении. Контроллер отвечает о выполненной команде и отправляет сигналы на серводвигатели для их поворота (рис. 2).



Рис. 1. Схема моделирования САУ на компьютере

Данная система управления полностью промоделирована на компьютере, прежде чем был создан прототип. Моделирование работы системы управления выполняется при помощи трех программ: Serial Port Monitor, Visual Serial Ports Driver, Proteus.

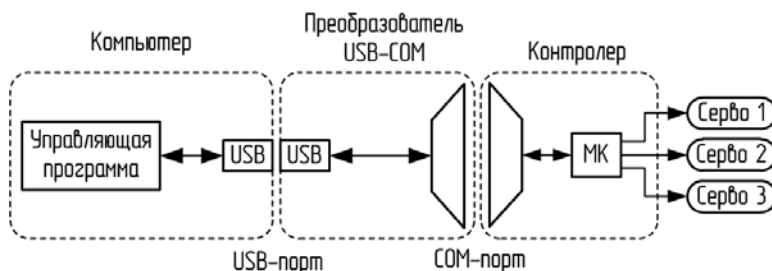


Рис. 2. Функциональная схема реальной САУ. МК-микроконтроллер

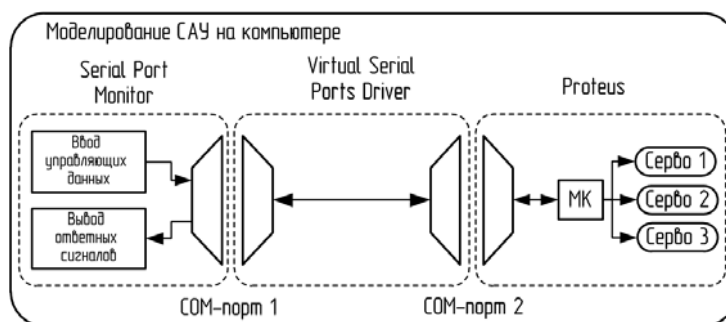


Рис. 3. Схема моделирования САУ на компьютере

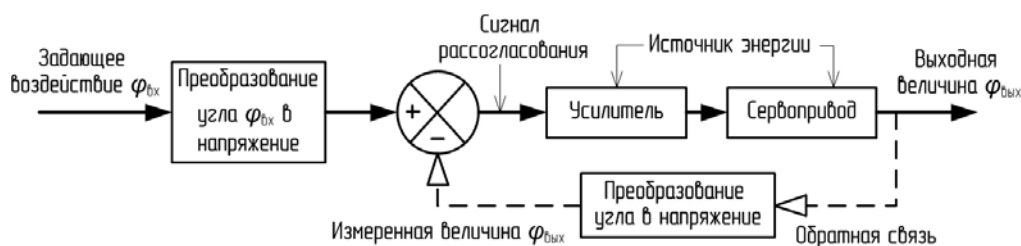


Рис. 4. Блок-схема системы управления серводвигателем [3]

Программа Serial Port Monitor является терминалом для обмена информацией с последовательным портом. Разработчик имеет возможность посылать команды на устройство и принимать сообщения. Таким образом, имитируется работа управляющей программы.

При помощи утилиты Virtual Serial Ports Driver эмулируется последовательный порт RS-232, соединенный виртуальным нуль-модемным кабелем. Создано два виртуальных последовательных порта в системе, соединенных друг с другом для обмена информацией. Эта программа моделирует работу портов компьютера и контроллера, соединенных кабелем.

Средство разработки и тестирования Proteus моделирует работу электроники, в том числе серводвигателей и микроконтроллера Atmega-16. Для проверки разработанной программы, управляющей микроконтроллером, она загружается в виртуальную электрическую модель устройства. При корректной работе этой программой будет запрограммирован реальный микроконтроллер. В среде отладки Proteus имеется набор виртуальных приборов, таких как вольтметр, осциллограф, логический анализатор. Схема модели САУ приведена на рис. 3.

Далее подробно рассмотрим элементы системы управления их разработку и отладку. Так как требуемые управляющие сигналы определяются объектом

управления, то сначала ознакомимся с устройством работы сервопривода.

**Принцип работы сервоприводов.** Сервомеханизм – следящая система автоматического регулирования, которая работает по принципу обратной связи и в которой один или больше системных сигналов, сформированных в управляющий сигнал, оказывают механическое регулирующее воздействие на объект [3]. Сервосистемы обладают двумя особенностями: способностью усиливать мощность и информационной обратной связью. Усиление необходимо потому, что требуемая на выходе энергия обычно велика (берется от внешнего источника), а на входе незначительна. Обратная связь представляет собой замкнутый контур, в котором рассогласование сигналов входа и выхода используется для управления. Следовательно, в прямом направлении контур передает энергию, а в обратном обеспечивает информацию, необходимую для точного управления (рис. 4) [3].

**Управляющие сигналы от контроллера к серводвигателю.** У сервопривода на вход с приемника подается прямоугольный импульс, длительность которого определяет угол поворота двигателя (рис. 5).

В исследовательском образце используется серводвигатель HXT900. Ширина импульса составляет 450–

2 450 мкс. Период между импульсами равен 20 мс. Угол поворота – 90°. При импульсах длительностью 450 мкс серводвигатель устанавливается в положение 0°. При импульсах длительностью 2 450 мкс серводвигатель устанавливается в положение 90°.

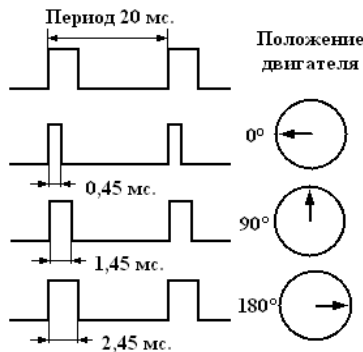


Рис. 5. Управляющие сигналы от контроллера к серводвигателю [3]

**Команды, подаваемые на контроллер с компьютера.** Структура команды от управляющей программы на контроллер следующая:

<начало><номер двигателя><требуемое положение>

Начало – это один старт-байт в шестнадцатеричной системе равен FF, обозначает начало передачи.

Номер двигателя принимает значения от 0 до 7. Система управления имеет возможность управлять положением не более 8 сервоприводов. Данное количество достаточно для абсолютного большинства устройств параллельной структуры.

Далее передаются данные о ширине импульса ШИМ-сигнала, при помощи которого управляются сервоприводы (см. таблицу). Требуемое положение передается одним байтом. Возможно увеличение количества байт для большей точности.

**Передача информации о требуемом положении сервопривода**

| Число в десятичной системе счисления | Число в шестнадцатеричной системе счисления | Требуемая ширина импульса в мкс | Положение двигателя, град. |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 0                                    | 0                                           | 450                             | 0                          |
| 127                                  | 7F                                          | 1 450                           | 45                         |
| 255                                  | FF                                          | 2 450                           | 90                         |

Величина ошибки позиционирования двигателя, возникающей при передаче информации от ПК к МК, определяется выражением:

$$\Delta = \frac{\theta}{256^n},$$

где  $\theta$  – угол поворота сервопривода;  $n$  – число байт, с информацией о положении привода.

Если информация о положении передается одним байтом, то погрешность составляет

$$\Delta = \frac{90^\circ}{256} = 0,352^\circ.$$

Если информация о положении передается двумя байтами, то погрешность составляет

$$\Delta = \frac{90^\circ}{256^2} = 0,00137^\circ.$$

Приведем примеры команд, отправляемых от управляющей программы к контроллеру:

FF 00 00 – означает перевести первый двигатель в угол 0°;

FF 01 7F – означает перевести второй двигатель в угол 45°;

FF 07 FF – означает перевести восьмой двигатель в угол 90°.

**Алгоритм управления серводвигателями.** Принятые микроконтроллером с компьютера данные записываются в массив ServoState. По значениям из этого массива определяется продолжительность импульса широтно-модулированного сигнала для каждого серводвигателя. С периодом 20 мс на каждый двигатель поступает передний фронт импульса (рис. 5). Задний фронт подается тогда, когда с переднего фронта прошло время, равное требуемой ширине импульса для данного двигателя (от 450 до 2 450 мкс).

Частота тактирования микроконтроллера  $F_t$  вычисляется делением частоты работы резонатора  $F_{res}$  на коэффициент делителя  $k_d$  [4]:

$$F_t = \frac{F_{res}}{k_d}.$$

При использовании внешнего кварцевого резонатора можно достигнуть частоты работы микроконтроллера Atmega-16 до 16 МГц. В работе использован внутренний генератор тактовых импульсов с частотой 1 МГц. Таймеры микроконтроллера тактируются от генератора тактовых импульсов, частота которого поделена на коэффициент делителя, записанный в регистр TCCR1. Для удобства расчетов коэффициент делителя равен единице. Таким образом, частота тактирования таймеров микроконтроллера равна 1 МГц, а период тактирования – 1 мкс. Период тактирования – параметр, который используется в таймерах микроконтроллера для формирования широтно-модулированных импульсов.

Время длительности импульса, подаваемого на сервопривод, определяется количеством тактов, который должен сделать таймер до прерывания. Требуемое количество тактов таймера вычисляется по формуле

$$T = T_{\min} + Sp_i \cdot \frac{T_{\max} - T_{\min}}{256^n},$$

где  $T_{\min}$  – минимальное значение длительности импульса, в выбранном серводвигателе оно равно 450 мкс;  $T_{\max}$  – максимальное значение длительности импульса, в выбранном серводвигателе оно равно 2 450 мкс;  $Sp_i$  – значение позиции  $i$ -го сервопривода из массива состояний сервоприводов  $srv\_poz[i]$ ;  $i$  – номер текущего сервопривода, изменяется от 0 до 7;  $n$  – число байт, с информацией о положении привода.

**Пример расчета количества тактов таймера:** среднее положение серводвигателя – 45° соответствует

поданному с компьютера сигналу 127 (таб. 1), количество тактов таймера вычисляется по выражению

$$T = 450 + 127 \cdot \frac{2450 - 450}{255} = 1446.$$

Так как величина одного такта таймера равна 1 мкс, то количество тактов равно периоду импульса. Вычисленное количество тактов таймера записывается в регистр микроконтроллера OCR1A. При каждом отсчете таймера его значение увеличивается на единицу, а также сравнивается с регистром OCR1A. При совпадении происходит прерывание работы МК и форми-

рование заднего фронта импульса, т. е. устанавливается нулевой потенциал на всех серводвигателях [5].

**Моделирование работы контроллера.** Контроллер сервоприводов спроектирован на базе микроконтроллера Atmega-16 [6]. Управляющие ШИМ-сигналы на сервоприводы поступают с восьми выводов порта С микроконтроллера. Для индикации рабочих состояний, а также ошибок к выводу PB0 подключен светодиод. Прием управляющих сигналов с компьютера осуществляется через порт COM1.

При помощи программного средства Proteus создана электрическая модель контроллера сервоприводов (рис. 7).

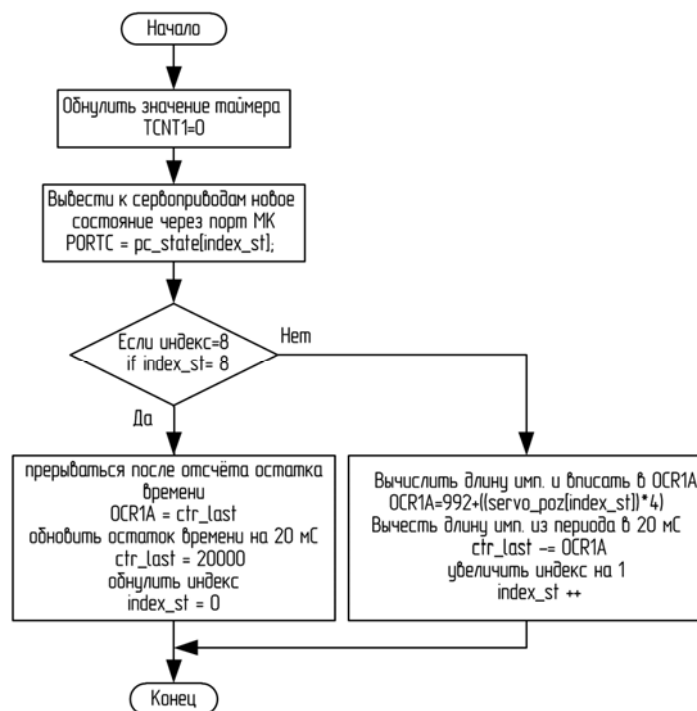


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы таймера, отвечающего за формирование переднего и заднего фронтов ШИМ-импульсов

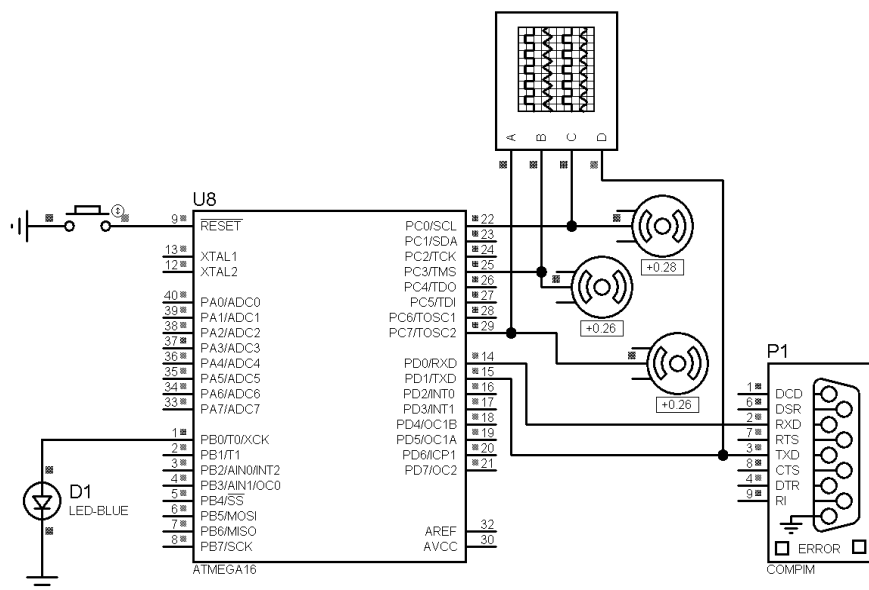


Рис. 7. Схема моделирования контроллера в программе Proteus



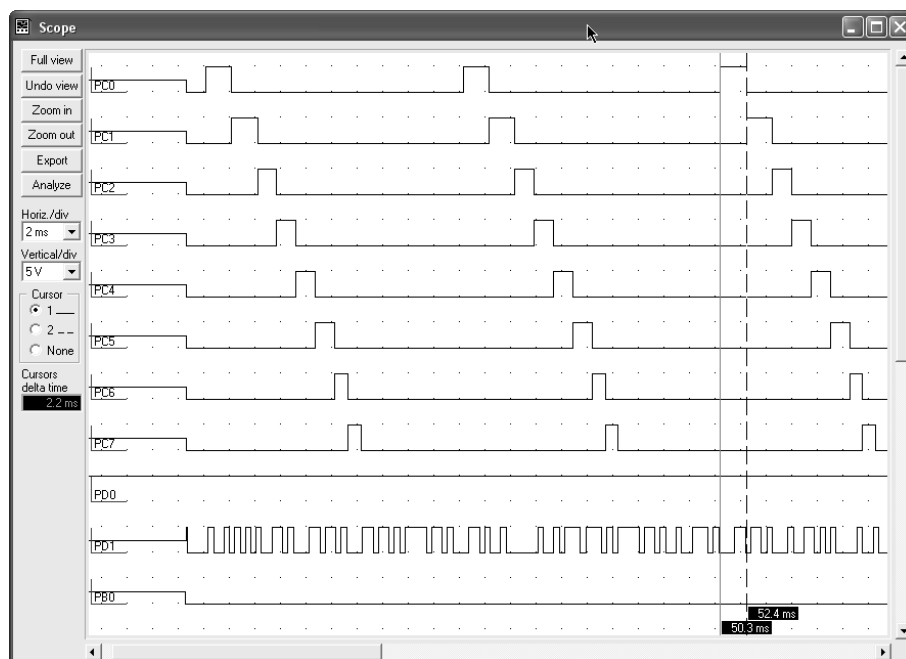


Рис. 8. Результаты моделирования работы микроконтроллера по программе VMLAB (ШИМ-сигналы, подаваемые на восемь двигателей)

Порт COMPIМ подключается к существующему com-порту компьютера. При отладке данный порт подключается к виртуальному com-порту, созданному программой Virtual Serial Ports Driver (см. рис. 3).

В среде отладки VMLAB промоделирована работа программы микроконтроллера. Использована возможность выполнения инструкций в пошаговом режиме, а также наличие виртуального осциллографа и терминала соединения RS-232.

Измерена ширина импульса, подаваемого на первый двигатель (рис. 8), она составляет 2,2 мкс.

Для отладки и тестирования работы различных элементов управления разработана виртуальная САУ, которая будет использоваться при исследовании устройств параллельной структуры. Разработанная виртуальная САУ позволяет провести отладку и тестирование элементов системы управления до создания электронных устройств. После отладки элементов системы управления на виртуальной модели создан контроллер. Используя написанную программу, реализовано управление сервоприводами. Главным результатом моделирования стала работоспособность созданного прототипа, а также отработка углов поворота сервоприводов с заданной точностью.

#### Библиографические ссылки

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления СПб. : Профессия, 2003.
2. Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А., Смирнов А. Н. Расчет параметров движения приводов механизма параллельной структуры // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 5 (38). С. 62–64.

3. Масленников В. Многоликие серво [Электронный ресурс]. URL: [http://hobbyarea.ru/article\\_info.php?articles\\_id=39](http://hobbyarea.ru/article_info.php?articles_id=39) (дата обращения 20.11.2012).

4. 8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash – Atmel Corporation, 2010 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf> (дата обращения 08.11.2012).

5. Семенов М. AVR краткий учебный курс [Электронный ресурс]. URL: <http://proavr.narod.ru/> (дата обращения 01.12.2012).

6. Федоров Ю. Н. Справочник инженера по АСУТП: проектирование и разработка. Вологда : Инфра Инженерия, 2008.

#### References

1. Besekerskiy V. A., Popov E. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of automatic control systems). St. Petersburg, Professiya, 2003, 752 p.
2. Mirzaev R. A., Smirnov N. A., Smirnov A. N. *Vestnik SibGAU*, 2011, № 5 (38), pp. 62–64.
3. Maslennikov V. *Mnogolikiye servo*. (Multifaceted servo). Available at: [http://hobbyarea.ru/article\\_info.php?articles\\_id=39](http://hobbyarea.ru/article_info.php?articles_id=39) (accessed 20 November 2012).
4. 8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash – Atmel Corporation, 2010. Available at: <http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf> (accessed 8 November 2012).
5. Semenov M. *AVR kratkiy uchebnyy kurs* (AVR short training course). Available at: <http://proavr.narod.ru/> (accessed 1 December 2012).
6. Fedorov Yu. N. *Spravochnik inzhenera po ASUTP: proektirovanie i razrabotka* (Reference book Engineer SCADA: design and development). Vologda, Infra Inzheneriya, 2008, 928 p.

© Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А., 2013

## ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА МДО-ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Е. В. Вахтеев, Е. Г. Алексеева, И. В. Башков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: michla@mail.ru

*Проведены исследования процесса формирования поверхностного слоя при микродуговом оксидировании. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению структуры и состава оксидных покрытий на алюминиевых сплавах. В результате проведенных исследований установлено, что, в отличие от имеющихся представлений о начальных стадиях процесса микродугового оксидирования, «барьерный слой» растет неравномерно по площади образца. Четкой границы между доискровым и искровым режимами процесса не выявлено. Неравномерность нарастания «барьерного слоя» связана с различным распределением напряженности электрического поля по поверхности образца и концентрации компонентов электролита. В зависимости от применяемых электролитов внутренние слои покрытий состоят, в основном, из оксида алюминия, а внешние слои содержат компоненты, сформированные в результате термохимических преобразований электролита.*

*Ключевые слова:* микродуговое оксидирование, алюминиевые сплавы, элементный анализ.

## PROCESS OF FORMATION OF THE STRUCTURE AND COMPOSITION OF MAO-COATINGS ON ALUMINUM ALLOYS

A. E. Miheev, A. V. Girm, E. V. Vahteev, E. G. Alekseeva, I. V. Bashkov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail : michla@mail.ru

*The investigations of the formation of the surface layer during microarc oxidation are performed. The results of experimental studies on determination of the structure and composition of the oxide coatings on aluminum alloys are presented. The studies revealed that as a distinct of the existing ideas about the initial stages of micro-arc oxidation the "barrier layer" grows unevenly over the area of a sample and the clear boundary between pre-spark and spark regimes of the process. The uneven growth of the "barrier layer" is associated with a different distribution of the electric field on the surface of the sample and the concentration of the electrolyte components. According to the used electrolyte the inner coating layers composed mainly of alumina, and the outer layers contain components formed by the electrolyte thermochemical transformation.*

*Keywords:* microarc oxidation, aluminum alloy, elemental analysis.

Микродуговое оксидирование (МДО) – перспективный способ поверхностного упрочнения деталей из вентильных металлов (Al, Ti, Mg и др.), который позволяет получать керамикоподобные покрытия с высокими механическими, электро- и теплофизическими характеристиками [1–5]. Процесс образования МДО-покрытий обладает сложным механизмом и состоит из нескольких стадий, протекающих последовательно – доискровой, искровой, микродуговой и дуговой периоды. Формирование покрытий происходит в результате одновременного воздействия нескольких факторов, таких как плазмохимические, термические, гидродинамические [1]. Все эти три фактора действуют одновременно, хотя степень их воздействия различна в зависимости от условий обработки. Несмотря на большое количество работ, посвященных изучению процесса формирования МДО-покрытий, единой теории механизма образования и роста покрытий в настоящее время нет. Практически все исследователи сходятся во мнении,

что процесс формирования покрытия начинается в доискровой период обработки (1–20 с после начала обработки – в зависимости от плотности тока). По наиболее распространенной версии считается, что в этот период происходит образование тонкого оксидного слоя, аналогично традиционному анодированию. Некоторые исследователи считают, что этот слой аморфный и безпористый [1; 2; 6], другие, наоборот, утверждают, что этот слой имеет высокую пористость [7–9]. В дальнейшем (искровой период), по мнению авторов [1; 2], происходит электрический пробой плотной анодной пленки в местах зарождения электронных лавин. Часть энергии электронов превращается в теплоту, что значительно повышает температуру в канале пробоя. В местах контакта каналов пробоя с раствором происходит взаимодействие расплавленного вещества пленки с компонентами электролита. В результате таких процессов в МДО-слое наблюдается высокотемпературная модификация оксида алюминия  $\alpha$  –  $Al_2O_3$ .

По другой теории [7–9], в порах анодного покрытия возникает пузыри парогазовой фазы, которые формируются в результате электролиза. Затем в этих пузырях возникают электрические разряды, которые являются мощным тепловым источником и причиной возникновения ионизации газа и ударных волн. Искровой разряд приводит к разложению молекул кислорода в газовом пузыре на атомы, которые под действием ударной волны приобретают значительную кинетическую энергию, благодаря чему проникают вглубь металла.

Таким образом, множество предлагаемых теорий формирования покрытия можно разделить на две основные группы [10]: ионный пробой, причиной которого считают внедрение в оксид ионов электролита и, соответственно, локальный рост его ионной проводимости и электронный пробой, причиной, которого считают «инжектирование» электронов в зону проводимости оксида и электронную лавину, возникающую вследствие ударной ионизации.

Дальнейший рост покрытия обусловлен двумя параллельно протекающими процессами [7–9]:

- экзотермическим взаимодействием окислителей с ювенильной поверхностью дна каналов микропор с последующим окислением испаряющихся атомов металлических компонентов сплава;

- осаждением на поверхности покрытия или втягиванием в каналы микропор оксидов после плазмо- и термохимических преобразований составляющих электролит.

Корректные представления о механизме протекания МДО алюминиевых сплавов позволяют управлять этим процессом и получать покрытия с требуемыми структурой и свойствами.

Для выявления механизма формирования МДО-покрытия в работе проведено определение структуры и состава покрытия на всех стадиях процесса.

Первым этапом исследований являлось определение динамики формирования МДО-покрытий на начальных стадиях (рис. 1). В качестве образца использовалась пластина из сплава АМг-6 размерами 16×20 мм толщиной 3 мм. Для получения качественного изображения структуры на оптическом микроскопе образец был предварительно отполирован. Микроструктура образца без обработки представлена на рис. 1, а. Нанесение покрытий производилось на установке ИАТ-Т в щелочном электролите, содержащем NaOH (5 г/л) и Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10 г/л). Установка ИАТ-Т позволяет осуществлять независимую регулировку анодной и катодной составляющих тока.

Для проведения исследований начальных стадий формирования МДО-покрытий использовали следующие параметры: соотношение  $I_k / I_a = 1$ , плотность тока 10 А/дм<sup>2</sup>. Время обработки: 5, 15, 25, 40, 55, 300 с. После каждой обработки образец промывали, сушили и исследовали микроструктуру поверхности на оптическом микроскопе НЕОРНОТ 32 при увеличениях х250–х800. После этого образец помещали в электролитическую ванну и продолжали обработку до следующего временного интервала.

В результате экспериментальных исследований выявлено, что первые искровые разряды появляются на поверхности образца через 15 с после начала обработки (рис. 1, б–г). Напряжение при этом составляло 250 В. Можно наблюдать места пробоя микропоров, возникающих после 15 с от начала процесса МДО (рис. 1, г). До этого покрытие формируется на поверхности образца электрохимическим способом, и очаги нарастания покрытия (барьерный слой) расположены по образцу не равномерно (рис. 1, б–г). Расположение мест пробоя барьерного слоя сформированного электрохимическим способом (доискровая стадия) можно наблюдать на рис. 1, г–е.

Таким образом, можно сделать вывод, что покрытие растет неравномерно по площади образца, и нельзя различать четкий переход от доискровой к искровой стадии по поверхности всего образца, переход осуществляется в местах, где образовался барьерный слой, достаточной толщины (по нашим измерениям 1–2 мкм). Данное наблюдение не согласуется с имеющимися представлениями о стадийности нанесения МДО-покрытий. Неравномерность нарастания «барьерного слоя» с последующей искровой стадией на нем, по нашим представлениям, возможно связана с неравномерностью распределения напряженности электрического поля по поверхности образца, неравномерностью концентрации действующих веществ электролита.

На втором этапе исследования определяли влияние параметров обработки на формирование микроструктуры в стадии роста.

В качестве образца использовались пластины, выполненные из сплава АМг-6 размером 100×100 мм толщиной 3 мм, без предварительной обработки. Покрытия наносились на установке ИАТ-Т в двух типах электролитов:

- 1) NaOH (5 г/л) + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (10 г/л);
- 2) Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> · 12H<sub>2</sub>O (40 г/л), Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> · 10H<sub>2</sub>O (30 г/л), NaF (10 г/л), H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (20 г/л).

В процессе обработки изменялись следующие параметры:

Для электролита 1: плотность тока составляла от 10 до 20 А/дм<sup>2</sup>, время обработки – от 30 до 60 мин.

Для электролита 2: плотность тока составляла от 30 до 60 А/дм<sup>2</sup>, время обработки – от 5 до 30 мин.

Электронно-микроскопические исследования проводились в «Центре коллективного пользования Сибирского федерального университета» на растровом электронном микроскопе JSM-7001F при увеличениях от х500 до х10 000. Поперечный срез приготовлен методом механического утонения.

Результаты показывают, что в зависимости от времени обработки меняется динамика роста покрытия (рис. 2). Рост покрытия вглубь образца, с большими и ярко выраженными пробойными каналами показан на рис. 2, а–г. С течением времени и увеличением плотности тока (рис. 2, д) происходит закупоривание пробойных каналов посредством осаждения и втягивания в них оксидов, полученных в результате термохимических преобразований составляющих электролита (в данном исследовании оксиды кремния и фосфора).

Результаты проведенных исследований показывают различия в структуре сформированных покрытий в зависимости от используемого электролита (рис. 3). При этом различия касаются именно внешнего слоя, образуемого в результате термохи-

мических преобразований электролита. Внутренняя структура покрытия, различимая в каналах пробоя (рис. 3, б) остается практически неизменной, так как сформирована оксидированием поверхности образца и состоит из  $Al_2O_3$ .

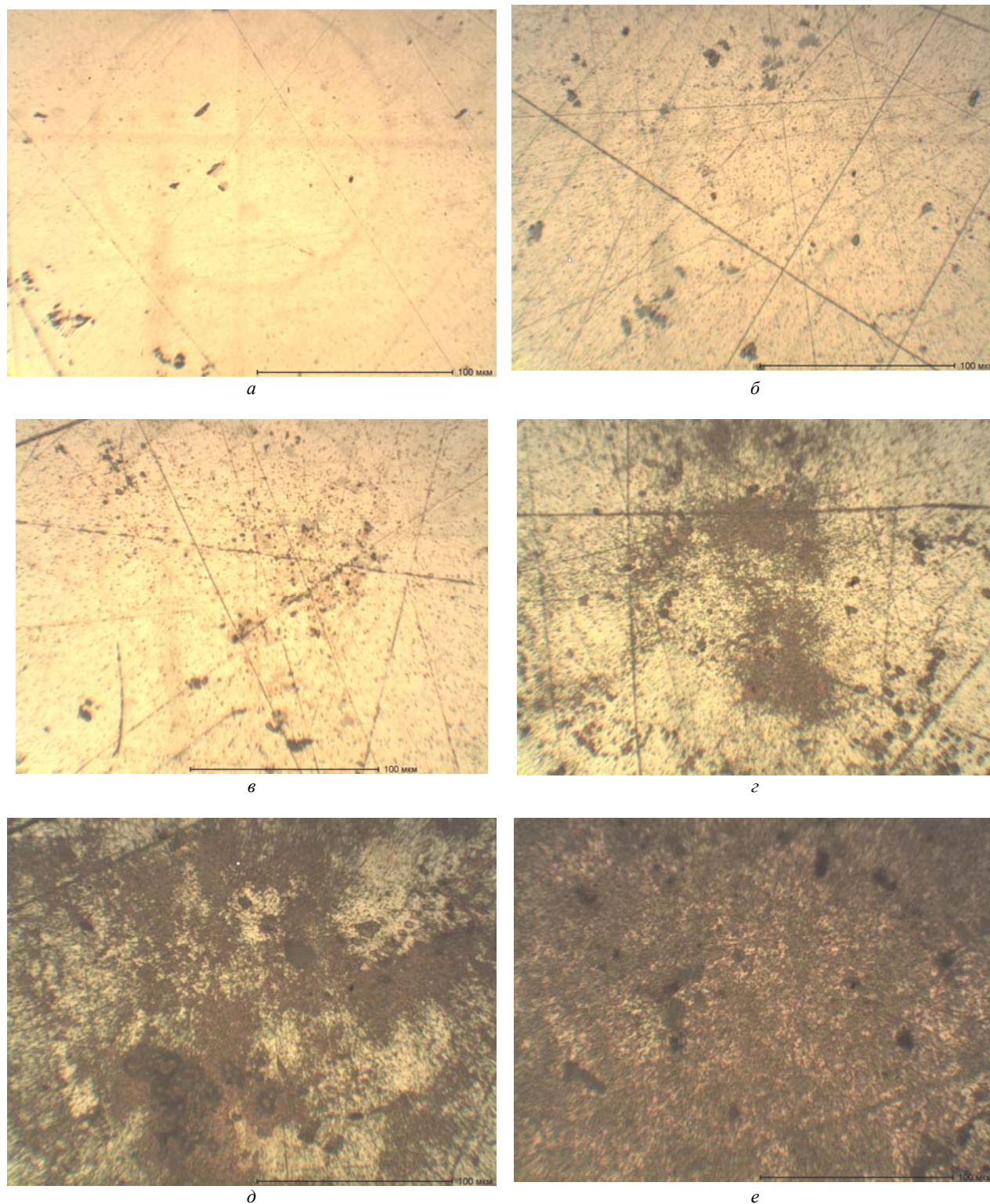
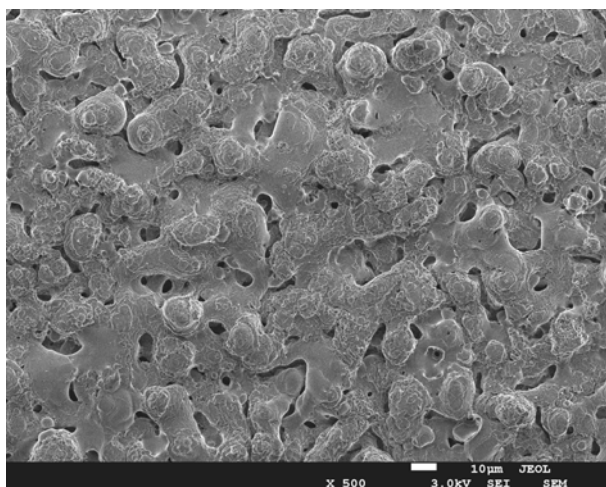
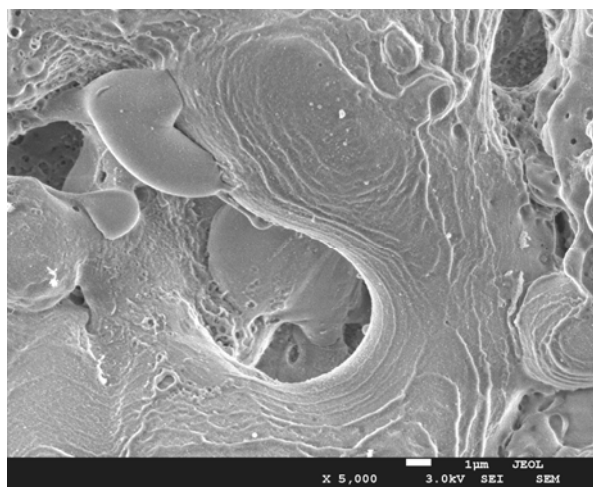


Рис. 1. Микроструктура МДО-покрытий на начальных стадиях формирования:  
 а – исходное состояние образца, x500; б – обработка в течение 5 с, увеличение x500;  
 в – обработка в течение 15 с, увеличение x500; г – обработка в течение 25 с, увеличение x500;  
 д – обработка в течение 55 с, увеличение x500; е – обработка в течение 300 с, увеличение x500

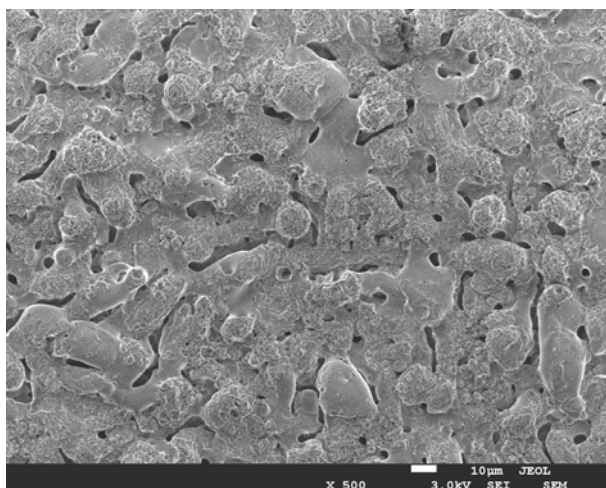




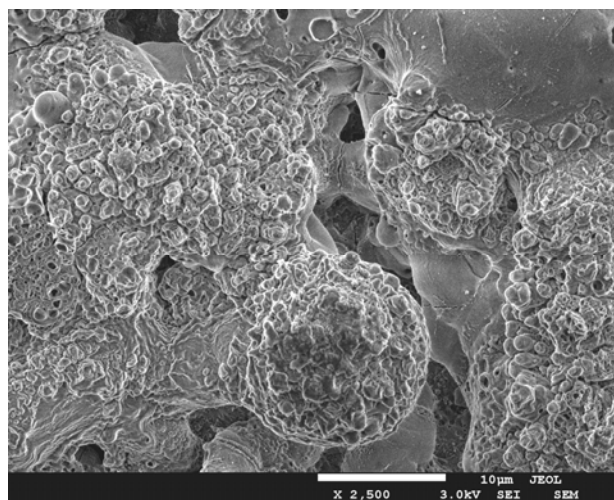
*a*



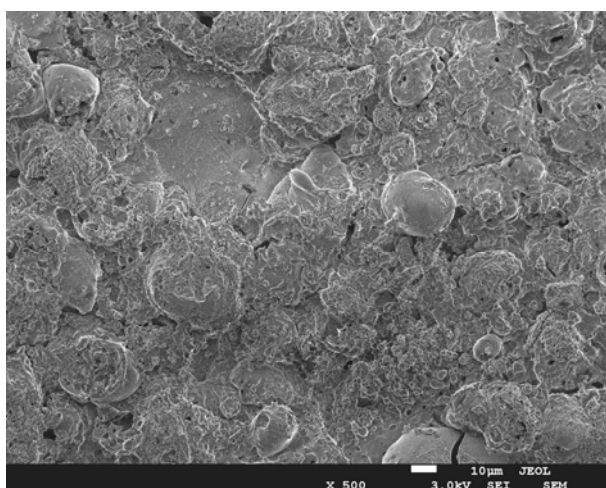
*б*



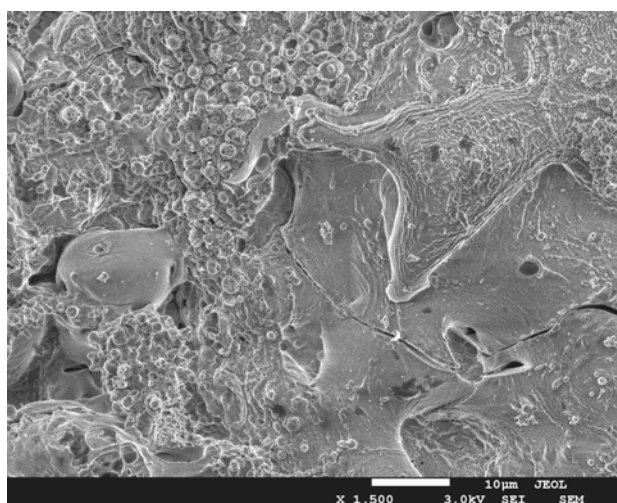
*в*



*г*

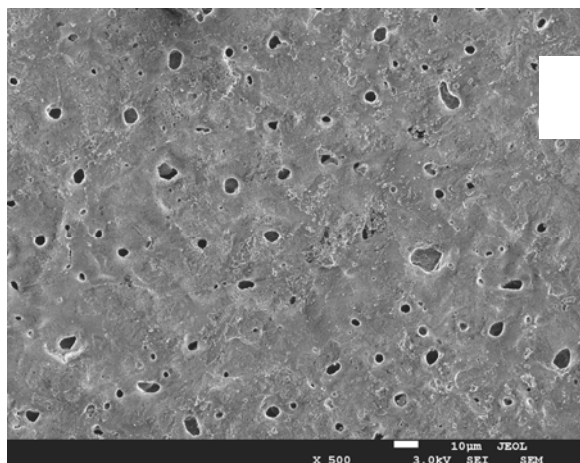


*д*

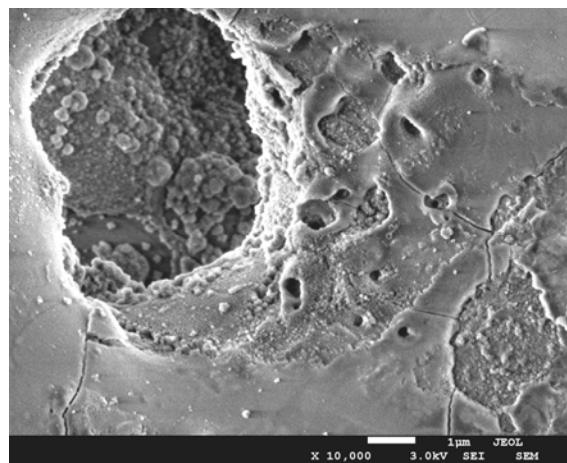


*е*

Рис. 2. Микроструктура МДО-покрытий, обработанных в электролите 1:  
*a* –  $i = 20 \text{ A/дм}^2$ ,  $t = 30 \text{ мин}$ ,  $h = 21 \text{ мкм}$ ,  $\times 500$ ; *б* –  $i = 20 \text{ A/дм}^2$ ,  $t = 30 \text{ мин}$ ,  $h = 21 \text{ мкм}$ ,  $\times 3\,000$ ;  
*в* –  $i = 10 \text{ A/дм}^2$ ,  $t = 60 \text{ мин}$ ,  $h = 24 \text{ мкм}$ ,  $\times 500$ ; *г* –  $i = 10 \text{ A/дм}^2$ ,  $t = 60 \text{ мин}$ ,  $h = 24 \text{ мкм}$ ,  $\times 2\,500$ ;  
*д* –  $i = 20 \text{ A/дм}^2$ ,  $t = 60 \text{ мин}$ ,  $h = 42 \text{ мкм}$ ,  $\times 500$ ; *е* –  $i = 10 \text{ A/дм}^2$ ,  $t = 60 \text{ мин}$ ,  $h = 42 \text{ мкм}$ ,  $\times 1\,500$

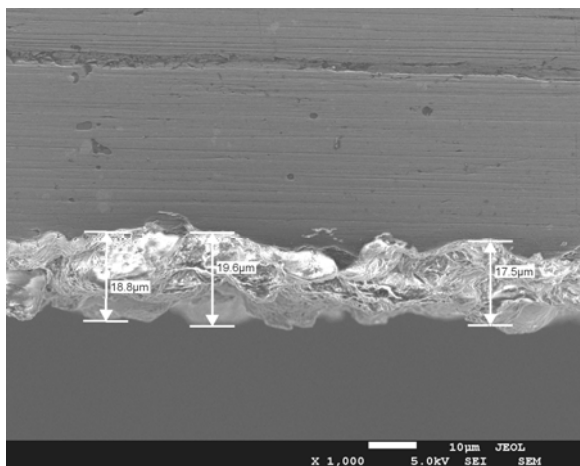


а

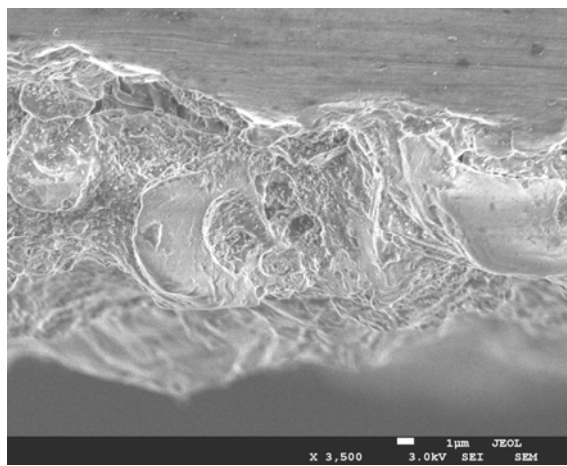


б

Рис. 3. Микроструктура МДО-покрытий, обработанных в электролите 2:  
 а –  $i = 30 \text{ А/дм}^2$ ,  $T = 5 \text{ мин}$ ,  $h = 15 \text{ мкм}$ ,  $\times 500$ ; б –  $i = 30 \text{ А/дм}^2$ ,  $T = 5 \text{ мин}$ ,  $h = 15 \text{ мкм}$ ,  $\times 10\,000$



а



б

Рис. 4. Микроструктура МДО-покрытий, обработанных в электролите 1:  
 $i = 20 \text{ А/дм}^2$ ;  $t = 30 \text{ мин}$ ;  $h = 21 \text{ мкм}$ : а –  $\times 1\,000$ ; б –  $\times 1\,500$

На электронно-микроскопических изображениях видны внутренние поры «частиц», диаметр пор составляет порядка 0,1–0,2 мкм, диаметр макропор равен 5–10 мкм.

Проанализируем микроскопические исследования поперечного слоя получаемых покрытий (рис. 4).

Покрытие состоит из двух слоев, не имеющих четкой границы раздела. Внутренний слой имеет размеры около 16 мкм и сформирован из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Внешний слой имеет размеры около 5 мкм и состоит из материала, который получен электрохимическим преобразованием электролита.

На заключительном этапе исследований определили химический состав формируемых покрытий. Результаты представлены на рис. 5.

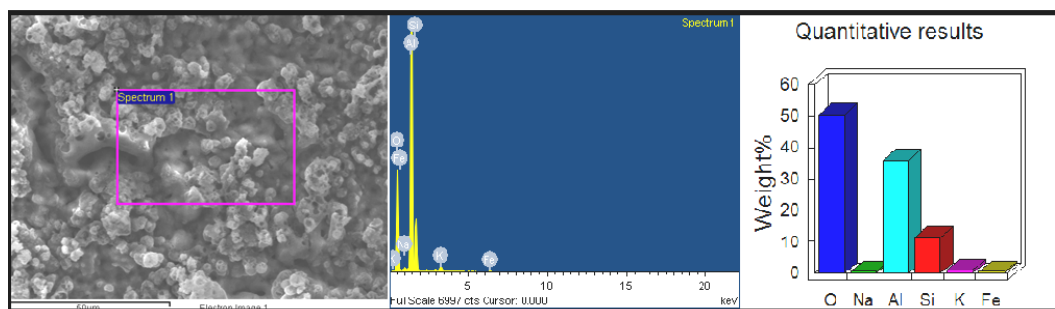
В качестве образцов использовались пластины, изготовленные из сплава АМг-6 100×100 мм, толщиной 3 мм, без предварительной обработки. Нанесение покрытий производили в электролите 1. Плотность тока составляет 20 А/дм<sup>2</sup>, время обработки – от 5 до 120 мин.

Микроанализ химического состава проводили на сканирующем электронном микроскопе GEOL GSM6380, позволяющем измерять поверхностно-

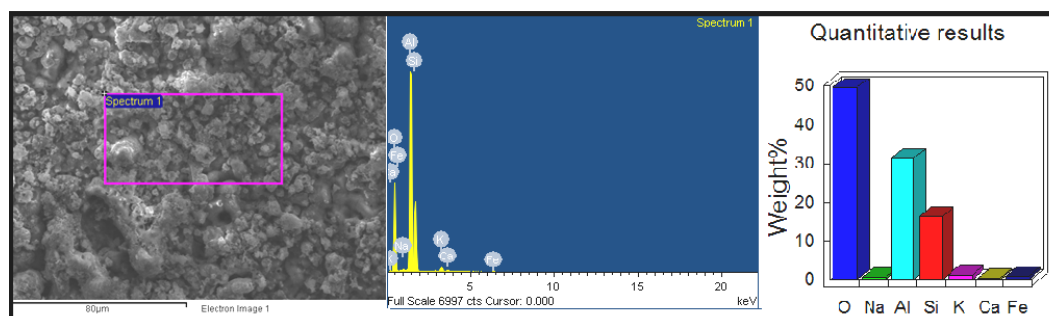
химический состав с глубиной проникновения зондирующего излучения от 1 до 3 мкм и выявлять элементы с атомной массой более 3 а.е.м.

Представленный выше микроанализ покрытий различной толщины показывает, что состав получаемых покрытий зависит от времени обработки и, как следствие, от толщины покрытия. С увеличением толщины покрытия увеличивается и процентное содержание элементов, полученных в результате термохимических преобразований электролита по отношению к оксиду алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), получаемого посредством оксидирования основания образца.

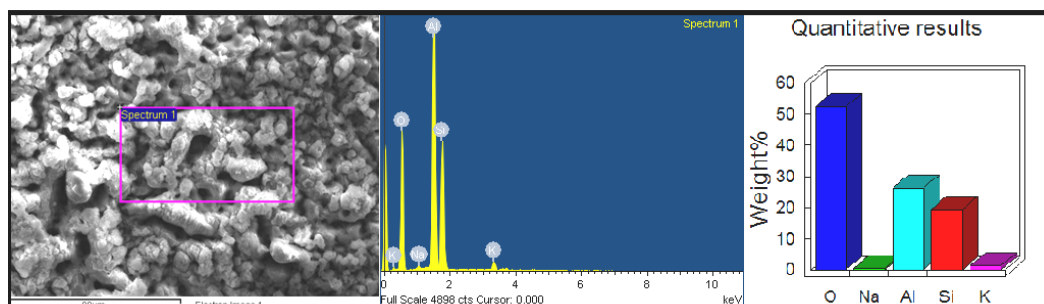
Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что, в отличие от имеющихся представлений о начальных стадиях процесса микродугового оксидирования, «барьерный слой» растет неравномерно по площади образца. Четкой границы между доискровым и искровым режимами процесса не выявлено. Неравномерность нарастания «барьерного слоя» связана с различным распределением напряженности электрического поля по поверхности образца и концентрации компонентов электролита.



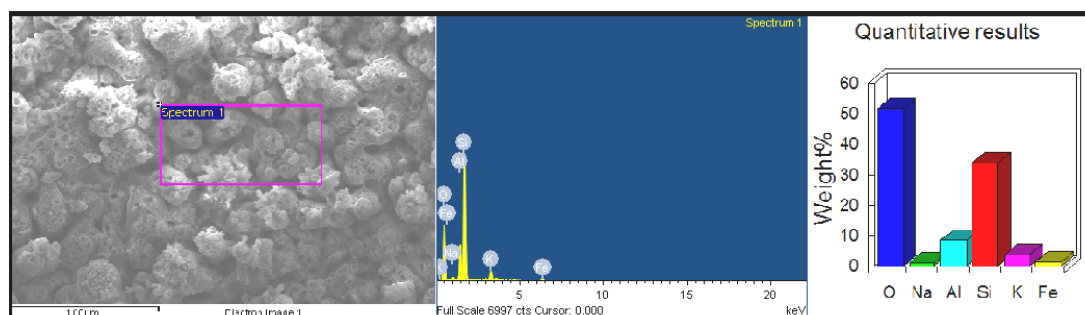
a



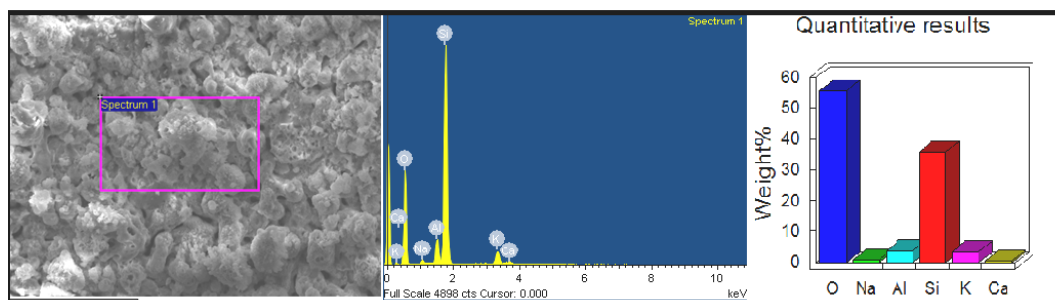
b



в



z



d

Рис. 5. Результаты микроанализа химического состава МДО-покрытий.  
Время обработки: а – 5 мин; б – 10 мин; в – 30 мин; з – 60 мин; д – 120 мин

В зависимости от применяемых электролитов внутренние слои покрытий состоят из оксида алюминия, а внешние слои содержат компоненты, сформированные в результате термохимических преобразований электролита.

#### Библиографические ссылки

1. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин и др. М.: Экомет, 2005.
2. Черненко В. И., Снежко Л. И., Папанова И. И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Л.: Химия, 1991.
3. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, В. В. Стацура и др. // Вестник машиностроения. 2003. № 2. С. 56–63.
4. Гордиенко П. С. О кинетике образования МДО-покрытий на сплавах алюминия // Защита металлов. 1990. Т. 6, № 3. С. 467–470.
5. Мамаев А. И., Мамаева В. А. Сильноточковые микролазменные процессы в растворах электролитов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.
6. Ерохин А. Л. Модель формирования окидных покрытий при плазменно-электролитическом оксидировании алюминия в растворах силикатов // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 5. С. 39–44.
7. Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим процессом / А. Г. Ракоч, В. В. Хохлов, В. А. Баутин и др. // Защита металлов. 2006. Т. 42, № 2. С. 173–184.
8. Ракоч А. Г. Микродуговое оксидирование легких сплавов // Metallurg. 2010. № 6. С. 58–61.
9. Дударева Н. Ю. Моделирование процесса формирования упрочненного слоя при микродуговом ок-

сидировании алюминиевых образцов // Известия вузов. 2008. № 3. С. 63–65. (Сер. Авиационная техника.)

10. Тихоненко В. В., Шкилько А. М. Метод микродугового оксидирования // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/13. С. 13–18.

#### References

1. Suminov I. V., Epelfeld A. V., Lyudin V. B. et al. *Mikrodugovoe oksidirovanie: teoriya, tekhnologiya, oborudovanie* (Microarc oxidation: theory, technology, equipment). Moscow, Ekomet, 2005, 368 p.
2. Chernenko V. I., Snezhko L. I., Papanova I. I. *Poluchenie pokrytiy anodno-iskrovym elektrolizom* (Getting coating the anode-spark electrolysis). Leningrad, Khimiya, 1991, 128 p.
3. Mikheyev A. Ye., Girn A. V., Statsura V. V., Golenkova A. A. et al. *Vestnik mashinostroeniya*. 2003, № 2, pp. 56–63.
4. Gordienko, P.S. *Zashchita metallov*. 1990, vol. 6, № 3, pp. 467–470.
5. Mamaev A. I., Mamayeva V. A. *Sil'notokovye mikrolazmennye protsessy v rastvorakh elektrolitakh* (High current mikrolazmennye processes in solutions of electrolytes). Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2005, 255 p.
6. Erokhin A. L. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 1996, № 5, pp. 39–44.
7. Rakoch A. G., Khokhlov V. V., Bautin V. A., Lebedev N. A. *Zashchita metallov*. 2006, vol. 42, № 2, pp. 173–184.
8. Rakoch A. G. *Metallurg*. 2010, № 6, pp. 58–61.
9. Dudareva N. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatcionnaya tekhnika*. 2008, № 3, pp. 63–65.
10. Tikhonenko V. V., Shkilko A. M. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2012, № 2/13, pp. 13–18.

© Михеев А. Е., Гирн А. В., Вахтеев Е. В., Алексеева Е. Г., Башков И. В., 2013

УДК 541.138.2

### ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ

А. Е. Михеев, Т. В. Трушкина, А. В. Гирн, Д. В. Раводина, С. С. Ивасев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: michla@mail.ru

Рассмотрены химические процессы, протекающие при микродуговом оксидировании (МДО) алюминиевого сплава АМг-6 в силикатно-щелочном электролите; показаны возможные химические превращения в результате взаимодействия компонентов, входящих в состав электролитов; приведены результаты исследований по определению элементного состава получаемых покрытий; установлена зависимость содержания таких оксидных элементных форм, как  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  химического состава покрытия от технологических режимов. Проведенные исследования показывают, что покрытие на образцах алюминиевого сплава состоит из двух основных оксидных элементных форм:  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При проведении исследования фазового состава покрытия методом рентгеноструктурного анализа было выявлено, что покрытие, сформированное микродуговым оксидированием на сплаве АМг-6, состоит из  $\alpha$  и  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , причем  $\alpha$  фаза  $\text{Al}_2\text{O}_3$  присутствует только во внутренних слоях покрытия,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  присутствует по всей толщине покрытия, и на внешнем крае покрытия выявлена фаза муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) и оксид кремния  $\text{SiO}_2$ .

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, химические реакции, алюминиевый сплав, элементный анализ.



## CHEMICAL PROCESSES AT MICROARC OXIDATION

A. E. Miheev, T. V. Trushkina, A. V. Girn, D. V. Ravodina, S. S. Ivasev

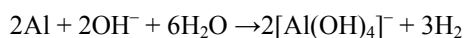
Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: michla@mail.ru

The authors consider the chemical processes occurring during microarc oxidation (MAO) of the aluminum alloy AMG-6 silicate-alkaline electrolyte, the possible chemical changes as a result of interaction of the components included in the electrolyte, the results of studies to determine the elemental composition of the coatings, the dependence of the content of such oxide elemental forms of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  as the chemical composition of the coating process conditions. The studies indicate that the coating of the aluminum alloy samples consists of two basic elements if the oxide forms, such as  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . The study of the phase composition of the coating made with X-ray analysis revealed that the coating formed by oxidizing microarc alloy AlMg-6 consists of  $\alpha$  and  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , with  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and the  $\alpha$  phase is present only in the inner layers of the coating,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  is present throughout all the thickness of the coating, and on the outer edge of the coating the mullite phase ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) and silica  $\text{SiO}_2$  was revealed.

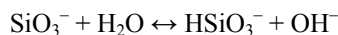
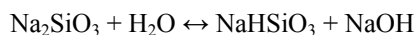
Keywords: microarc oxidation, chemical reaction, aluminum alloy elemental analysis.

Микроплазменное оксидирование является сложным многофакторным процессом. Влияние отдельных факторов на свойства и качество покрытий исследуются достаточно широко, особое внимание уделяют анодно-катодному режиму процесса, который обеспечивает получение покрытий с повышенными физико-механическими характеристиками, такими как адгезия, микротвердость, прочность и износостойкость [1; 2]. Но в данный период по микроплазменным процессам еще нет целостной картины, описывающий весь процесс МДО, в том числе и с точки зрения происходящих химических процессов. Характеристики МДО покрытий в значительной степени зависят от технологических режимов, состава и концентрации электролитов и ряда других факторов. В работе рассмотрены процессы химических превращений в силикатно-щелочном растворе электролита, в котором содержащиеся катионы и/или анионы образуют нерастворимые оксиды, входящие в состав покрытия. Обработке подвергались образцы из алюминиевого сплава АМг-6 в электролите, содержащем 4 г/л NaOH и 10 г/л  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , при следующих технологических режимах: плотность тока  $I = 5\text{--}40 \text{ А/дм}^2$ ; продолжительность оксидирования – 60 мин; соотношение анодной и катодной составляющих силы тока  $I_k/I_a = 0,6\text{--}1,4$ ; температура электролита –  $15\text{--}40^\circ\text{C}$ . В процессе химических превращений происходит последовательное формирование покрытия переменного фазового состава, содержащее различные аллотропические модификации оксида алюминия:  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и муллита  $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ . Рассмотрим возможные химические реакции, приводящие к их образованию.

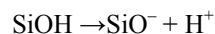
В процессе МДО на поверхности металла возможно растворение алюминия с образованием тетрагидроксоалюмината:



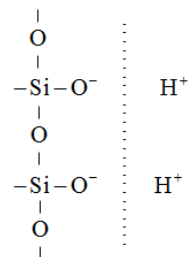
В электролите происходит диссоциация силиката натрия:



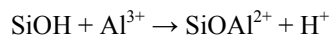
При взаимодействии силикат-иона с водой образуется поликремнекислота  $\text{HSiO}_3$ . Возникшее поверхностное соединение – поликремнекислота – содержит реакционноспособные силанольные группы  $\text{SiOH}$ , способные к частичной диссоциации в воде по кислотному типу:



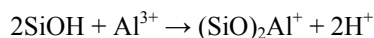
Образующиеся ионы  $\text{H}^+$  переходят в жидкую фазу, но вследствие кулоновского взаимодействия с ионами  $\text{SiO}^-$  образуют внешнюю обкладку в растворе у поверхности твердой фазы. Ионы  $\text{OH}^-$  способствуют диссоциации силанольных ( $\text{SiOH}$ ) групп. Возникает ЭДС с внутренней обкладкой (определяющей отрицательный знак  $\Delta\phi$ ), состоящей из  $\text{SiO}^-$ . Потенциалопределяющими ионами будут ионы, влияющие на степень диссоциации  $\text{SiOH}$ -групп, а именно  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ :



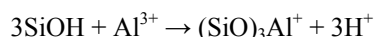
Затем происходит взаимодействие ионов алюминия с одной силанольной группой (образование моодентатного комплекса):



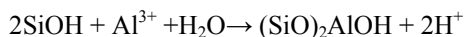
Связывание одного иона алюминия с двумя силанольными группами (образование бидентатного комплекса) выражается формулой



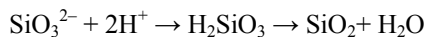
Связывание одного иона алюминия с тремя силанольными группами (образование тридентатного комплекса):



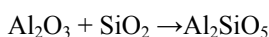
а также образование комплекса, в котором с силанольной группой взаимодействует гидролизированный ион металла:



В этом растворе возможен гидролиз компонентов электролита с последующим термоллизом продуктов гидролиза в зоне разряда:

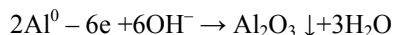
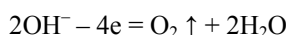


Авторы работы [1] считают, что разлагаясь, при высоких температурах кремниевая кислота дает диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  в виде  $\alpha$ -кristобалита и  $\alpha$ -кварца, и воду, а далее возможно образование силиманита на алюминиевом электроде по реакции

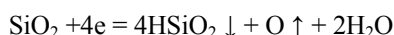
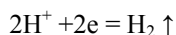
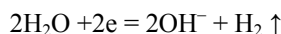


Если в составе электролита есть силикаты, то образующийся из них в разряде оксид кремния при нагреве с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и другими оксидами металлов может дать тугоплавкие и термически стойкие вещества, не взаимодействующие с растворами большинства кислот и щелочей – алюмосиликаты, такие, как ортоклаз  $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ , альбит  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ , нефелин  $\text{Na}[\text{AlSiO}_4]$  [3].

При МДО выделяют реакции анодного и катодного полупериода [3]. В анодный полупериод будут протекать реакции растворения алюминия, образование кислорода из гидроксид-ионов и оксида алюминия:



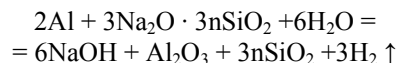
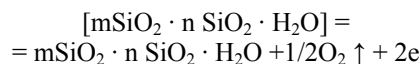
В катодный полупериод будет происходить восстановление воды, ионов водорода и оксидов металлов, входящих в состав покрытия:



В присутствии метасиликата натрия в анодный полупериод становится возможным разряд ионов  $\text{HSiO}_3^-$  – продуктов гидролиза метасиликата натрия:



Кроме того, при повышенных температурах в каналах пробоя пленки может протекать химическая реакция алюминия с метасиликатом натрия, приводящая к образованию силикатов типа  $n\text{SiO}_2$  и  $m\text{SiO}_2$  алюмосиликатов с фазами –  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (муллит),  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  (каолин),  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  (силиманит):



На поверхности металла возможно образование неоднородного покрытия, включающего оксид алюминия и поверхностные комплексы, образующиеся в результате взаимодействия с силанольными группами, а также формирование покрытия переменного фазового состава, содержащего различные аллотропические модификации оксида алюминия ( $\alpha$  –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и муллита ( $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

В работе были проведены исследования по выявлению химического состава полученных покрытий на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL Quant'x. По результатам элементного анализа на образцах алюминиевого сплава АМг-6, обработанных МДО в силикатно-щелочном электролите, было выявлено содержание таких оксидных элементных форм, как  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 1), содержание которых зависит от технологических режимов.

В работе [4] установлено, что покрытие, сформированное микродуговым оксидированием на сплаве АМг-6, состоит из  $\alpha$  и  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , причем  $\alpha$  фаза  $\text{Al}_2\text{O}_3$  присутствует только во внутренних слоях покрытия,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  присутствует по всей толщине покрытия и на внешних слоях покрытия выявлена фаза муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) и оксида кремния  $\text{SiO}_2$ . Изменение количественного соотношения фазовых составляющих  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от плотности тока  $I_s$  и отношения  $I_k/I_a$  представлены на рис. 2.

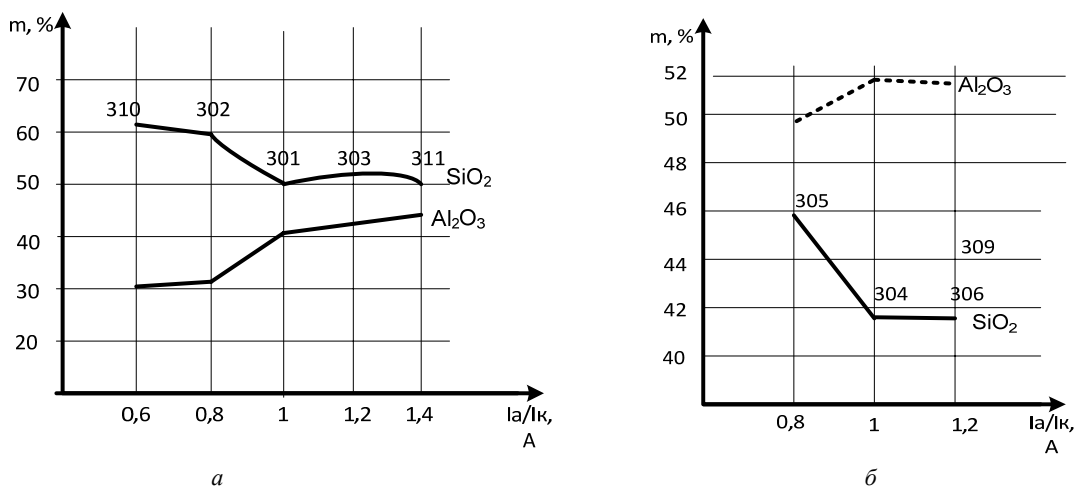


Рис. 1. Изменение химического состава МДО-покрытия в зависимости от  $I_k/I_a$ :  
а – плотность тока 20 А/дм²; б – плотность тока 10 А/дм²

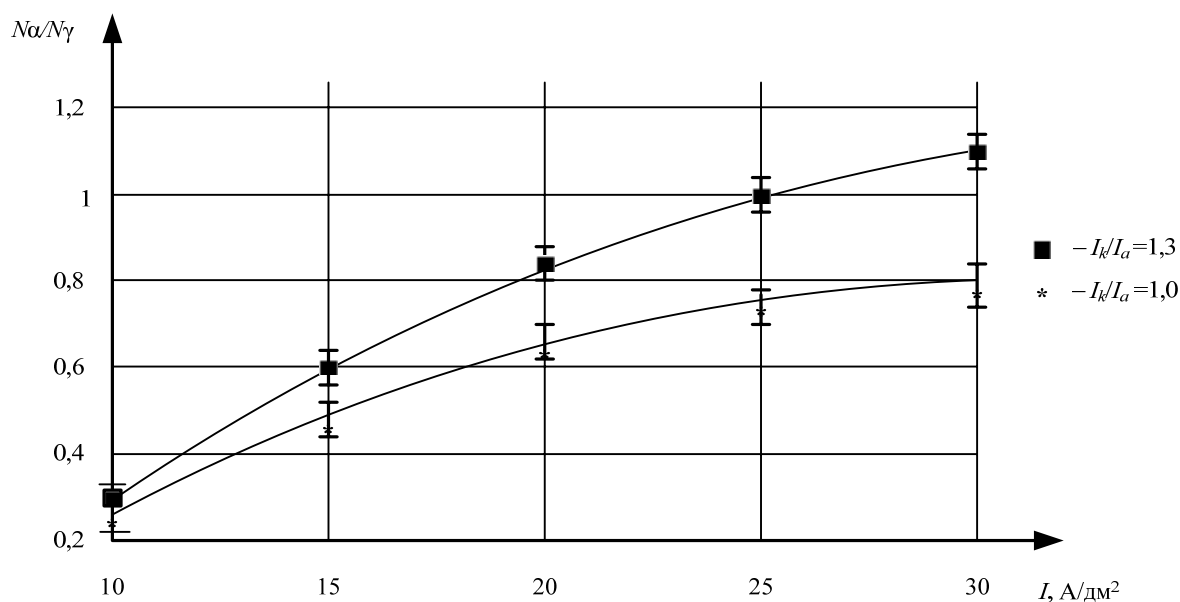


Рис. 2. Изменение количественного соотношения фазовых составляющих  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от плотности тока:  
 ■ –  $I_k/I_a = 1,3$ ; \* –  $I_k/I_a = 1,0$

Повышение содержания модификации  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в покрытии, происходит за счет роста плотности тока и увеличения отношения  $I_k/I_a$ .

В процессе химических превращений происходит последовательное формирование покрытия переменного фазового состава, содержащее различные аллотропические модификации оксида алюминия:  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  и муллита  $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Экспериментально подтверждено, что образование различных аллотропических модификаций, содержание той или иной фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и муллита зависит от режимов обработки: соотношения анодной и катодной составляющих силы тока и плотности тока.

#### Библиографический список

1. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И. В. Суминов и др. М. : ЭКОМЕТ, 2005.
2. Формирование наноструктурных неметаллических неорганических покрытий путем локализации высокоэнергетических потоков на границе раздела фаз / А. И. Мамаев, В. А. Мамаева, В. Н. Бориков, Т. И. Дорофеева. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2010.
3. Кузнецов Ю. А., Кулаков К. В., Гончаренко В. В. Особенности выбора электролита для получения толстослойных керамических покрытий [Электронный ресурс]. URL: [http://science-bsea.narod.ru/2011/mashin\\_2011\\_14/kuznecov\\_texno.htm](http://science-bsea.narod.ru/2011/mashin_2011_14/kuznecov_texno.htm).
4. Обобщенная модель микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / А. Е. Михеев, В. В. Ста-

цупа, А. А. Голенкова, С. С. Ивасев // Перспективные материалы, технологии, конструкции : сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. КГАЦМиЗ. Красноярск, 2002. С. 136–141.

#### References

1. Suminov I. V. et al. *Mikrodugovoe oksidirovanie (teoriya, tehnologiya, oborudovanie)* (Microarc oxidation (the theory, technology, equipment)). Moskov, EKOMET, 2005, 368 p.
2. Mamaev A. I., Mamaeva V. A., Borikov V. N., Dorofeeva T. I. *Formirovanie nanost-rukturnyh nemetallicheskih neorganicheskikh pokrytii putem lokalizatsii vysokoenergeticheskikh potokov na granice razdela faz* (Formation of nanostructured inorganic non-metallic coatings by the localization of high-energy fluxes at the interface). Tomsk, 2010, 360 p.
3. Kuznecov Yu. A., Kulakov K. V., Goncharenko V. V. *Osobennosti vybora elektrolita dlya polucheniya tolstosloynnykh keramicheskikh pokrytii* (Features choice of electrolyte to produce thick ceramic coatings). Available at: [http://science-bsea.narod.ru/2011/mashin\\_2011\\_14/kuznecov\\_texno.htm](http://science-bsea.narod.ru/2011/mashin_2011_14/kuznecov_texno.htm).
4. Miheev A. E., Statsura V. V., Golenkova A. A., Ivasev S. S. *Sb. nauch. tr. Vseros. nauch.-tekhn. konf. "Perspektivnyye materialy, tekhnologii, konstruksii"* (Fri. Scientific. tr. All-Russia. scientific and engineering. Conf "Advanced materials, technology, design"). Krasnoyarsk, 2002, pp. 136–141.

© Михеев А. Е., Трушкина Т. В., Гирн А. В., Раводина Д. В., Ивасев С. С., 2013

УДК539.234

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ОСТАТОЧНОГО И ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗОВ В КАМЕРЕ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ

А. Е. Михеев<sup>1</sup>, В. А. Харламов<sup>2</sup>, С. Д. Крючек<sup>2</sup>, А. А. Чернятина<sup>2</sup>, И. И. Хоменко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: michla@mail.ru

<sup>2</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Россия, 662972, Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

*С помощью квадрупольного масс-спектрометра исследован состав остаточного газа в вакуумной камере установки АРМ НТП при подготовке оборудования к отработке технологии магнетронного напыления радиоотражающих покрытий. Показано, что при напуске в камеру чистого аргона, в составе плазмообразующего газа может содержаться до 0,3 % примесей из состава остаточного газа камеры, включая 0,02 % воды и кислорода. Большое содержание углеродсодержащих газов показывает на присутствие остатков использованных растворителей, сорбированных в резиновых уплотнителях, зазорах оснастки и в других элементах камеры. Для уменьшения загрязнения плазмообразующей атмосферы камеры и повышения чистоты состава и свойств покрытий, потребуются дополнительные меры по очистке и обезгаживанию поверхностей камеры от остатков влаги и углеродсодержащих соединений. Для обеспечения минимального загрязнения напыляемого покрытия необходимо принятие мер по тщательной очистке и обезгаживанию поверхностей камеры от остатков влаги и углеродсодержащих соединений.*

*Ключевые слова:* радиоотражающие покрытия, вакуумное нанесение покрытий, плазмообразующий газ.

## STUDY OF COMPOSITION OF RESIDUAL AND PLASMA-FORMING GASES IN THE VACUUM COATERS

A. E. Miheev<sup>1</sup>, V. A. Harlamov<sup>2</sup>, S. D. Kryuchek<sup>2</sup>, A. A. Chernyatina<sup>2</sup>, I. I. Homenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: michla@mail.ru

<sup>2</sup>JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev"  
52 Lenin st., Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: vah@iss-reshetnev.ru

*With the help of a quadrupole mass spectrometer the authors study the composition of the residual gas in a vacuum chamber installation ARM NTP in the preparation of equipment for mining technology radio-reflective magnetron sputtering coating. It is shown that at filling the chamber with pure argon the plasma gas may contain up to 0.3 % of residual impurities from the gas chamber, including water and 0.02 % oxygen. The high content of carbon-containing gases shows the presence of residues of the solvents used, sorbed in rubber seals, equipment and gaps in other parts of the camera. To reduce the contamination of plasma-forming chamber atmosphere and to improve the purity of the composition and properties of the coatings the additional cleaning and degassing chamber surfaces of residual moisture and carbon-containing compounds are required. To ensure the minimum contamination of the sprayed coating it is necessary to take measures for thorough cleaning and degassing of the chamber surfaces from residual moisture and carbon-containing compounds.*

*Keywords:* Radio-reflective coatings, vacuum coating, plasma gas.

Процессы распыления мишени и конденсации покрытия происходят в газовой среде, содержащей компоненты остаточной атмосферы вакуумной камеры. В состав остаточной атмосферы за счет натекания, десорбции со стенок и газовой выделения из напыляемых деталей или образцов входят различные, в том числе химически активные газы – вода, азот, кислород, углеводороды, водород, диоксид углерода. Относительные количества перечисленных компонентов зависят от множества факторов. В лабораторном и производственном оборудовании, работающем в вакууме не выше  $10^{-4}$  Па, сумма парциальных давлений воды, азота

и кислорода составляет обычно большую часть от давления остаточного газа [1]. Степень загрязнения плазмообразующего газа будет зависеть от давления остаточного газа, характерного для каждой вакуумной камеры с учетом ее предыстории до напыления, свойств и количества загруженных для напыления изделий и рабочего давления плазмы в процессе распыления мишеней. К типичным давлениям процесса магнетронного напыления алюминия на детали из углепластика относятся: давление остаточного газа  $(1 - 10) \times 10^{-4}$  Па, рабочее давление плазмы 0,07–0,2 Па. Следовательно, можно ожидать объемное содержание

примеси (в том числе химически активных газов) от 0,05 до 1,5 %. Вовлекаемые в рабочую зону плазменного распыления эти активные компоненты атмосферы камеры будут создавать химические соединения: оксиды, нитриды, карбиды с материалом мишеней, которые могут значительно изменить свойства напыляемых покрытий [2].

Анализировали состав остаточного и плазмообразующего газов в камере вакуумной установки АРМ НТП, использованной в разработке технологии напыления многослойного радиоотражающего покрытия (рис. 1).

Основное назначение установки – осаждение многослойных тонкопленочных покрытий на поверхность различных подложек, обработка образцов материалов потоками ионов, проведение ионно-плазменных исследований для научных целей, а также отработка технологических процессов напыления покрытий различного назначения.

Камера установки АРМ НТП состоит из шлюзовой и рабочей камер. Рабочая камера предназначена для проведения процессов магнетронного напыления и плазменной обработки образцов. В рабочей камере установлены магнетроны и ионные источники, системы возвратно-поступательного и вращательного перемещения подложек, экраны для ограничения зоны распыления мишеней магнетронов. Камеры откачиваются механическими и турбомолекулярными насосами.

Рабочая камера установки имеет большую площадь внутренних поверхностей, и в процессе напыления покрытий на стенках камеры, экранах и деталях оснастки осаждаются конденсаты распыляемых материалов. При замене мишеней, проведении регулировок и других работах внутрь камеры напускается атмосфера. Это приводит к тому, что конденсаты на внутренних поверхностях камеры становятся источником поступления в откачиваемый объем газов: воды, компонентов атмосферы: азота, кислорода, углекислоты, а так же газов, выделявшихся подложками в процессе предварительной обработки и напыления.

В процессе подготовки установки АРМ НТП к отработке технологии напыления радиоотражающих покрытий на основе алюминия проведены работы по очистке внутренних поверхностей камеры, экранов

и внутрикамерной оснастки от конденсатов и других загрязнений с окончательной протиркой поверхностей нефрасом и этиловым спиртом.

Для контроля состава остаточного газа на один из свободных фланцев был установлен квадрупольный масс-спектрометр НРQ-2S. Прибор обеспечивает регистрацию масс-спектров в диапазоне от 1 до 100 а.е.м. при максимальном рабочем давлении до 1 Па.

Спектры масс камеры были сняты до проведения работ и после проведения монтажа необходимых мишеней в магнетроны и чистки экранов и стенок камеры в процессе напуска в камеру аргона ГОСТ 10157-79 (высший сорт) для создания плазмообразующей среды.

Масс-спектры остаточного газа после откачки камеры до вакуума  $1,5 \times 10^{-4}$  Па и плазмообразующего газа при напуске аргона, показаны на рис. 2 и 3 соответственно. Расшифровка масс-спектра показывает, что основными компонентами остаточного газа являются вода (пики 16, 17 и 18), парциальное давление  $1,2 \times 10^{-4}$  Па, азот (пики 28 и 14), парциальное давление  $2,2 \times 10^{-5}$  Па, кислород (пики 32 и 16), парциальное давление  $4,5 \times 10^{-6}$  Па, легкие углеводороды (пики 26, 27, 29, 30 и 31) с суммарным парциальным давлением  $1 \times 10^{-5}$  Па, а так же водород, гелий, углерод и фрагменты углеводородов с суммарным парциальным давлением  $1 \times 10^{-6}$  Па.

После напуска в камеру аргона (массы 40 и 20) до давления  $1 \times 10^{-2}$  Па, давления компонентов остаточного газа (включая примеси в аргоне) составили: вода (пики 16, 17 и 18) – парциальное давление  $2 \times 10^{-5}$  Па, азот (пики 28 и 14) – парциальное давление  $2 \times 10^{-5}$  Па, кислород (пики 32 и 16) – парциальное давление  $6 \times 10^{-7}$  Па, углеродсодержащие соединения (пики 15, 19, 21, 26, 27, 29, 35, 36, 37, 38, 39, 41–44) – суммарно парциальное давление  $2,7 \times 10^{-4}$  Па. Давления изотопов аргона  $\text{Ar}^{36}$  и  $\text{Ar}^{38}$  с массовыми числами 36 и 38 из этой суммы исключены. Также в расчет не брали компоненты с парциальными давлениями от  $1 \times 10^{-6}$  Па и менее. В результате получено суммарное содержание примесей в плазмообразующем газе 2,9 %, в том числе воды и кислорода 0,2 %. При дальнейшей откачке камеры до рабочего давления 0,1 Па относительное содержание примесей пропорционально уменьшается до 0,3 %, в том числе воды и кислорода 0,02 %.

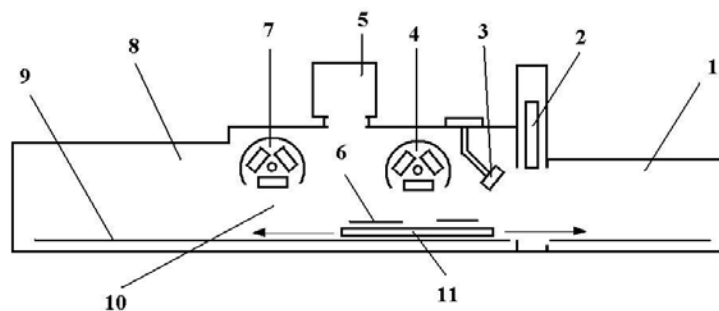


Рис. 1. Схема вакуумной камеры установки АРМ НТП:

- 1 – шлюз; 2 – вакуумный затвор; 3 – ионный источник с замкнутым дрейфом электронов;  
4, 7 – блок магнетронов; 5 – источник газовых ионов с высокой энергией; 6 – ограничивающая щель;  
8 – реверсивная камера; 9 – рельсы; 10 – рабочая камера; 11 – стол системы перемещения

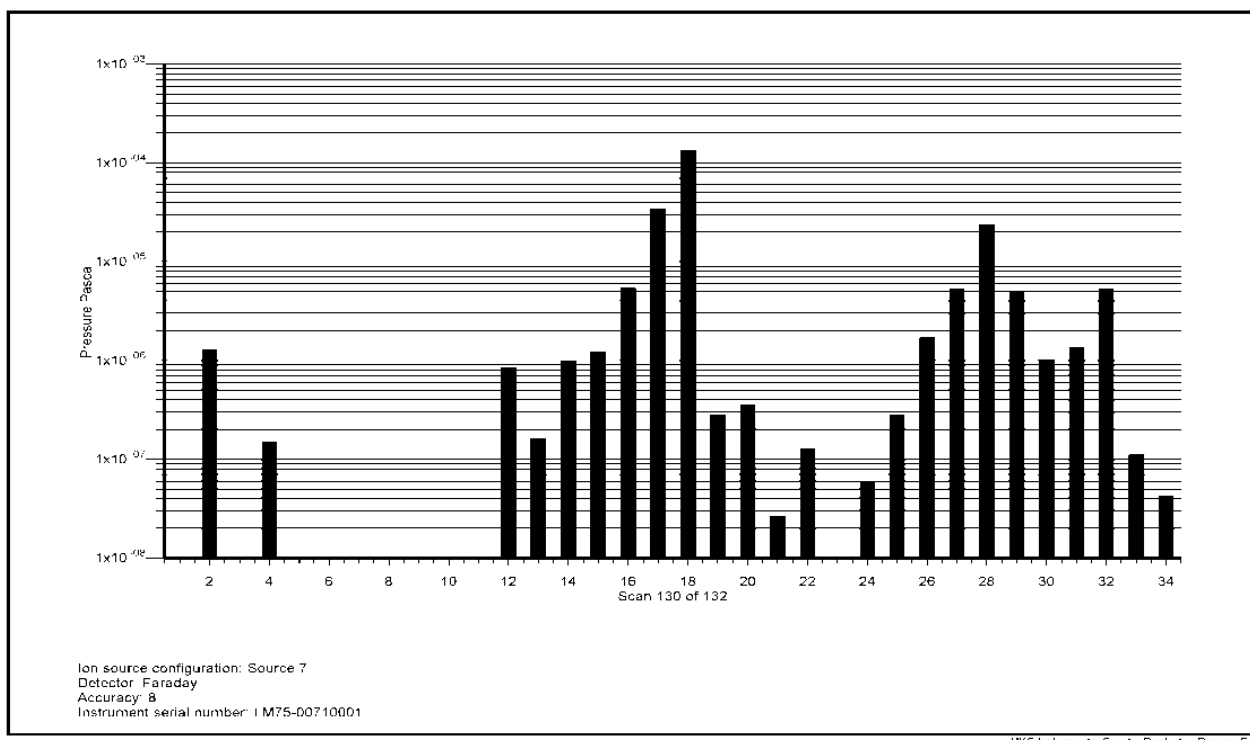


Рис. 2. Масс-спектр остаточного газа после откачки камеры АРМ НТП до предварительного высокого вакуума

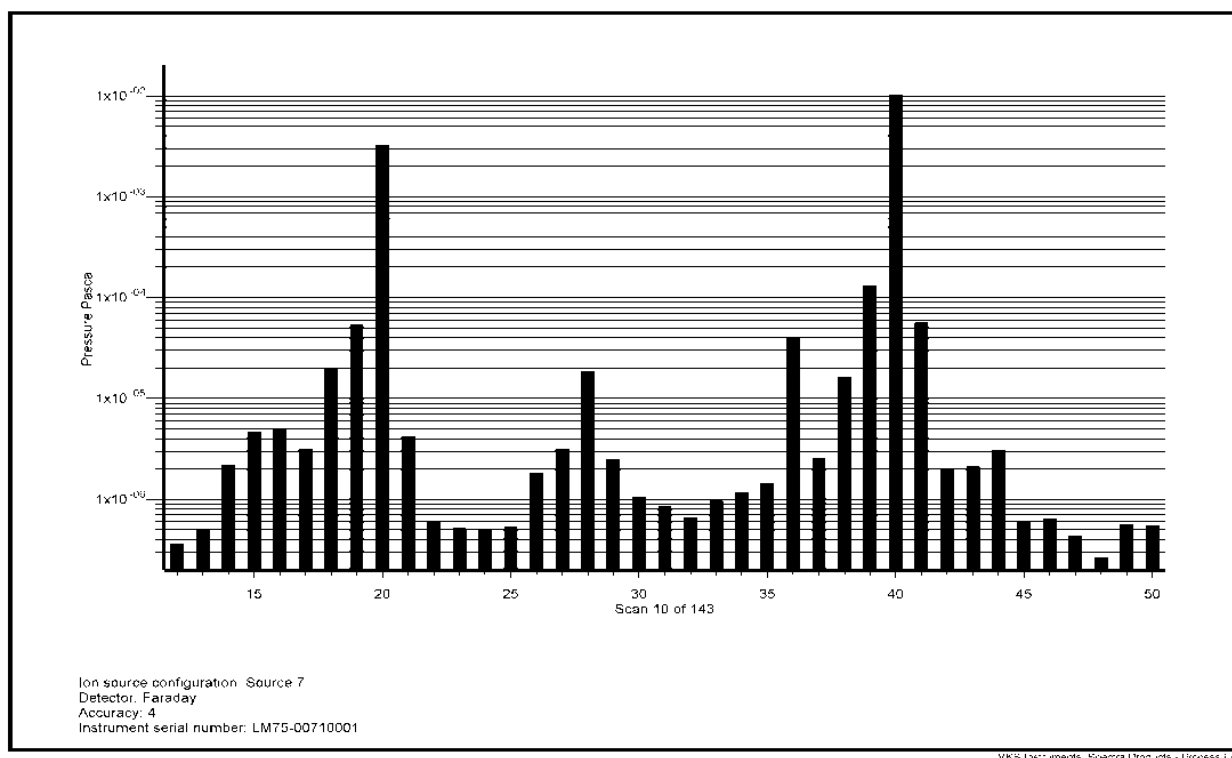


Рис. 3. Масс-спектр плазмообразующего газа в камере АРМ НТП в процессе напуска аргона

Для сравнения, в применяемом аргоне высшего сорта по ГОСТ 10157-79 – содержание примесей следующее: кислород – не более 0,000 7 %, азот – не более 0,005 %, вода – не более 0,000 9 %, углеродсодержащие соединения – не более 0,000 5 %, при содержании аргона – не менее 99,99 % [3]. Сле-

довательно, содержание воды и суммы примесей в плазмообразующем газе более, чем на порядок превышает допускаемый ГОСТом объем примесей в применяемом для напуска аргоне.

Анализ приведенных масс-спектров показывает следующее: после проведения чистки внутренних

поверхностей и откачки камеры до высокого вакуума в остаточном газе камеры и в плазмообразующем газе остается относительно большое количество химически активных газов: воды (массы 16, 17, 18), кислорода, азота, углеводородов (массы 32, 16, 28, 14, 12, 24 и др.). Большое содержание углеродсодержащих газов показывает на присутствие остатков использованных растворителей, сорбированных в резиновых уплотнителях, зазорах оснастки и в других элементах камеры.

Для уменьшения загрязнения плазмообразующей атмосферы камеры и повышения чистоты состава и свойств покрытий, потребуются дополнительные меры по очистке и обезгаживанию поверхностей камеры от остатков влаги и углеродсодержащих соединений.

Содержание компонентов остаточного газа камеры в плазмообразующем газе при магнетронном напылении может значительно превышать содержание примесей в аргоне ГОСТ 10157–79 марки «высший сорт», используемом для напуска в камеру.

Для обеспечения минимального загрязнения напыляемого покрытия необходимо принимать меры по тщательной очистке и обезгаживанию поверхностей камеры от остатков влаги и углеродсодержащих соединений.

Перед началом проведения обработки напыления покрытий целесообразно проводить масс-спектрометрический контроль остаточного и плазмообразующего газов.

#### Библиографические ссылки

1. Холлэнд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме : пер. с англ. М. : Госэнергоиздат. 1962.
2. Палатник Л. С., Сорокин В. К. Материаловедение в микроэлектронике. М. : Энергия, 1977.
3. ГОСТ 10157–79. Аргон газообразный и жидкий. Технические условия. М. : Изд-во стандартов, 1979.

#### References

1. Hollend L. *Nanesenie tonkih plenok v vakuume* (Application of thin films in a vacuum). Moscow, Gosenergoizdat, 1962, 608 p.
2. Palatnik L. S., Sorokin V. K. *Materialovedenie v mikroelektronike* (Materials Science in Microelectronics). Moscow, Energiya, 1977, 280 p.
3. GOST 10157-79. *Argon gazoobraznyi i jidkii. Tehnicheskie usloviya* (GOST 10157-79. Argon gas and a liquid. Specifications). Moscow, Izd-vo standartov, 1979.

© Михеев А. Е., Харламов В. А., Крючек С. Д., Черныгина А. А., Хоменко И. И., 2013

УДК 621.38

### ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ ЛУЧЕВОДОВ ВИБРАЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ХОНИНГОВАНИЕМ

Л. И. Оборина, И. В. Трифанов, Б. Н. Исмаилов, И. В. Стерехов, В. М. Шелковская

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*Показаны особенности процесса вибрационного электрохимического хонингования при удалении дефектного слоя с поверхности зеркала лучевода, изготовленного из сплава 32 НКД методом фрезерования. Малая шероховатость поверхности может быть сформирована по всей обрабатываемой поверхности за счет анодного растворения микронеровностей электрическим полем и механической активацией гребешков микронеровностей, абразивными элементами при вибрации катода инструмента.*

*Ключевые слова: вибрационное электрохимическое хонингование, катод-инструмент, шероховатость, импульс тока, зеркала лучевода, анодное растворение, бегущее электрическое поле.*

### IMPROVEMENT OF QUALITY OF MIRRORS SURFACES OF BEAM GUIDES WITH SHAKY ELECTROCHEMICAL HONING PROCESS

L. I. Oborina, I. V. Trifanov, B. N. Ismailov, I. V. Sterekhov, V. M. Shelkovsky

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sibgau-uks@mail.ru

*The authors describe the features of shaky electrochemical honing process during removal of a defective layer from a mirror surface of a beam guide made of 32 alloy by NKD method of milling. The small inequalities of a surface can be formed all over the processed surface at the expense of anode dissolution of micro inequalities by electric field and mechanical activation of combs of micro inequalities by abrasive elements at vibration of the cathode of the tool.*

*Keywords: shaky electrochemical honing, cathode tool, inequality, current impulse, beam guide mirror, anode dissolution, running electric field.*

Лучеводная линия (ЛЛ) представляет собой систему перископических зеркал, заменяющую приемопередающую волноводную линию. К преимуществам ЛЛ относятся широкополосность, малые электрические потери, особенно на высоких частотах  $f \geq 90$  ГГц, что позволяет создать многоканальные универсальные зеркальные антенны [1].

Поверхности зеркал ЛЛ могут представлять собой цилиндрические вырезки из параболоида вращения с геометрическими характеристиками:

$$y^2 + x^2 = 4Fz, \quad z = x^2 / 4F, \quad (1)$$

где  $F$  – фокусное расстояние.

Отклонение профиля рабочей поверхности рефлектора от теоретических значений не должно превышать 0,05 мм, шероховатость поверхности  $Ra$  составляет 0,16–0,2 мкм.

При решении задач формообразования зеркала лучевода, выполненного из сплава 32 НКД, со стабильными параметрами и размерами, необходимо удалить равномерно дефектный слой после механической обработки лезвийным инструментом на станке с ЧПУ на глубину до 0,2 мм с сохранением исходной точности. Для удаления дефектного слоя может быть применен метод вибрационного электрохимического хонингования (ВЭХХ) секториальным катодом – инструментом (КИ), содержащим токопроводящие и нетокопроводящие секторы на его рабочей поверхности [2]. ВЭХХ заключается в электрохимической обработке обрабатываемой поверхности бегущим импульсным током с последующей механической ее активацией при вибрации КИ и воздействии нетокопроводящими секторами, покрытыми алмазным абразивным материалом, на труднорастворимые анодные пленки [3]. В процессе ВЭХХ катод-инструмент совершает вращательное движение с числом оборотов  $n$  и одновременно вибрацию с частотой  $f$ . Удаление дефектного слоя с заготовки зеркала лучевода происходит за счет механической и электрохимической обработки бегущим электрическим полем, что позволяет устранять анодные пленки с обрабатываемой поверхности, стабилизировать потенциал анодного растворения сплава 32 НКД и достигать равномерной шероховатости поверхности во всех направлениях по рабочей поверхности.

Все металлы, анодно поляризуемые в растворах электролитов, способны переходить в ионизированное состояние по нескольким механизмам процесса анодного растворения. Предпочтительным является механизм, когда анодное растворение происходит в активном состоянии, под которым подразумевается процесс ионизации и гидратации атомов металла в рабочей среде, не осложненный проявлением пассивации. Активное анодное растворение может проходить в условиях, когда граница раздела анод–электролит освобождена от ранее образовавшихся анодных пленок. При ВЭХХ разрушение оксидных пленок осуществляется абразивным алмазным покрытием нетокопроводящих секторов КИ при его кратковременном касании с обрабатываемой поверхностью зеркала лучевода. Анодный процесс при таком механизме анодного растворения протекает по микронеровностям всей обрабатываемой поверхности. Отличительной чертой поляризационных кривых для процесса активного анодного растворения является то, что возрастание тока на поляризационной кривой начинается непосредственно от стационарного потенциала для обрабатываемого сплава (рис. 1).

Малая шероховатость поверхности формируется в процессе сглаживания неровностей и возникновения блеска на всей обрабатываемой поверхности сплава 32 НКД в основном за счет большой скорости сглаживания вершин микронеровностей по сравнению с микровпадинами из-за локализации электрических линий тока на этих микровыступах. Причина такой локализации обусловлена омическим падением электрического тока в вязкой высокоомной пленке солей, толщина которой в микровпадинах может быть больше, чем на выступах, например, при ВЭХХ в кислородосодержащем электролите 10 %  $\text{NaNO}_3$ . Выравнивающий эффект при ВЭХХ также связан с увеличением скорости анодного растворения вершин микровыступов из-за депассивации под воздействием абразивного материала КИ, прежде всего вершин микронеровностей обрабатываемой поверхности, а также за счет равномерно распределенной плотности тока, получаемой в результате использования бегущего импульсного электрического тока по обрабатываемой поверхности и стабилизации электропроводности электролита в МЭП.

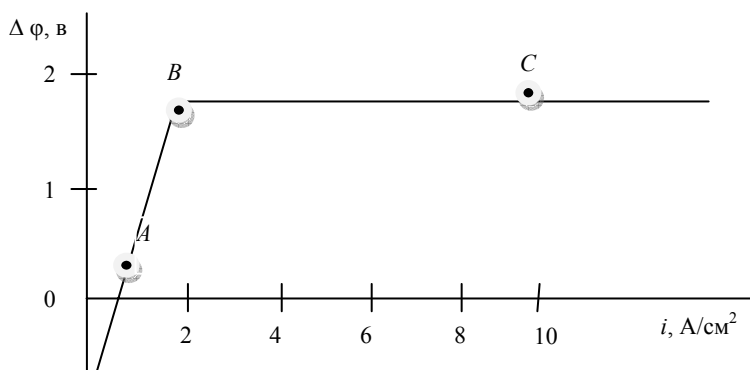


Рис. 1. Поляризационная кривая для процесса активного анодного растворения: участок АВ – активное состояние; участок ВС – перепассивное состояние



Новый более мелкий рельеф шероховатости поверхности образуется после завершения периода удаления окисной пленки сразу по всей обрабатываемой поверхности зеркала лучевода. Длительность процесса формирования требуемого микрорельефа обрабатываемой поверхности зависит от состава сплава, исходной шероховатости поверхности, прочности окисной пленки на нем, плотности рабочего тока, состава, температуры и скорости протока электролита, газонаполнения, а также состава продуктов анодного растворения, выбранной скорости вращения, частоты вибрации КИ, количества и размеров токопроводящих и нетокопроводящих секторов.

Важным преимуществом ВЭХХ является удаление дефектного слоя без существенного температурного и механического воздействия на обрабатываемую деталь, исключая прижоги, что дает возможность обрабатывать изделия малой жесткости толщиной 1 мм и обеспечить малые габаритно-массовые характеристики элементной базы ЛЛ. Общее количество массы металла при ВЭХХ, перешедшие в раствор электролита, будет складываться из массы, удаленной при механической обработке абразивными секторами  $m_{\text{мех}}$  и растворенной при электрохимической обработке  $m_{\text{эл.хим}}$  [4]:

$$m = m_{\text{мех}} + m_{\text{эл.хим}} \quad (2)$$

В свою очередь,

$$m_{\text{мех}} = \frac{1}{8} \cdot k \cdot \beta \cdot D^2 \cdot \mu \cdot f \cdot t_k, \quad (3)$$

где  $\beta$  – центральный угол токоизолированного сектора с абразивным покрытием;  $k$  – количество токоизолированных секторов;  $D$  – диаметр КИ;  $\mu$  – величина массы металла и анодной пленки, срезанных за 1 с единицей площади токоизолированного сектора с абразивным покрытием;  $f$  – частота вибрации;  $t_k$  – общее время контакта КИ и детали за 1 с процесса обработки;  $t$  – общее время обработки зеркала лучевода.

Схема процесса ВЭХХ зеркала лучевода показана на рис. 2.

Скорость анодного растворения можно представить формулой, аналогичной формуле плоскопараллельного межэлектродного зазора, в связи с малой кривизной зеркала ЛЛ:

$$V = \frac{C_{\text{ме}}}{\gamma} \eta \frac{(U - \Delta\phi)}{\alpha} \chi, \quad (4)$$

где  $C_{\text{ме}}$  – электрохимический эквивалент растворения металла детали;  $\gamma$  – удельный вес металла детали;  $\eta$  – выход металла по току;  $U$  – рабочее расположение;  $\Delta\phi$  – сумма анодного и катодного потенциалов;  $\chi$  – удельная электропроводность электролита;  $a = a(t)$  – межэлектродный зазор;

$$\chi = \chi_0 (1 - \alpha)^B \cdot [1 + C(T - T_0)], \quad (5)$$

где  $\alpha$  – газосодержание;  $\chi_0$  – электропроводность электролита на входе в межэлектродный зазор;  $B$  – находится экспериментально, обычно  $B = 1,5$ ;  $C$  – температурный коэффициент электропроводности;  $T_0$  – температура электролита на входе в межэлектродный зазор;  $T$  – температура электролита на выходе из межэлектродного зазора.

Масса металла, анодно растворенная при электрохимической обработке (формула (2)), может быть представлена выражением

$$m_{\text{эл}} = \frac{C_{\text{ме}}}{\gamma} \eta \frac{(U - \Delta\phi)}{\alpha} \chi (2\pi - \beta k) \frac{D^2 n}{480} (f \cdot t_{\text{имп}}), \quad (6)$$

где  $n$  – число оборотов КИ в минуту;  $t_{\text{имп}}$  – время импульса технологического тока.

Следует учесть, что во время контакта  $t_k$  КИ и детали, удаления металла за счет анодного растворения не происходит, так как при использовании биполярного КИ, импульс тока на обрабатываемой поверхности равен 0, а токовая нагрузка распределяется в технологическом межэлектродном зазоре 7, и короткого замыкания на обрабатываемой поверхности не происходит (рис. 2).

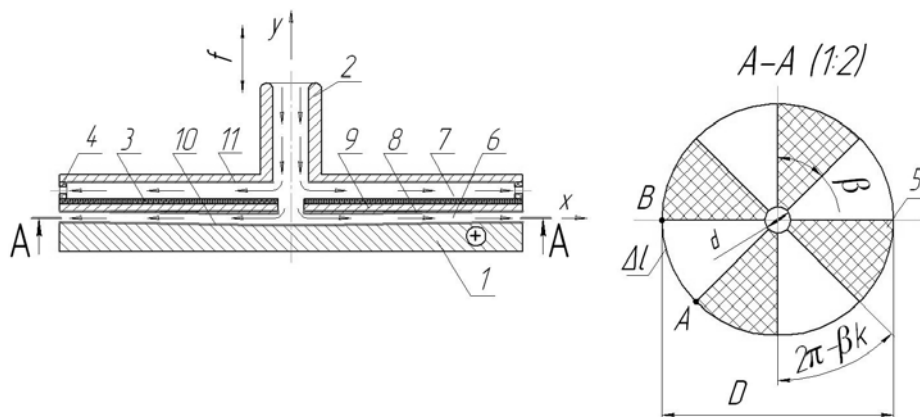


Рис. 2. Схема процесса ВЭХХ зеркала лучевода:

- 1 – обрабатываемая деталь; 2 – катод-инструмент; 3 – токопроводящий защитный слой; 4 – изолятор;  
5 – нетокопроводящие абразивные секторы; 6 – межэлектродный зазор, изменяющийся в процессе ВЭХХ от 0 до  $a$ ;  
7 – технологический МЭЗ; 8 – требуемый профиль обрабатываемой поверхности по чертежу; 9 – профиль катода-инструмента;  
10 – полученный профиль детали; 11 – специальное покрытие, снижающее газовыделение водорода

Объем количества выделенного водорода на КИ в МЭП определим по формуле:

$$V_H = \varepsilon_H \eta_H \frac{(U - \Delta\varphi)}{\alpha} \chi (2\pi - \beta k) \times \times \frac{D^2 n}{480} t_{\text{имп}} \frac{R \cdot T_r}{M_H \cdot P_r}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_H$  – весовой электрохимический эквивалент водорода;  $\eta_H$  – коэффициент выхода по току при выделении водорода;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_r$  – абсолютная температура газожидкостной смеси;  $P_r$  – давление в газожидкостном слое;  $M_H$  – молекулярный вес водорода;  $t_{\text{имп}}$  – длительность импульса тока в МЭП.

Содержание водорода в газожидкостной смеси можно определить по формуле [5]

$$\alpha = V_H / V_D, \quad (8)$$

где  $V_D$  – объемное количество газожидкостной смеси, протекающей через зону МЭП за время  $t_{\text{имп}}$ ,  $V_D = W + V_{HS}$ , где  $V_{HS} = f(R \cdot T_r / P_r)$  – зависимость объема водорода от температуры и давления электролита в МЭП.

Для поддержания постоянной плотности тока по всей обрабатываемой поверхности необходимо обеспечить одинаковую электропроводность электролита в МЭП, т. е. создать условие:  $\chi \approx \chi_0$  по обрабатываемой поверхности.

Тогда, в соответствии с формулой (5),

$$(1 - \alpha)^B [1 + C(T - T_0)] = 1. \quad (9)$$

Температура электролита на выходе из МЭП может быть представлена:

$$T = \left[ \frac{1}{(1 - \alpha)^B} - 1 \right] \frac{1}{C} + T_0.$$

Учитывая, что тепловая мощность, поступающая в МЭП при прохождении электрического тока, будет переходить в электролит, получим  $N_i = k_3 \cdot i_{\text{ср}} \cdot S_{\text{эл.акт}} \times \times U \cdot t_{\text{имп}} = W \cdot c_p \cdot \rho_{\text{эл}} \cdot \Delta T_i$ , где  $\Delta T_i$  – повышение температуры электролита за счет прохождения электрического тока;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий ту часть мощности электрического тока, которая тратится на нагрев электролита.

Тогда:

$$t_{\text{имп}} \leq \frac{W \cdot c_p \cdot \rho_{\text{эл}}}{k_3 \cdot i_{\text{ср}} \cdot S_{\text{эл.акт}} \cdot U} \times \times \left[ \left( \frac{1}{(1 - \alpha)^B} - 1 \right) \frac{1}{C} + (T_0 - \Delta T_T) \right], \quad (10)$$

где  $\Delta T_T$  – повышение температуры электролита за счет силы трения КИ. Для сохранения электропроводности электролита в МЭП  $\chi \approx \chi_0$   $t_{\text{имп}}$  может быть определено по формуле (10).

Общая масса удаленного металла (с учетом формулы (3)) может быть представлена выражением

$$m = \frac{1}{8} k \cdot \beta \cdot D^2 \cdot \mu \cdot f \cdot t_k + + \frac{C_{\text{ме}}}{\gamma} \eta \frac{(U - \Delta\varphi)}{\alpha} \chi (2\pi - \beta k) \frac{D^2 n}{480} t_{\text{имп}} \cdot f. \quad (11)$$

Температуру  $T$  на выходе из межэлектродного зазора можно определить из выражения, взятого из [6].

Повышение температуры электролита увеличивает шероховатость поверхности веществ и может способствовать повышению глубины растравливания по границам зерен, поэтому ее необходимо стабилизировать в заданных пределах:

$$T = T_0 + \frac{0,24(U - \Delta\varphi) \cdot i_{\text{ср}} \cdot S_{\text{эл.акт}}}{W \cdot \rho_{\text{эл}} \cdot C_p \cdot V_a \cdot k_2} + \Delta T_T, \quad (12)$$

где  $i_{\text{ср}}$  – средняя плотность тока;  $k_2$  – коэффициент расхода электролита, учитывающий ту часть электролита, которая участвует в переносе тепла;  $S_{\text{эл.акт}}$  – площадь электропроводных секторов КИ;  $W$  – объемный расход электролита;  $\rho_{\text{эл}}$  – плотность электролита;  $c_p$  – теплоемкость электролита;  $V_a$  – абсолютная скорость течения электролита в МЭП;  $\Delta T_T$  – повышение температуры электролита в МЭП за счет силы трения при вращении КИ:

$$V_a = V_{\text{отн}} + V_{\text{пер}}, \quad (13)$$

где  $V_{\text{отн}}$  – относительная скорость точек электролита;  $V_{\text{пер}}$  – переносная скорость точек электролита.

Вращение КИ может влиять на скорость течения электролита и на повышение его температуры в МЭП, а также на динамические характеристики процесса, действующего на электролит со стороны вращающего КИ. Используя теорему о моменте количества движения, получим [7] следующее выражение:

$$M_3 = W \cdot \rho_{\text{эл}} (V_{n2} r - V_{m1} r_0), \quad (14)$$

где  $m = W \rho_{\text{эл}}$  – массовый расход электролита,  $V_{n1}$ ,  $V_{n2}$  – переносные скорости течения электролита на входе и выходе из МЭП;  $r_0$  – радиус катода – инструмента;  $r_0$  – радиус отверстия КИ для подачи электролита.

Окружная мощность вращения катода – инструмента  $N_3$  во время цикла электрохимической обработки – определяется по формуле

$$N_3 = M_3 \omega,$$

где  $\omega$  – угловая скорость.

Мощность вращения во время касания КИ с обрабатываемой поверхностью

$$N_k = F \cdot k_{\text{тр}} \cdot r_3 \cdot \omega = M_k \omega, \quad (15)$$

где  $F$  – сила прижима КИ к обрабатываемой поверхности;  $k_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;  $M_k$  – момент, действующий на катод-инструмент со стороны силы трения.

При малом осевой зазоре  $a/r_3 \leq 0,2$  можно полагать, что электролит в МЭП вращается с угловой скоростью, равной половине угловой скорости диска КИ.

Коэффициент закрутки потока  $\varphi = 0,5$ . Тогда

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} + \rho_{\text{эл}} \omega^2 (r_3^2 - r_0^2) / 8, \quad (16)$$

где  $P_{\text{вых}}$  – давление на выходе из МЭП;  $P_{\text{вх}}$  – давление на входе в МЭП;  $\omega$  – угловая скорость вращения КИ;  $\rho_{\text{эл}}$  – плотность электролита;  $r_3$  – радиус КИ;  $r_0$  – радиус отверстия КИ на входе в МЭП.

Затраты мощности на трение КИ со слоем электролита в МЭП можно определить по следующей формуле [7]:  $N_{\text{тр.д}} = C_{\text{тр.д}} \cdot \rho_{\text{эл}} \cdot \omega^3 \cdot r_3^5$ , где  $C_{\text{тр.д}}$  – коэффициент трения диска КИ о слой электролита в МЭП;  $\rho_{\text{эл}}$  – плотность электролита;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $r_3$  – радиус КИ.

Повышение температуры электролита в МЭП за счет трения КИ:  $\Delta T_{\text{тр}} = N_{\text{тр.д}} / C_p \cdot \omega \cdot \rho_{\text{эл}}$ .

Рекомендуется температуру электролита поддерживать в пределах 12–15 °С на входе в МЭП, на выходе из МЭП 25–28 °С, при ВЭХХ для обеспечения качества обрабатываемой поверхности в 10 %  $\text{NaNO}_3$ .

В процесс ВЭХХ происходит нарастание и спад поляризации  $\Delta\phi_a$  с продолжительными временными интервалами импульс-паузы. Для обеспечения процесса локализации ВЭХХ требуется управлять динамикой поляризации в зависимости от плотности тока  $i$ , температуры электролита  $T$  в МЭП и газосодержащих  $\alpha$ .

Необходимо также выбрать требуемые амплитудно-временные характеристики нарастания и спада поляризации  $\frac{d\phi_a}{dt} = \int_0^{t_u} \frac{di}{dt} \leq \Delta\phi_n$ , т. е. управлять электродными процессами для обеспечения активного анодного растворения и выходных параметров процесса ВЭХХ при условии  $\Delta\phi \leq \Delta\phi_n$ , где  $\Delta\phi_n$  – потенциал перепассивации.

Использование микросекундных рабочих импульсов, например 10 мс при ВЭХХ, соизмерных по длительности со временем установления электродных потенциалов, способствует повышению точности и сохранению исходной точности зеркала лучевода.

В течение действия импульса и вращения КИ влияние нагрева на электропроводность может превалировать над влиянием газонаполнения. Это, в свою очередь, способствует кратковременному повышению проводимости, позволяющей увеличению амплитудной плотности тока, что приводит к снижению высоты микронеровностей обрабатываемой поверхности до  $R_a$  0,02–0,16 мкм и повышению степени локализации процесса до 0,015 мкм. Вибрация, вращение bipolarного катода-инструмента и импульсный характер воздействия тока бегущего электрического поля на обрабатываемую поверхность с удалением анодных пленок с обрабатываемой поверхности позволяют создать начальную неэквивалентную поверхность, способствующую повышению точности копирования и достижению высоких плотностей тока, обеспечивающих преимущественное снижение шероховатости поверхности по микровыступам зеркала лучевода.

Подача импульсов тока синхронизирована с гармоническими колебаниями КИ таким образом, что импульс рабочего тока прямой полярности начинают пропускать в фазе  $t_{\text{имп}}$  во время периода колебания. Это позволяет управлять изменением исходной электропроводности электролита за счет компенсации газовыделений в МЭП нагревом электролита при прохождении электрического тока и мощности трения КИ со слоем электролита при его вращении в МЭП.

Параметры импульса (длительность, амплитуда, фаза подачи, форма, скважность и др.) выбирают таким образом, чтобы обеспечить наибольший технологический эффект от действия рабочего импульса тока. Импульсы тока желательно обеспечить близкими к прямоугольным. В связи с отмеченным, источник технологического тока должен иметь крутопадающую вольт-амперную характеристику для создания импульсов тока, приближенных к прямоугольной форме, однако для ВЭХХ, когда пленка удаляется механическим способом, можно использовать обычный источник тока с диаграммой импульсов напряжения и тока (рис. 3).

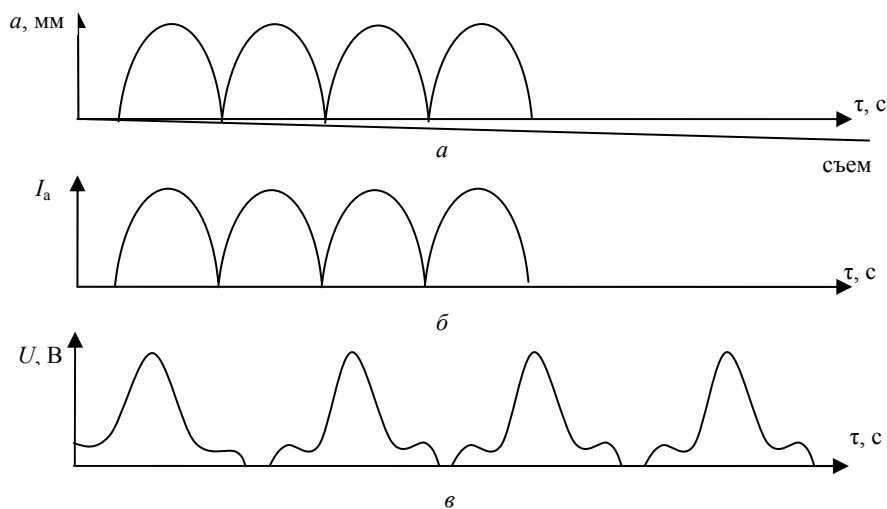


Рис. 3. Диаграммы изменения межэлектродного зазора (а), импульсов тока  $J_a$  (б) и импульсов технологического напряжения  $U$  (в)

Короткие импульсы тока управляют процессами ВЭХХ за счет временного характера развития электродных явлений. Скорость анодного растворения может составлять 0,004 г/мин, что соответствует подаче 0,05 мм/мин.

Необходимо обеспечить в процессе ВЭХХ одинаковую шероховатость поверхность во всех точках зеркала лучевода. Для этого требуется выбрать состав электролита, режимы ВЭХХ и поддерживать локальную плотность тока в интервале, где шероховатость поверхности с изменением плотности тока не изменяется, а точность обработки гарантирована в пределах установленного допуска 0,05 мм.

Допустимую среднюю плотность тока для скорости прокачки электролита 100 м/с можно определить по формуле  $i_{\text{ср}} = 0,38 t_{\text{имп}} U$ , где  $i_{\text{ср}}$  – средняя плотность тока А/см<sup>2</sup>,  $t_{\text{имп}}$  – длительность импульса в мс.

На основании проведенных исследований установлено следующее:

- вращательное и одновременно вибрационное движение секториального катода-инструмента при ВЭХХ позволяет:

- осуществлять активный процесс анодного растворения микронеровностей обрабатываемого сплава за счет удаления пленок из продуктов обработки;

- подавать короткие импульсы тока синхронизировано с гармоническими колебаниями КИ, что позволяет управлять процессами ВЭХХ и исходной электропроводностью электролита за счет временного характера развития, электродных явлений;

- поддерживать локальную плотность тока по обрабатываемой поверхности в интервале, где шероховатость обрабатываемой поверхности с изменением плотности тока существенно не изменяется, а точность обработки гарантирована в пределах установленного допуска.

#### Библиографические ссылки

1. Бакин А. М., Обороин Л. И., Трифанов И. В. Расчет параметров двухзеркального лучевода // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 1 (41). С. 114–117.

2. Пат. РФ № 2166416. Способ электрохимического хонингования / И. В. Трифанов, Л. И. Бабкина. Оpubл. 10.05.2001.

3. Пат. РФ № 2127155. Катод-инструмент для размерной электрохимической обработки / И. В. Трифанов, Л. И. Бабкина. Оpubл. 10.03.1993.

4. Щербак Г. А., Трифанов И. В. Расчет параметров вибрационного электрохимического хонингования // Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика : сб. науч. тр. / под общ. ред. В. В. Стацур; ГУЦМиЗ. Красноярск, 2004. Вып. 10 (41). С. 123–126.

5. Семаков Л. А., Корчагин Г. И. К вопросу колебаний двухфазного потока в длинном межэлектродном зазоре при ЭХРО // Тр. КАИ. Казань, 1973. Ч. 1. Вып. 152. С. 59–65.

6. Моделирование процесса электрохимической размерной обработки катодом, совершающим колебательное и вибрационное движение / Г. А. Щербак, И. В. Трифанов и др. // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 6. С. 262–265.

7. Овсянников Б. В., Краев М. В., Черваков В. В. Теория и расчет турбомашин : учеб. пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. С. 99–102.

#### References

1. Bakin A. M., Oborina L. I., Trifanov I. V. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 1 (41), pp. 114–117.

2. Trifanov I. V., Babkina L. I. *Way of an electrochemical honing* (The electrowinning honing). Patent № 2166416 priority of 10.05.2001.

3. Trifanov I. V., Babkina L. I. *The cathode tool for dimensional electrochemical processing* (The cathode-dimensional tool for electrochemical machining). Patent № 2127155 priority of 10.03.1993.

4. Scherbak G. A., Trifanov I. V. *Sbornik nauchnykh trudov "Perspektivnye materialy, texnologii, konstrukcii, ekonomika"* (Collection of night works "Perspective materials, technologies, designs, economy"). GUCMiZ, Krasnoyarsk, 2004, № 10.41, pp. 123–126.

5. Semakov L. A., Korchagin G. I. *Works KAI. Kazan*, 1973, ch. 1, vol. 152, pp. 59–65.

6. Scherbak G. A., Trifanov I. V. *Vestnik SibGAU*. 2005, № 6, pp. 262–265.

7. Ovsyannikov B. V., Krayev M. V., Chervakov V. V. *Teoriya i raschet turbomashin* (Theory and Design of Turbomachinery). Krasnoyarsk, 2012, pp. 99–102.

© Обороина Л. И., Трифанов И. В., Исмаилов Б. Н.,  
Стерехов И. В., Шелковская В. М., 2013

УДК 544.18

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛИТИЯ  
НА СКОРОСТЬ ДИФФУЗИИ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ\***

З. И. Попов, А. С. Федоров, А. А. Кузубов, Н. С. Елисеева

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: zipcool@bk.ru

*Квантово-химическим методом DFT проведено исследование влияния концентрации лития на высоту потенциального барьера перескока атома лития в кристаллическом кремнии. С использованием этих данных предложен новый метод расчета коэффициента диффузии лития в кристаллическом кремнии при различной концентрации лития  $\text{SiLi}_x$ , где  $x$  изменяется в диапазоне от 0,05 до 0,75.*

*Ключевые слова:* кремний, литий, первопринципные расчеты, диффузия.

**INFLUENCE OF LITHIUM CONCENTRATION  
ON THE DIFFUSION RATE IN CRYSTALLINE SILICON**

Z. I. Popov, A. S. Fedorov, A. A. Kuzubov, N. S. Eliseeva

Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: zipcool@bk.ru

*Influence of concentration of lithium on the height of the potential junction barrier of lithium atoms in crystalline silicon was investigated with quantum-chemical DFT method. Using this data, a new method for calculation of lithium diffusion in crystalline silicon was proposed, with different concentrations of lithium  $\text{SiLi}_x$  where  $x$  ranges from 0,05 to 0,75.*

*Keywords:* lithium, silicon, ab initio calculations, diffusion.

Развитие литий-ионных аккумуляторов в настоящее время является одной из самых актуальных задач в области источников тока ввиду их перспективности, широкого использования в электронных устройствах и даже в автомобилестроении ближайшего будущего. По сравнению с другими перезаряжаемыми батареями, такими как кислотные-свинцовые, никель-кадмиевые и никель-металл-гидридные, литий-ионные батареи обладают большим удельным зарядом, рабочим напряжением и меньшим током саморазряда. На сегодняшний день основным материалом анодов современных батарей является графит, который обладает адсорбционной емкостью по литию 372 мА·ч/г, а также материалы на его основе. При внедрении ионы лития слегка раздвигают слои углеродной матрицы и располагаются между ними, образуя интеркалаты. Ввиду достаточно большого расстояния между слоями  $\text{sp}^2$ -гибридизированного углерода, обеспечиваемого слабым ван-дер-ваальсовым взаимодействием, удельный объем углеродных материалов в процессе интеркаляции-деинтеркаляции ионов лития меняется незначительно, что является положительной чертой данных материалов. К сожалению, в таких материалах происходит значительный перенос электрического заряда с атомов лития на слои графита, что ведет к существенному отталкиванию ионов лития. Это приводит к тому, что максимальное содержание лития в графите соответствует фазе  $\text{LiC}_6$ , соответствующей вышеупомянутой адсорбционной емкости. Однако уже известно, что теоретическая емкость для батарей с кристаллическим кремниевым анодом

может составить величину в 10 раз большую, чем для углеродных материалов [1], поэтому материалы на основе кремния сейчас широко изучаются как анодный материал для следующего поколения литий-ионных батарей [2; 3]. Одним из важных аспектов исследования кремния в качестве анода является исследование диффузии лития внутри его кристаллической структуры.

В отличие от случая диффузии, в кристаллических средах с достаточно низкими потенциальными барьерами ( $V_{\text{barrier}} \sim (1-10) \cdot kT$ ) для прыжков частиц, когда можно применять метод молекулярной динамики (MD), в структурах с высокими потенциальными барьерами  $V_{\text{barrier}}$ , например в ковалентно связанных кристаллических структурах ( $V_{\text{barrier}} \gg kT$ ), частота перескоков атомов через потенциальные барьеры является чрезвычайно малой (rare events problem). Поэтому такие системы не поддаются прямому исследованию методом MD. Для ускорения моделирования процессов активационных перескоков в таких случаях были разработаны методики смещающего потенциала (bias potential) [4], метод гипердинамики [5], а также метод температурно-ускоренной динамики (temperature-accelerated dynamics) [6]. К сожалению, применение данных методик для реальных систем сдерживается сложностью интегрирования данных методик в стандартные MD алгоритмы и сложностью определения потенциального профиля для движения диффундируемых частиц. Особенно это касается описания диффузии в аморфных веществах, когда имеется бесконечное многообразие потенциальных профилей и барьеров для диффузии частиц.

\* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0163 и гранта РФФИ № 12-02-00640.

Целью данной работы являлась разработка метода расчета диффузии примеси на основе данных, полученных из квантово-химических расчетов, и применение данного метода для исследования влияния концентрации атомов лития на скорость его диффузии.

Квантово-химические расчеты в работе проводились в рамках метода функционала плотности (DFT) [7] с градиентными поправками Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) [8] с коррекцией Grimme, учитывающей ванн-дер-ваальсово взаимодействие [9] в лицензионном пакете VASP (Vienna Ab-initio Simulation Package) [10–13]. Для эффективного уменьшения количества базисных функций и увеличения скорости расчетов в программе для всех атомов использовались псевдопотенциалы Вандербиля (Vanderbilt ultrasoft pseudopotential) [14]. Для выбора оптимальных параметров расчета и точности интегрирования по первой зоне Бриллюэна был использован набор  $k$ -точек, сгенерированный с помощью метода Монхорста-Пака [15] на равномерной сетке  $3 \times 3 \times 3$ , так как было обнаружено, что благодаря большому размеру суперячейки увеличение числа  $k$ -точек не приводит к изменению энергии связи и электронной структуры, но значительно увеличивает время расчетов. Для проведения оптимизации геометрии координаты всех атомов в суперячейках варьировались с помощью метода сопряженных градиентов, используя вычисление сил, действующих на атомы. При этом оптимизация проводилась до тех пор, пока силы, действующие на каждый атом, не становились менее  $0,05$  эВ/Å.

Для расчетов была использована суперячейка кремния в виде куба, состоящая из 216 атомов. Кремний имеет алмазоподобную кристаллическую структуру, в которой атомы лития могут располагаться в тетраэдрических порах данной структуры, максимальное число таких пор, в которых могут находиться атомы лития, равно числу атомов кремния. В данную ячейку помещали от одного до четырех атомов лития, причем их расположение выбиралось таким образом, чтобы расстояние между ними было минимальным, и проводили оптимизацию геометрии. После этого один из атомов лития помещали в соседнюю к нему пустую пору (в ячейках, где больше двух литиев, изменяли положение лития, равноудаленного от других) и оптимизировали полученную ячейку. Далее была рассчитана высота потенциального барьера (переходное состояние) для прыжков атома лития между двумя оптимизированными состояниями. Данные расчеты были выполнены методом эластичной упругой ленты (NEB) [16]. При этом были рассчитаны траектория, потенциальный профиль и величина барьера перехода атома лития через седловую точку потенциального профиля. Высота потенциальных барьеров перескока атома лития с различным заполнением окружения представлены в таблице.

**Высота потенциального барьера перескока атома лития в зависимости от количества атомов лития в ячейке  $\text{Li}_x\text{Si}_{216}$**

|                      |       |       |       |       |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Количество атомов Li | 1     | 2     | 3     | 4     |
| Высота барьера, эВ   | 0,903 | 0,749 | 0,477 | 0,362 |

Полученные данные были использованы для получения полиномиальной зависимости высоты барьера перескока атома лития от степени заполнения соседних к нему пор такими же атомами:

$$V_{\text{barrier}} = \Delta E_{b0} - 0,07P^3 + 0,277P^2 - 0,375P, \quad (1)$$

где  $\Delta E_{b0} = 0,903$  эВ (рассчитанное значение высоты барьера перескока атома лития из одной тетраэдрической поры в соседнюю без окружающих атомов лития).

Сумма вероятностей заполнения атомами лития пор окружающих ячейку, из которой совершается перескок, за исключением той, в которую совершается перескок ( $m = 1, 2, 3$ ), составляет

$$P = \sum P_m. \quad (2)$$

Для вычисления коэффициента диффузии была предложена эффективная методика, основанная на вычислении временной эволюции распределения атомов лития  $P(R_i, t_n)$  в дискретном времени  $t_n$  и пространстве  $R_i$ . Данная эволюция описывается дискретным (замещающим непрерывное уравнение диффузии) производящим уравнением (master equation) марковского процесса для степени заполнения узла  $i$  в момент времени  $t_k$ :

$$\frac{dP(\bar{R}_i, t_n)}{dt} = \sum_{R_j} W(\bar{R}_i, \bar{R}_j) P(\bar{R}_j, t_n) (1 - P(\bar{R}_i, t_n)) - W(\bar{R}_j, \bar{R}_i) P(\bar{R}_i, t_n) (1 - P(\bar{R}_j, t_n)), \quad (3)$$

здесь  $W(\bar{R}_i, \bar{R}_j)$  – частота перескока атома примеси из минимума  $\bar{R}_j$  в минимум  $\bar{R}_i$ . Данные величины для прыжка атома в любом направлении  $\bar{R}_i \rightarrow \bar{R}_j$  через барьер  $V_{\text{barrier}}(R_i, R_j)$  при температуре  $T$  рассчитывались с помощью уравнения аррениусовского типа:

$$W(\bar{R}_i, \bar{R}_j) = W_0 \exp\left(-\frac{V_{\text{barrier}}(R_i, R_j)}{kT}\right). \quad (4)$$

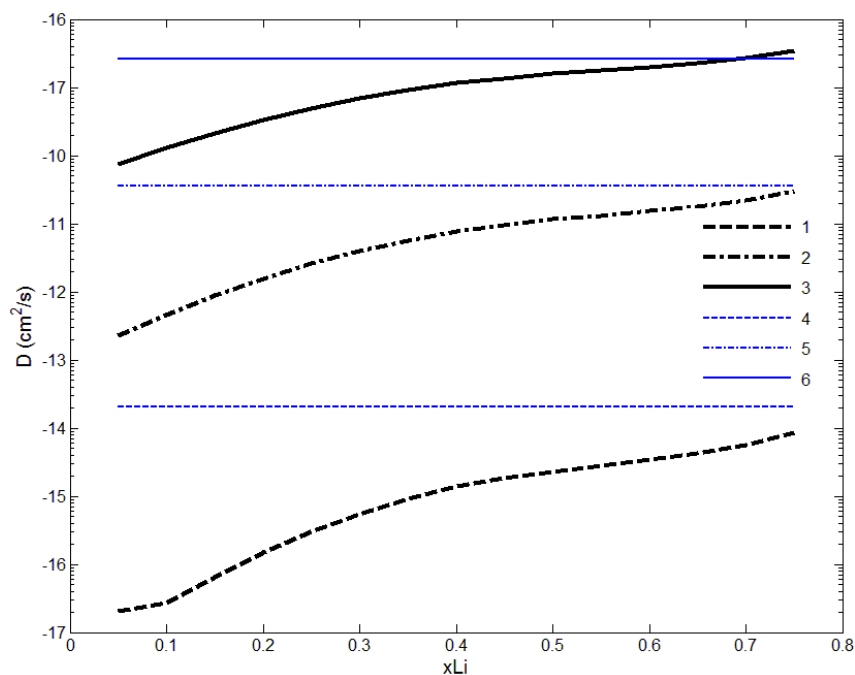
Предэкспоненциальный множитель (эффективная частота колебаний)  $W_0$  вычислялся с помощью известной формулы Веньярда [17], также учитывающего энергию нулевых колебаний  $E_0$ :

$$W_0 = \frac{kT}{\hbar} \frac{\prod_{i=1}^{3N-3} \left(1 - e^{-\frac{\hbar \nu_i}{kT}}\right)}{\prod_{i=1}^{3N-4} \left(1 - e^{-\frac{\hbar \nu'_i}{kT}}\right)}, \quad (5)$$

где  $\nu'_i$  – частота колебаний  $N$  атомов системы при нахождении перемещаемого атома в седловой точке, а  $\nu_i$  – в точке минимума.

После 100 итераций расчет распределения вероятности нахождения атомов лития в каждом из узлов выполнялся расчет коэффициента диффузии. Для этого численно решалось основное уравнение диффузии:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (6)$$



Зависимость коэффициента диффузии от концентрации лития в структуре  $\text{Li}_x\text{Si}$ : при температуре: 1 – 273 К; 2 – 373 К; 3 – 473 К; экспериментальные данные: 4 – 273 К; 5 – 373 К; 6 – 473 К

здесь поток  $J$  – результирующее число атомов лития, прошедших в единицу времени через единичную площадь плоскости, перпендикулярной оси, вдоль которой направлен  $c$  – градиент концентрации атомов лития в этой плоскости (в числах атомов на единицу объема). Графики температурной зависимости коэффициентов диффузии с различной начальной концентрацией лития представлены на рисунке линиями с номерами 1, 2, 3 для температуры 273, 373 и 473 К соответственно.

Линиями 4, 5, 6 показаны коэффициенты диффузии для аналогичных температур полученные из экспериментальной зависимости [18, 19]:

$$D = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left(\frac{-0,655 [\text{эВ}]}{k \cdot T}\right). \quad (7)$$

В отличие от работы [20], в которой рассматривалась зависимость коэффициента диффузии от температуры, представленный алгоритм расчета позволил определить зависимость коэффициента диффузии как от температуры, так и от концентрации лития.

Итак, в ходе выполнения работы с помощью проведения первопринципных расчетов была получена зависимость коэффициента диффузии от концентрации лития и температуры в кристаллическом кремнии. Обнаружено значительное (на 1–2 порядка) увеличение скорости диффузии лития в кремнии при увеличении концентрации лития до состава  $\text{Li}_{0,75}\text{Si}$ .

Авторы выражают благодарность Институту Компьютерного Моделирования СО РАН, г. Красноярск, Межведомственному Суперкомпьютерному Центру РАН, г. Москва, суперкомпьютерному центру МГУ, г. Москва, а также компьютерному центру Сибирского Федерального Университета, г. Красноярск за предоставление возможности использования вычислительных кластеров, на которых и были произведены все расчеты.

## References

1. Kasavajjula U., Wang C. S., Appleby A. J. Nano- and bulk-silicon-based insertion anodes for lithium-ion secondary cells. *J. Power Sources*. 2007, vol. 163, 1003 p.
2. Winter M., Besenhard J. O. Electrochemical lithiation of tin and tin-based intermetallics and composites. *Electrochim. Acta*, 1999, vol. 45, 31 p.
3. Huggins R. A., Lithium alloy negative electrodes. *J. Power Sources*. 1999, vol. 81–82, 13 p.
4. Hamelberg D., Mongan J., McCammon J. A. Accelerated molecular dynamics: A promising and efficient simulation method for biomolecules. *J. Chem. Phys.* 2004, vol. 120, 11919 p.
5. Voter A. F. Hyperdynamics: Accelerated Molecular Dynamics of Infrequent Events. *Phys. Rev. Lett.* 1997, vol. 78, 3908 p.
6. Sorensen M. R., Voter A. F. Temperature-accelerated dynamics for simulation of infrequent event. *J. Chem. Phys.* 2000, vol. 112, 9599 p.
7. Kohn W., Sham L. J. Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects. *Phys. Rev.* 1965, vol. 140, 1133 p.
8. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Phys. Rev. Lett.* 1996, vol. 77, pp. 3865–3868.
9. Grimme S. Semiempirical GGA-type density functional constructed with a long-range dispersion correction. *J. Comp. Chem.* 2006, vol. 27, 1787 p.
10. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Phys. Rev. B*. 1993, vol. 47, № 1, pp. 558–561.
11. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal-amorphous-semiconductor transition in germanium. *Phys. Rev. B*. 1994, vol. 49, № 20, pp. 14251–4269.

12. Kresse G., Furthmüller J. Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set. *Computer Material Science*. 1996, № 6, 15 p.
13. Kresse G., Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Phys. Rev. B*. 1996, vol. 54, 11169 p.
14. Vanderbilt D. Soft self-consistent pseudopotentials in generalized eigenvalue formalism. *Phys. Rev. B*. 1990, vol. 41, 7892 p.
15. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys. Rev. B*. 1976, vol. 13, pp. 5188–5192.
16. Henkelman G., Jonsson H. Improved tangent estimate in the nudged elastic band method for finding minimum energy paths and saddle points. *J. Chem. Phys.* 2000, vol. 113, pp. 9978–9985.
17. Vineyard G. V. Frequency factors and isotope effects in solid state rate processes. *J. Phys. Chem. Solids*. 1957, vol. 3, pp. 121–127.
18. Pell E. M. Diffusion of Li in Si at High T and the Isotope Effect. *Phys. Rev.* 1960, vol. 119, № 3, pp. 1014–1021.
19. Pell E. M. Diffusion Rate of Li in Si at Low Temperature. *Phys. Rev.* 1960, vol. 119, № 4, pp. 1222–1225.
20. Fedorov, A. S., Popov Z. I., Kuzubov A. A., Ovchinnikov S. G. *Teoreticheskiye issledovaniye diffuzii litiya v kristallicheskom i amorfnom kremnii* (Theoretical study of lithium diffusion in crystalline and amorphous silicon). *Pis'ma v ZHETF*. 2012, vol. 95, pp. 159–163.

© Попов З. И., Федоров А. С., Кузубов А. А., Елисеева Н. С., 2013

УДК 621.923.9

## МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КАНАЛОВ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Л. П. Сысоева, С. К. Сысоев, А. С. Сысоев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
660014, Россия, Красноярск, проспект им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sysoeva.tms@mail.ru

*Основной целью исследований являлась отработка методики обеспечения точности расхода компонентов через каналы заготовок с большим количеством труднодоступных каналов. Выполнен анализ конструкторско-технологических особенностей деталей летательных аппаратов. Рассмотрены особенности абразивно-экструзионной обработки. Описана методика обеспечения заданного качества сложнопрофильных каналов деталей летательных аппаратов абразивно-экструзионной обработкой. Апробация методики проведена на промышленной установке УЭШ-350М. Предложены рекомендации по выбору оборудования, состава рабочей среды и параметров обработки. Применение методики позволяет успешно проводить на существующем оборудовании операции финишной отделки сложнопрофильных каналов деталей летательных аппаратов с обеспечением заданного качества (точности расхода компонентов топлива через каналы деталей и шероховатости их поверхностей в диапазоне  $R_a = 1,6...3,2$  мкм).*

*Ключевые слова:* абразивно-экструзионная обработка, рабочая среда, абразивное зерно, сложнопрофильный канал, направляющий аппарат, расход компонентов, цикл обработки.

## THE TECHNIQUE FOR GUARANTEE OF QUALITY OF THE AIRCRAFT DETAIL CHANNELS WITH THE USE OF ABRASIVE FLOW MACHINING PROCESS

L. P. Sysoeva, S. K. Sysoev, A. S. Sysoev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarsky Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sysoeva.tms@mail.ru

*The main purpose of the research was the development of the technique for guarantee of the required accuracy of the components consumption through channels of aircraft details with a plenty of «hard-to-get» channels. The design engineering features of aircraft details are analyzed. The features of the abrasive flow machining process are considered. The technique for the required quality guarantee of the geometrically complex channels of aircraft details with the use of abrasive flow machining process is described. The approbation of this technique is performed with the use of the experimental plant. The recommendations for the choice of equipment, work medium composition and work parameters are offered. Use of the offered technique allows to carry out the finish machining operation of a channels of aircraft details with the given quality guarantee (accuracy of the components consumption through channels and pimples in a range  $R_a = 1,6... 3,2$  microns) with the existing equipment.*

*Keywords:* abrasive flow machining process, work medium, abrasive grain, geometrically complex channel, guide apparatus, components consumption, machining cycle.



В летательных аппаратах широкое применение нашли детали типа колес турбин и насосов, направляющих и спрямляющих аппаратов и др., имеющих сложные внутренние каналы, сформированные литьем по выплавляемым моделям (рис. 1). Несмотря на меры по обеспечению жестких требований к точности моделей для литья, большая часть готовых деталей имеет отклонения от заданных в конструкторской документации (КД) параметров (расход компонентов и качество поверхности). Эти отклонения ведут к неравномерности распределения расхода компонентов по индивидуальным каналам и существенно влияют на общий расход компонентов.

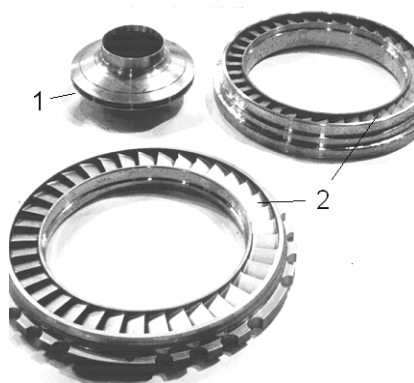


Рис. 1. Примеры деталей с каналами, выполненными литьем по выплавляемым моделям:  
1 – закрытые каналы в крыльчатках; 2 – открытые каналы в направляющих аппаратах

Финишная обработка таких поверхностей традиционными методами затруднена. Отсутствие надежной технологии отделки привело к тому, что конструкторские организации были вынуждены, по нашему мнению, значительно снизить требования КД к параметрам труднодоступных каналов в деталях.

В лаборатории отделочных операций СибГАУ накоплен большой опыт использования абразивно-экструзионной обработки (АЭО) для финишной обработки сложнопрофильных каналов в деталях, в том числе имеющих большое количество лопаток.

АЭО основана на экструзии через обрабатываемую деталь вязкоупругой рабочей среды (РС), наполненной абразивными зернами [1]. В процессе течения РС под давлением до 12 МПа в центре канала создается «жгут», который обеспечивает прижатие абразивных зерен к обрабатываемой поверхности [2]. При относительно невысоких скоростях рабочей среды создаются силы резания, достаточные для сглаживания шероховатости поверхности и удаления дефектного слоя с повышенной твердостью, характерной для заготовок после литья по выплавляемым моделям.

Экспериментальные работы проведены на установке УЭШ-350, предназначенной для АЭО каналов в деталях, габариты которых с приспособлением составляют (диаметр × длина) – 0,35×0,50 м (рис. 2). Конструкция установки позволяет закреплять обрабатываемую заготовку с приспособлением между рабочими камерами перемещением прижимной траверсы

и обеспечивать управление перепрессованием смеси только через каналы заготовки по заданному циклу в автоматическом режиме [3].

Основной целью исследований является отработка методики обеспечения точности расхода компонентов через каналы заготовок с большим количеством труднодоступных каналов с использованием АЭО. При этом особое внимание уделялось обеспечению заданной шероховатости по длине поверхностей каналов ( $R_a = 1,6 \dots 3,2$  мкм).

Анализ конструкции деталей показал, что входные и выходные части лопаток, как правило, наклонены к оси детали и к направлению потока среды при ее экструзии через деталь. Как показали исследования процесса течения РС, на входе в каналы возникает разделение общего потока и перестройка профилей разделенных потоков, обусловленная реологическими свойствами вязкоупругой среды.

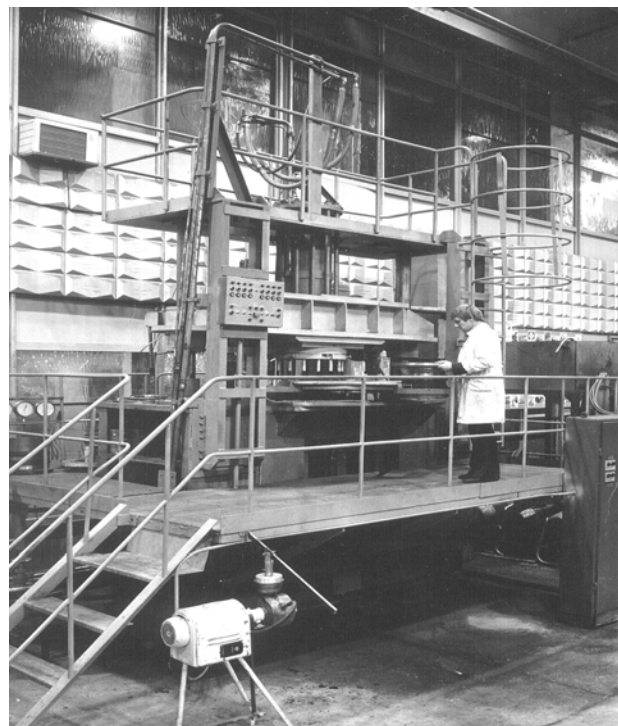


Рис. 2. Установка для абразивно-экструзионной обработки УЭШ-350М

Чем больше угол входа в каналы, тем больше потери давления среды, обусловленные возникновением упругих деформаций и высокой скорости релаксации при перестройке направления течения. В результате основной сьем металла осуществляется на входных кромках каналов. На входе в канал наблюдается зона отрыва рабочей среды от обрабатываемой поверхности с образованием на этом участке зоны застоя, вследствие чего уменьшаются силы прижатия активных абразивных зерен, находящихся на поверхности среды, вплоть до прекращения контакта с обрабатываемой поверхностью.

Нами ранее предложено несколько технических решений для выравнивания условий обработки. Так

для создания направленного движения РС на каждую кромку лопатки, наклоненную к основному движению потока (рис. 3), предложено использовать направляющие аппараты [4]. В ходе исследований нам удалось сформулировать более точные рекомендации по применению данного технического решения. Так как детали имели наклонные лопатки, с каждой стороны заготовки в приспособлении были установлены технологические направляющие аппараты, позволившие реализовать требуемое направление потока РС и создать условия для равномерной обработки поверхностей лопаток по длине. При этом каналы направляющего аппарата имели идентичные геометрические характеристики с сечением каналов обрабатываемой заготовки, являясь продолжением каждого канала. Суммарная площадь каналов каждого направляющего аппарата не превышала площади сечения рабочего цилиндра установки.

На фланец нижней камеры 1 устанавливали приспособление, обеспечивающее обработку рабочей среды каналов детали (рис. 4). Приспособление состоит из нижней части 3 с технологическим направляющим аппаратом, в которой монтируется обрабатываемая деталь 5. Верхняя часть приспособления 4 с технологическим направляющим аппаратом закрепляется к верхней камере 2. Траверса установки обеспечивает перемещение верхнего блока цилиндров и закрепление приспособления с деталью в установке. При этом приспособление образует закрытую полость и обеспечивает герметичность в стыке между верхней и нижней камерами установки.

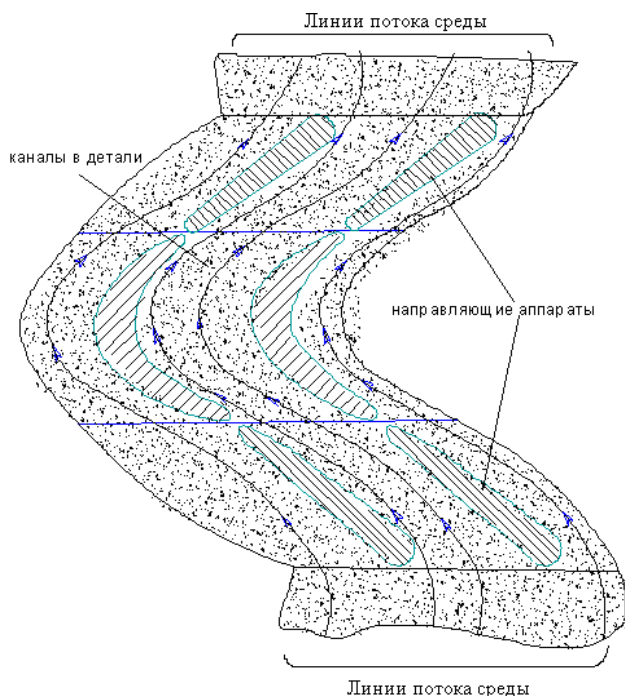


Рис. 3. Схема изменения линии тока рабочей среды с использованием направляющих аппаратов

Состав РС, которую необходимо применить для обработки, зависит от геометрических параметров каналов (индивидуальной и суммарной площади,

длины), исходной и требуемой шероховатости поверхности и материала обрабатываемой заготовки [5]. Одним из граничных условий выбора состава РС является также производительность обработки. Необходимо учитывать влияние температурного нагрева среды, оснастки и установки при обработке в связи с тем, что в процессе обработки уменьшается вязкость рабочей смеси [1].

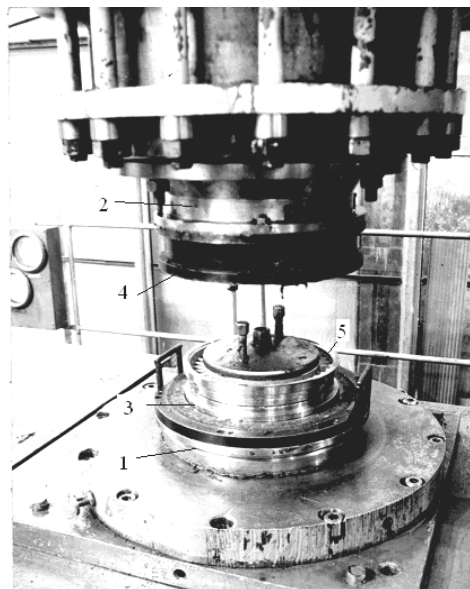


Рис. 4. Вид рабочей зоны с установленной заготовкой в приспособлении

Известно [1], что шероховатость поверхностей каналов и величина съема металла по обрабатываемой поверхности зависит от состава и давления РС в зоне обработки. Но давление РС в канале изменяется как по длине канала вследствие гидравлического сопротивления течению среды, так и при изменении суммарной площади всех одновременно обрабатываемых каналов (при постоянном давлении среды на входе в каналы детали). Поддержание постоянного расхода и давления среды на входе в каждый канал при обработке вызывает необходимость применения устройств для АЭО с определенной емкостью рабочих камер, определяемой из отношения

$$k_y = \frac{V_{\text{кам}}}{V_{\text{кан}}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{кам}}$  – объем камеры с рабочей средой,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{кан}}$  – общий суммарный объем обрабатываемых каналов,  $\text{м}^3$ .

Как установлено, коэффициент  $k_y$ , рассчитанный по зависимости (1), для обработки крупногабаритных деталей должен иметь величину 1,2...1,6. При таком соотношении объемов достигается оптимальное время одного цикла обработки  $T$ :

$$T = T_{\text{рхн}} + T_{\text{пер}} + T_{\text{рхв}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{рхн}}$  и  $T_{\text{рхв}}$  – время рабочего хода штока нижнего и верхнего цилиндра соответственно, с;  $T_{\text{пер}}$  – время на переключение элементов гидроаппаратуры при смене направления экструзии рабочей среды, с.

Обработка возможна и при  $k_v < 1,2$ , т. е. меньшем объеме РС, которая в данном случае испытывает большие нагрузки при АЭО и быстрее нагревается. Нагрев среды уменьшает ее вязкость и жесткость системы, что ведет к ухудшению режущих свойств абразивных составов. Кроме того, использование меньшего объема среды при экструзии увеличивает количество циклов обработки и время  $T_{\text{пер}}$ .

При  $k_v > 1,6$  обработка крупногабаритных деталей требует создания устройств соответствующих габаритов, что может привести к значительному увеличению себестоимости обработки. Для рассматриваемого случая коэффициент  $k_v = 1,5$ .

Опыты выполнены в производственных условиях на каналах, образованных соседними лопатками газовых направляющих аппаратов после литья заготовок по выплавляемым моделям. Заготовки были подвергнуты предварительной механической обработке по стыковочным поверхностям и имели суммарную площадь каналов  $49,5 \times 10^{-2} \text{ м}^2$  (см. рис. 1). При проливе водой необходимо обеспечить общий расход воды через все каналы за время  $27,5 \pm 0,41 \text{ с}$ . Для деталей, не обработанных АЭО, время пролива оказалось меньше заданного на  $0,8 \dots 5,6 \text{ с}$ .

Условия АЭО каналов были выбраны по результатам предварительной обработки образцов. При выборе состава РС варьировалось содержание абразивного зерна и модификатора, снижающего трение полимерной основы среды при АЭО. Выбранный состав РС содержал 75 % электрокорунда белого 25А зернистостью F54 и F16 объемом  $49 \times 10^{-2} \text{ м}^3$ . Полимерная основа среды (носитель) получена при смешении каучука СКТ и фторопласта мелкодисперсного Ф4 (5 %). Для оптимального течения РС давление масла в системе управления УЭШ-350М имело величину 12,0 МПа. При этом время цикла (экструзия среды из одной рабочей камеры в другую и обратно) составляло в пределах  $T = 48 \dots 50 \text{ с}$ . Количество циклов при АЭО определялось задачей достижения расхода постоянно-го объема воды при ее проливе через каналы за заданный интервал времени  $\delta t$ .

Для примера на основании предварительного и последующих (через каждые 10 циклов АЭО) проливов водой заготовки построен график зависимости изменения времени пролива  $\delta t$  через каналы от количества циклов обработки  $N$  (рис. 5):

$$\delta t = f(N), \quad (3)$$

где  $\delta t$  – время пролива через канал, с;  $N$  – количество циклов.

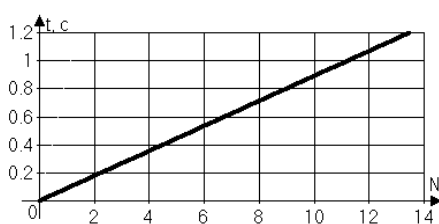


Рис. 5. Зависимость изменения времени пролива  $\delta t$  постоянного объема воды от количества циклов обработки  $N$

Экспериментальные исследования позволили выявить, что в случае незначительного отклонения действительного расхода воды при проливе (непосредственно после литья по выплавляемым моделям) следует применять электрокорунд F54. Для изменения времени пролива на 0,1 с достаточно выполнить 2, 3 цикла АЭО. В случае существенного отклонения расхода жидкости по результатам предварительного пролива водой от заданного в КД расхода воды рекомендовано использовать абразив F16.

Для правильного выбора параметров обработки для каждого наименования деталей рекомендовано использовать зависимость (3). Графики, подобные приведенному на рис. 5, рекомендовано выполнять и регулярно наносить на них результаты расхода воды при проливе с целью контроля работоспособности установки УЭШ-350 и стабильности режимов обработки. В случае больших отклонений от графика необходимо выяснять причину изменения режимов обработки. Возможными причинами отклонения от прямой зависимости могут быть выход из строя одного из насосов гидростанции в процессе обработки; потеря режущей способности абразивных зерен (снижение жесткости среды при ее нагреве, притупление граней абразива, насыщение среды микрочастицами металла обрабатываемой заготовки); недостаточное количество РС в нижней камере и др. Для обеспечения стабильности параметров обработанных деталей (геометрических, газо- и гидродинамических) в системе управления УЭШ-350 предусмотрена регулирование условий и поддержка заданных режимов обработки.

В ходе исследований установлено, что на всех заготовках после литья имеются геометрические погрешности, влияющие на расход жидкости (или газа) при проливе (продувке газом), что затрудняет обработку статистических данных и выбор постоянных режимов АЭО. Поэтому каждую заготовку следует проливать и определять время общего секундного расхода воды через каналы заготовки. Если же в КД заданы требования по обеспечению равномерности распределения жидкости по окружности детали, то при проливе необходимо фиксировать секунднй расход через каждый канал. Тогда при отклонении секундного расхода жидкости через частные каналы обработке следует подвергать только эти каналы. Остальные каналы при монтаже направляющих аппаратов на заготовку следует заглушить.

Шероховатость поверхностей в каналах после АЭО существенно улучшается (с  $R_z = 30 \dots 40 \text{ мкм}$  до  $R_a = 3,2 \dots 1,6 \text{ мкм}$ ) и соответствует требованиям КД. После АЭО произвольное направление шероховатости, характерное для поверхности после литья, изменяется на шероховатость с направлением, параллельным потоку компонентов в каналах при эксплуатации деталей. Это позволяет увеличить КПД агрегата за счет уменьшения пристеночного сопротивления потока жидкости или газа.

Таким образом, применение методики обеспечения точности расхода компонентов через детали абразивно-экструзионной обработкой позволило обеспечить заданную точность расхода компонентов топлива

через каналы деталей, имеющих большое количество лопаток, а также достичь требуемой шероховатости их поверхностей в диапазоне  $R_a = 1,6...3,2$  мкм. Время обработки зависело от исходного состояния поверхностей каналов детали и изменялось в интервале 10...40 мин. При этом геометрические параметры обрабатываемых каналов остались в пределах заданных допусков.

Итак, технология АЭО позволяет успешно проводить на существующем оборудовании операции финишной отделки сложнопрофильных каналов деталей летательных аппаратов с обеспечением заданного качества.

#### Библиографические ссылки

1. Сысоев С. К., Сысоев А. С. Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов: теория, исследования, практика : моногр. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2005.
2. Левко В. А. Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 7. С. 96–100.
3. Установка для экструзионного шлифования крупногабаритных деталей УЭШ-350 : инф. листок № 532-91 / С. К. Сысоев, В. И. Суетов, В. А. Левко, М. А. Лубнин ; ЦНТИ. Красноярск, 1991.
4. А. с.1161359 СССР. МКИ В24С 1/08. Способ обработки деталей абразивной массой / С. К. Сысоев, М. А. Лубнин. Заявлено 11.07.83; Оpubл. 15.06.85, Бюл. № 22.

5. Сысоев А. С. Абразивно-экструзионное улучшение качества внутренних поверхностей каналов после электроэрозионной обработки в деталях летательных аппаратов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2002.

#### References

1. Sysoev S. K., Sysoev A. S. *Jekstruzionnoe honingovanie detalej letatel'nyh apparatov: teorija, issledovaniya, praktika* (Extrud honing of aircraft details: the theory, research, practice). Krasnoyarsk, 2005, 220 p.
2. Levko V. A. *Vestnik SibGAU*. 2005, № 7, pp. 96–100.
3. Sysoev S. K., Suetov V. I., Levko V. A., Lubnin M. A. *Ustanovka dlja jekstruzionnogo shlifovaniya krupnogabaritnyh detalej UJeSh-350* (Plant for extrud grinding of large-sized details): inf. listok № 532-91. CNTI, Krasnoyarsk, 1991, 40 p.
4. А. s.1161359 SSSR. MКИ V24S 1/08. *Sposob obrabotki detalej abrazivnoj massoj* (Method of details machining by abrasive medium) / S. K. Sysoev, M. A. Lubnin. Zayavleno 11.07.83; publ. 15.06.85, Bull. № 22, 3 p.
5. Sysoev A. S. *Abrazivno-jekstruzionnoe uluchshenie kachestva vnutrennih poverhnostej kanalov posle jelektro-erozionnoj obrabotki v detaljah letatel'nyh apparatov* (Abrasive-extrude improvement of the internal surfaces quality of aircraft detail channels after electro-erosion machining). Krasnoyarsk, 2002, 20 p.



РАЗДЕЛ  
4



ЭКОНОМИКА



УДК 658.012

## ИНСТРУМЕНТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПЕРСОНАЛА

Н. Т. Аврамчикова, Н. Н. Солоненко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: avr-777@yandex.ru

*Рассматриваются проблемы, связанные с недостаточной разработанностью методических и теоретических основ оценки эффективности деятельности работников организаций в современных условиях. Отмечается высокая практическая значимость профессионализма персонала для повышения конкурентоспособности организации, что предопределяет необходимость проведения исследований в области оценки эффективности их деятельности. В процессе исследования разработаны активные критерии оценки эффективности деятельности персонала, позволяющие осуществлять персональный подход к работе каждого сотрудника, своевременно поощрять работников или принимать меры дисциплинарного воздействия, а также своевременно сформировать квалифицированный кадровый резерв.*

*Ключевые слова:* эффективность деятельности персонала, критерии оценки, квалификация кадров.

## TOOLS OF ASSESSMENT OF PERSONNEL ACTIVITY EFFICIENCY

N. T. Avramchikova, N. N. Solonenko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: avr-777@yandex.ru

*In the article the problems of insufficient readiness of methodical and theoretical bases of assessment of efficiency of employees activity of the organizations in the modern conditions are considered. The authors point out the high practical importance of professionalism of personnel for the increase of competitiveness of an organization, that predetermine the need of carrying out the researches in the field of assessment of efficiency of personnel activity. In the process of research the authors developed the active criteria of assessment of personnel activity efficiency, which allows to develop the personal approach to the activity of each employee: to encourage employees or to take measures of disciplinary influence, and, as a result, to keep the qualified personnel reserve.*

*Keywords:* efficiency of personnel activity, criteria of assessment, qualification of personnel.

В современных условиях управление персоналом развивается очень активно. Однако необходимо отметить, что существующие проблемы развития управления персоналом и его отдельных направлений связаны с недостаточной теоретической разработанностью одного из важнейших элементов – оценки эффективности его деятельности. В общефилософском смысле оценка понимается как отношение субъекта к определенному объекту или процессу. В более узком смысле ученые ведут речь об оценке какого-либо явления или процесса, например, об оценке отдельных аспектов трудовой деятельности: эффективности труда, производительности труда, результативности использования трудовых ресурсов, оптимальности отношения к труду и трудовой мотивации и пр.

В современной экономике актуальной является проблема оценки персонала в связи с ростом роли человеческих ресурсов в обеспечении конкурентоспособности организации и в связи с необходимостью объективной информации о перспективах развития данных ресурсов. Оценка персонала в таком случае является информационной базой для принятия важных управленческих решений не только по развитию персонала, но и при выработке стратегии развития

организации. В итоге оценка становится инструментом контроля в регулировании экономических, управленческих, психологических, социально-трудовых процессов, протекающих в организации и влияющих на темпы и качественный уровень ее функционирования [1].

Поиск и разработка действенных методов оценки эффективности деятельности персонала является одной из важнейших задач управления персоналом. Многообразие теоретических подходов создает сложную ситуацию для руководителей и менеджеров любой организации. Оценка эффективности деятельности персонала – это целенаправленный процесс установления соответствия качественных характеристик работника организации требованиям должности или рабочего места.

Формальная система оценки уровня компетентности в каждой профессиональной сфере выражается в комплексе критериев – квалификационных требований, предъявляемых к соответствующим профессиональным должностям и описанных в соответствующих актах, инструкциях, документах [2].

Актуальность имеющихся проблем, недостаточная разработанность ряда методических и теоретических



основ формирования критериальной базы оценки качества работников, их высокая практическая значимость для повышения конкурентоспособности организаций в целом предопределяют необходимость проведения исследований в области разработки критериев оценки эффективности деятельности персонала [3].

Деятельность по формированию и развитию профессиональной компетентности персонала должна охватывать все этапы развития работника как личности. При этом начальные этапы развития работника организации играют решающую роль, так как именно на этих этапах формируется ценностный фундамент личности будущего профессионала, вокруг него становится возможным формировать и развивать комплекс предметных знаний, навыков и способностей, практическое применение которых позволит добиваться значимых для предприятия и общества целей. Объектом оценки выступает работник организации во всем многообразии его социально значимых черт, элементов личности.

Оценка работы персонала является одним из важнейших направлений кадрового менеджмента, она призвана способствовать выявлению путей повышения отдачи от людей, работающих в данной организации.

Каждый работник в процессе выполнения работы осуществляет сбор, анализ, оценку информации и разрабатывает план улучшения работы. Оценка результатов деятельности не только позволяет работнику яснее увидеть стоящие перед ним задачи и узнать, насколько хорошо он работает, но также оказывает влияние на будущую работу, на его отношение к делу и желание добиться наилучших результатов.

Оценка работы сотрудника в данный момент на данном рабочем месте не означает, что он будет столь же успешно исполнять и другую, более сложную, более ответственную работу, но информация, полученная в результате оценки, имеет высокую ценность для прогноза успешности работника в новой должности.

Результаты оценки работы персонала используются для принятия управленческих и административных решений, связанных с назначениями, переводами, увольнениями, оплатой труда или наказаниями.

В связи с возрастающими требованиями по повышению конкурентоспособности организаций, необходимо, на наш взгляд, разработать положение о критериях оценки эффективности и результативности деятельности сотрудников, определяющее порядок их применения в целях начисления выплат, составляющих денежное содержание работника по следующим параметрам:

- премии за выполнение особо важных и сложных заданий;
- премии по результатам работы за год;
- ежемесячная (персональная) выплата за сложность, напряженность и высокие достижения в работе;
- ежемесячная надбавка к должностному окладу за особые условия работы в данной организации.

В данном положении должны быть определены критерии, устанавливающие уровень знаний работников своих профессиональных обязанностей и нормативно-правовых актов. Критерии должны определять

степень овладения работником профессиональными навыками и умениями и учитывать их профессиональный опыт (совокупность практически усвоенных работником знаний, умений, навыков при исполнении должностных обязанностей). В перечень оценочных показателей должны входить уровень организованности, ответственности (способности своевременно осуществлять планомерные действия), инициативы и самостоятельности (способности к активным действиям по осуществлению должностных обязанностей), а также степень соблюдения сроков исполнения поручений.

В этой связи, наряду с традиционными, важными и необходимыми являются следующие критерии:

- количественные – определяющие достижение работниками результатов, выраженных в определенных единицах измерения;
- качественные – определяющие эффективность деятельности, исходя из наличия либо отсутствия нарушений законодательства, правил трудового распорядка и иных нарушений либо допущенных ошибок при выполнении должностных обязанностей;
- временные – позволяющие учесть соблюдение различных сроков, установленных правовыми актами, законодательством и иными нормативными актами.

Эти критерии необходимо использовать при начислении ежемесячного денежного поощрения, и их желательно определять по каждой группе должностей организации (высшей, главной, ведущей, старшей и младшей), так как у каждой группы должностей свой уровень ответственности.

Разработка вышеназванного положения существенно повысит качество проводимых аттестаций работников, которые проводятся один раз в три года в целях определения соответствия работника замещаемой должности в данной организации в соответствии с действующим законодательством РФ.

Аттестация работников предприятий и организаций проводится в следующих целях:

- определение уровня профессиональной подготовки и соответствия работника замещаемой должности;
- стимулирование роста квалификации и повышения ответственности работников за выполнение функциональных обязанностей;
- установление соответствия оплаты труда работника выполняемой им работе;
- формирование кадрового резерва для продвижения по службе;
- определение необходимости повышения квалификации, профессиональной подготовки и переподготовки сотрудников;
- обеспечение возможности долгосрочного планирования передвижения кадров.

В результате аттестации работнику дается одна из следующих оценок: соответствует замещаемой должности; соответствует замещаемой должности при условии выполнения рекомендаций аттестационной комиссии по его служебной деятельности и повторной аттестации через год; не соответствует замещаемой должности.

Кроме этого, аттестационная комиссия вправе внести на рассмотрение руководителя предприятия или организации следующие рекомендации: о присвоении работнику определенной квалификационной категории в соответствии с его профессиональным уровнем, опытом работы, личностными и деловыми качествами; об индивидуальном плане по обучению сотрудника (курсы повышения квалификации, переквалификация, стажировка и т. д.); об изменении оплаты труда [4].

Оценка эффективности деятельности персонала может вызвать нежелание руководителей участвовать в оценке работы своих подчиненных по следующим причинам:

- отвлечение от выполнения основных обязанностей, помеха в работе, дополнительная нагрузка или очередная кампания по «наведению порядка»;
- нежелание критиковать подчиненного и выслушивать возражения в отношении критики, предоставление работникам негативной обратной связи, когда приходится указывать на допущенные ошибки, просчеты или низкие рабочие показатели;
- результаты оценки могут иметь негативные последствия для подчиненных (увольнение, понижение в должности, лишение премии, ухудшение отношений в коллективе и др.).

Такие решения неприятны не только для работников, в отношении которых они принимаются, но и для многих руководителей, которые вынуждены принимать такие решения. Часто руководителю бывает легче смириться с плохой работой подчиненного, чем взять на себя ответственность, связанную с его увольнением или понижением зарплаты.

Причинами формального проведения аттестационных процедур по оценке эффективности деятельности работников со стороны руководителей, как правило, являются:

- неудовлетворительная подготовка руководителей к процедуре оценки, когда они точно не знают, как будут использоваться ее результаты, или недостаток навыков, необходимых для проведения оценочного собеседования;
- неприятие руководителем новых, ранее не использованных оценочных процедур, отличных от привычных подходов, так как любые отклонения от использовавшихся ранее методов оценки вызывают сопротивление.

Оценка работы персонала является одним из важнейших направлений кадрового менеджмента, способствующая повышению эффективности деятельности как отдельного служащего, так и организации в целом. В настоящее время предприятия и организации устанавливают определенные требования к работникам, выполняющим те или иные виды работ, включая их в должностные инструкции и трудовой контракт, но не уделяют должного внимания конкретным показателям их деятельности.

Трудовые контракты работников не содержат действенных инструментов для оценки результатов их труда. А без этих инструментов невозможно

не только поставить вопрос о необходимости улучшения тех или иных рабочих показателей сотрудника, но и определить уровень эффективности их деятельности [5].

Необходимо отметить, что концептуально существуют два метода оценки труда работников:

- пассивный (вспомогательный), опосредованный качествами личности, предназначенный для решения лишь определенного круга задач, связанных в основном с формированием резерва персонала на выдвижение и работой по сокращению кадров;
- активный, предназначенный для оценки труда работников непосредственно по результатам его деятельности. К сожалению, на сегодняшний день данный метод разработан значительно меньше, чем подход опосредованной оценки.

Реализация активного метода определяет новые подходы к деятельности персонала, особенно руководителей подразделений, которые могли бы быть положены в основу оценки их труда.

Исследуя имеющиеся подходы к оценке эффективности деятельности персонала, авторами разработаны критерии оценки выполнения должностных обязанностей работников, которые условно также можно разделить на пассивные, которые явно не влияют на выполнение работы и чаще зависят от условий труда, и активные, непосредственно оценивающие эффективность деятельности персонала. Результаты исследования представлены в таблице.

Активные критерии целесообразно использовать при оценке эффективности деятельности работников еженедельно, пассивные – при подготовке к аттестации работников. Контроль правильности и полноты использования критериев осуществляют непосредственный руководитель, делопроизводитель и помощник руководителя организации.

Оценка деятельности каждого работника с помощью данных критериев позволит осуществлять персональный подход к работе, реально оценивать деятельность каждого сотрудника, своевременно поощрять работников или принимать меры дисциплинарного воздействия, своевременно избавиться от безынициативных работников, а также своевременно сформировать квалифицированный кадровый резерв.

Таким образом, создание методического инструментария диагностики эффективности деятельности персонала, позволяющего оценивать и развивать способности каждого отдельного работника, является актуальной и своевременной задачей. Наиболее важным инструментом управления персоналом выступает оценка кадров, с ее помощью осуществляется процедура отбора, конкурса, управления профессиональной и должностной карьерой работника, создание мотивационной среды. Оценка качества труда сотрудников – это важнейший инструмент повышения эффективности деятельности организаций в целом, который позволяет не только устанавливать стандарты и требования к работе отдельных работников, но и выявлять новые методы оценки эффективности и результативности их деятельности.



Критерии оценки эффективности деятельности персонала

| Пассивные критерии                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                            | Активные критерии                                                                                            |                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| По месту работы                                                                                                                               | По персоналу                                                                                                                                                                                                                               | Количественные                                                                                               | Качественные                                                                                                                                                      |
| Наличие планов работы на месяц, квартал, год                                                                                                  | Результаты работы подводятся ежедневно, еженедельно, ежемесячно, ежеквартально, не подводятся вообще                                                                                                                                       | Результаты работы за месяц, квартал, год                                                                     | Выполнение особо важных и сложных заданий                                                                                                                         |
| Наличие трудового договора и должностной инструкции работника                                                                                 | Продолжительность работы в организации                                                                                                                                                                                                     | Общее количество документов, поступивших для исполнения                                                      | Сложность, напряженность и высокие достижения в работе                                                                                                            |
| Наличие разработанных регламентов, инструкций и прочих режимных документов                                                                    | Способ принятия работника на работу:<br>– по личным рекомендациям;<br>– по результатам конкурса;<br>– случайно                                                                                                                             | Общее количество документов, выполненных некачественно и несвоевременно                                      | Отсутствие нарушений законодательства                                                                                                                             |
| Наличие двойной подчиненности: непосредственному руководителю и вышестоящему руководителю, или руководителю иного структурного подразделения  | Возможность работником выполнять:<br>– более сложную работу;<br>– работу непосредственного руководителя;<br>– работу согласно должностной инструкции;<br>– работу менее ответственную или требующую меньших умственных и физических затрат | Общее количество жалоб и заявлений, полученных от населения и организаций о некачественной работе сотрудника | Отсутствие нарушений правил трудового распорядка и иных нарушений                                                                                                 |
| Наличие у непосредственного руководителя опыта, мудрости и профессионализма                                                                   | Характер взаимоотношений в трудовом коллективе:<br>– плодотворного сотрудничества;<br>– доносимости;<br>– соревновательности                                                                                                               | Общее количество жалоб и заявлений, полученных от населения и организаций о нарушении их законных прав       | Отсутствие нареканий со стороны непосредственного руководителя, правоохранительных органов и вышестоящих и контролирующих органов                                 |
| Наличие полноценных условий труда:<br>– надежность работы оргтехники;<br>– наличие расходных материалов;<br>– стабильность доступа в Интернет | Использование рабочего времени в личных целях:<br>– временное отсутствие без предупреждения руководителя и без внесения записи в журнал учета рабочего времени;<br>– написание заявления о временном отсутствии на рабочем месте           |                                                                                                              | Отсутствие приказов о привлечении к материальной и дисциплинарной ответственности за допущенные ошибки при выполнении должностных обязанностей                    |
|                                                                                                                                               | Наличие служебных проверок и предоставление объяснений за срыв задания, невыполнение поручения, волокиту, на жалобу и т. п.                                                                                                                |                                                                                                              | Наличие нарушений, выявленных контрольно-счетной палатой города или района по результатам проводимых проверок, свидетельствующих о виновных действиях исполнителя |
|                                                                                                                                               | Наличие возможности перспективного роста и пополнения профессиональных навыков                                                                                                                                                             |                                                                                                              | Передача исполнения обращений граждан, организаций, ранее полученных поручений для исполнения другому сотруднику                                                  |
|                                                                                                                                               | Наличие при выполнении работы конкретного работника «изюминки», которая выполняется с наибольшим удовольствием и отличными качеством                                                                                                       |                                                                                                              | Наличие просроченных согласований документов (проектов муниципальных правовых актов), недоказанность вменяемых работнику нарушений и т. д.                        |
|                                                                                                                                               | обращение коллег к конкретному работнику за советом и с просьбой оказания помощи для качественного исполнения их должностных обязанностей                                                                                                  |                                                                                                              | Наличие контрактов, договоров, выполнение поручений, заключенных с нарушением сроков                                                                              |

| Пассивные критерии |                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Активные критерии |                                                                                                                     |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| По месту работы    | По персоналу                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Количественные    | Качественные                                                                                                        |
|                    | Основная мотивация при выполнении задания:<br>– карьерное продвижение;<br>– увеличение заработной платы;<br>– получение возможности для учебы;<br>– повышение квалификации;<br>– получение грамоты, премии;<br>– страх наказания и его неизбежности за нарушение трудовой дисциплины и т. п. |                   | Наличие экономической эффективности при выполнении особо важных и сложных заданий                                   |
|                    | Характер восприятия понижения в должности или в заработной плате                                                                                                                                                                                                                             |                   | Принятие самостоятельных решений при исполнении должностных обязанностей                                            |
|                    | Основная мотивация выбора работы:<br>– сложность выполнения заданий;<br>– легкость выполнения заданий;<br>– высокая оплата труда;<br>– наличие хорошего коллектива                                                                                                                           |                   | Наличие предложений по улучшению качества выполнения должностных обязанностей                                       |
|                    | Выполнение работником работы, несвойственной основной должностной инструкции                                                                                                                                                                                                                 |                   | Осуществляется ли подмена в случае временной нетрудоспособности, отпуска или временного отсутствия на рабочем месте |

## Библиографические ссылки

1. Логинов Ю. С., Гагаринская Г. П. Современные правила оценки специалистов // Инновационные технологии в управлении бизнесом и регионом : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Ч. 2. Красноярск, 2011. С. 270–276.
2. Шнайдер Б. В. Персонал для организации: научный поход к поиску, отбору, оценке сотрудников. 2-е изд., доп. и перераб. М. : Управление персоналом, 2010.
3. Данилина С. Сертификация подтвердит высокий уровень российских кадровиков // Управление персоналом. 2009. № 15. С. 3–5.
4. Информационное письмо АНО [Электронный ресурс] // Центр сертификации. URL: <http://www.cs-stroi.ru/personal/>.
5. Мероприятие по международной сертификации бизнес-тренеров [Электронный ресурс]. URL: <http://www/gkmim.ru/index.php?area=trening&trening=262>.

## References

1. Logins Yu. S., Gagarinsky G. P. *Materialy nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem "Innovatsionnyye tekhnologii v upravlenii biznesom i regionom"* (Materials of scientific and practical conference with the international participation "Innovative technologies in a business management and the region"), pt. 2, Krasnoyarsk, SibSAU, 2011, pp. 270–276.
2. Schneider B. V. *Personal dlya organizatsii: nauchnyy pokhod k poisku, otboru, otsenke sotrudnikov* (The personnel for the organization: scientific campaign to search, selection, an assessment of employees). 2nd prod., additional and reslave. Moscow, Upravleniye personalom, 2010, 98 p.
3. Danilin S. *Upravleniye personalom*. 2009, № 15, pp. 3–5.
4. *Informatsionnoye pis'mo ANO*. (Information letter of Autonomous Non-Commercial Organization). Certification Center. Available at: <http://www.cs-stroi.ru/personal/>.
5. *Meropriyatiye po mezhdunarodnoy sertifikatsii biznes-trenеров* (Action for the international certification of business coaches). Available at: <http://www/gkmim.ru/index.php?area=trening&trening=262>.

© Аврамчикова Н. Т., Солоненко Н. Н., 2013

## РОЛЬ СТЕЙКХОЛДЕРОВ В ФОРМИРОВАНИИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Е. В. Белякова, А. В. Самарцева

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: a.v.samartseva@gmail.com

*Рассматривается задача формирования региональной логистической инфраструктуры (РЛИ). Изучается роль заинтересованных сторон в проектах по формированию РЛИ. Выделяются основные стейкхолдеры, предлагается методика оценки их роли в проекте. Представлены инструменты оценки интересов, влияния и значимости стейкхолдеров. Рассмотрен опыт государственно-частного партнерства (ГЧП) в Германии. Полученные результаты позволяют предложить модель ГЧП для Красноярского края. Описанная методика оценки заинтересованных сторон может быть использована для их выбора, определения роли в процессе формирования РЛИ и разработки мероприятий для вовлечения в проект, позволяющей в кратчайшие сроки создать инфраструктуру с учетом интересов всех стейкхолдеров.*

*Ключевые слова:* логистическая инфраструктура региона, стейкхолдер, государственно-частное партнерство.

## ROLE OF STAKEHOLDERS IN FORMATION OF THE REGIONAL LOGISTICS INFRASTRUCTURE

E. V. Belyakova, A. V. Samartseva

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: a.v.samartseva@gmail.com

*The problem of the regional logistics infrastructure formation (RLI) is observed. The goal of this work was to study the role of stakeholders in the project of RLI formation. The authors identify the key stakeholders, discuss their role in the project. The assessment tools for their interests, the impact and importance of stakeholders are pointed out. It is shown how to define their roles in particular project and take measures for their involvement. The experience of public-private partnership in Germany is considered. The results obtained demonstrate the possibility of public-private partnership in Krasnoyarsk region. The described method of stakeholders evaluation can be used to select them, determine their role in the formation of RLI and develop the measures for their involvement in the project which allows to set up the infrastructure quickly, taking into account the interests of all stakeholders.*

*Keywords:* regional logistics infrastructure, stakeholders, public-private partnership.

Логистическая инфраструктура является одним из ключевых факторов развития регионов. Немаловажную роль в процессе ее формирования играют заинтересованные стороны (стейкхолдеры), поскольку они напрямую влияют на возможность и ход реализации проекта. Наибольшие трудности связаны, как правило, с согласованием бюджета и его делением, а также с возможными скрытыми интересами и страхами (потеря контроля над бизнесом, денежных средств, отказ от интеграции из-за нежелания делиться информацией и т. д.) [1].

Определить интересы и влияние различных групп, участвующих в проекте, произвести его корректировку с учетом их потребностей, а также спланировать стратегию привлечения или нейтрализации групп возможно с помощью методики оценки роли стейкхолдеров (рис. 1).

На первом этапе определения роли заинтересованных сторон должен быть предложен их список. Для решения этой задачи необходимым видится анализ

опыта построения РЛИ в других регионах (странах). Отметим, что с проблемой построения инфраструктуры в условиях дефицита бюджета сталкивалось большинство стран Европы в 90–96 гг. прошлого века, поэтому модели, разработанные там, представляют, с нашей точки зрения, наибольший интерес. Ниже будет рассмотрена модель вовлечения заинтересованных сторон в проект по развитию РЛИ на основе ГЧП, предложенная в Германии [2].

Кроме того, в первый этап определения роли заинтересованных сторон целесообразно включить опрос экспертов (представителей администрации региона, ученых и др.), который позволит выявить скрытых стейкхолдеров и их интересы. В общем виде список заинтересованных сторон можно представить следующим образом: администрация; бизнес-сообщество; общественные организации; ученое сообщество. Эти группы стейкхолдеров могут быть детализированы или расширены, исходя из целей конкретного проекта по формированию РЛИ.



Рис. 1. Методика оценки роли стейкхолдера

Примером такой группировки может служить деление бизнес-сообщества в проекте по формированию РЛИ в Красноярском крае:

- производители (гражданские и оборонные предприятия в части конверсионной продукции);
- владельцы транспортных и экспедиционных организаций;
- владельцы складов и распределительных центров;
- логистические операторы;
- владельцы торговых сетей.

Высокая степень детализации группы представителей логистического бизнеса обусловлена необходимостью выделения стейкхолдеров, непосредственно связанных с процессом построения логистической инфраструктуры. Именно эти заинтересованные стороны обладают достаточной властью повлиять на будущие результаты.

В проекте могут принять участие представители не только крупных компаний, но и малого и среднего бизнеса (МСБ), что позволит учесть интересы всех участников рынка. Диалог власти и МСБ в рассматриваемом проекте можно выстроить через имеющийся механизм ассоциаций и союзов производителей. В данном случае роль общественных организаций заключается в содействии развитию РЛИ (внесение предложений, контроль за реализацией, передача опыта и т. п.). В этой связи необходимо отметить торгово-промышленную палату, как имеющую особый статус и представленную во всех регионах страны.

На следующем этапе конкретизируются сферы интересов выделенных стейкхолдеров. Как правило, они определяются по результатам опросов либо по письменным или устным заявлениям. Удобной формой для их отражения может служить карта интересов стейкхолдеров, где по горизонтали записываются сферы интересов, а по вертикали – наименование заинтересованной стороны (табл. 1). Отметим,

что представленные сферы интересов, также как и группы заинтересованных сторон, могут изменяться в зависимости от целей и направленности проекта. Карта помогает выделить и соотнести общие интересы стейкхолдеров, что учитывается далее при определении их ролей в проекте. Далее прокомментируем заполнение карты. Союз потребителей заинтересован в качественной и дешевой продукции, что при построении РЛИ отражается в сфере стратегического развития. Интересы производителей лежат в области ускорения доставки продукции до потребителя, расширения сбытовой сети. На карте это отражается в стратегическом аспекте, финансах и операционной деятельности.

Задачи администрации муниципалитетов и края состоят в обеспечении развития региона, пополнения бюджетов за счет увеличения налоговой базы, развития законодательства в области логистики, формирования положительного образа власти.

Владельцы транспортных и экспедиторских фирм заинтересованы в снижении затрат на ремонт парка автомобилей, увеличении заказов, уменьшении времени логистического цикла.

Владельцы складов и РЦ видят преимуществами от участия в проекте стабильный график поставок, приток новых клиентов за счет PR.

Логистические операторы представляют совокупность интересов владельцев складов и РЦ, транспортных и экспедиционных фирм.

Владельцы торговых сетей перспективным считают развитие сети, увеличение прибыли, доступность для населения своих торговых точек.

Ассоциации и союзы производителей отражают стратегические интересы участников, а также их заинтересованность в правовом аспекте.

Ученое сообщество разрабатывает проект, а также получает статистику от операционной деятельности компаний.

Фрагмент карты интересов стейкхолдеров

| Стейкхолдеры                                 | Сфера интересов         |         |                                              |                           |    |
|----------------------------------------------|-------------------------|---------|----------------------------------------------|---------------------------|----|
|                                              | Стратегическое развитие | Финансы | Законодательство и нормативное регулирование | Операционная деятельность | PR |
| Союз потребителей                            | +                       | +       |                                              |                           |    |
| Производители                                | +                       | +       |                                              | +                         | +  |
| Администрации муниципалитетов и края         | +                       | +       | +                                            |                           | +  |
| Владельцы транспортных и экспедиторских фирм | +                       | +       |                                              | +                         | +  |
| Владельцы складов и РЦ                       | +                       |         |                                              | +                         | +  |
| Логистические операторы                      | +                       | +       |                                              | +                         | +  |
| Владельцы торговых сетей                     | +                       | +       |                                              | +                         | +  |
| Ассоциации и союзы производителей            | +                       |         |                                              |                           |    |
| Ученое сообщество                            | +                       |         |                                              | +                         |    |
| Социально активное население                 | +                       |         |                                              |                           |    |



Рис. 2. Модель «власть, легитимность и срочность»

Социально активное население представляет интересы граждан в области стратегического развития региона, отдельных улучшений на местах.

С точки зрения авторов, необходимо также выделить скрытых интересов стейкхолдеров. Наиболее современной моделью Stakeholder Mapping (систематизация заинтересованных сторон) является модель «власть, легитимность и срочность», описанная Mitchell, Agle and Wood (1997, 1999 гг.) [3]. Эта модель представляет поведение заинтересованных сторон 7 видов, в зависимости от сочетания 3 параметров: власть заинтересованной стороны оказывать влияние на проект; легитимность отношений и действий заинтересованной стороны с проектом с точки зрения целесообразности или правомерности; срочность требований со стороны заинтересованной стороны с точки зрения критичности и чувствительности ко времени для этой заинтересованной стороны (рис. 2).

Стейкхолдеры, которые демонстрируют только одну из трех характеристик (область 1, 2 и 3 рассматриваемой модели), определяются как скрытые заинтересованные стороны. Они далее классифицируются на бездействующие, дискреционные или требовательные заинтересованные стороны. Заинтересованные стороны, имеющие два из трех параметров (области 4, 5 и 6), определены как выжидательные заинтересованные стороны. Они далее классифицируются на доминирующие, опасные или зависимые заинтересованные стороны.

Заинтересованные стороны, демонстрирующие все три параметра (область 7), называются безусловными заинтересованными сторонами.

С учетом карты интересов стейкхолдеров (см. табл. 1) рассмотренная модель включает:

1. Скрытые заинтересованные стороны, которые подразделяются:

- на бездействующие (область 1);
- дискреционные (область 2) – союз потребителей (следит за соблюдением интересов потребителей);
- требовательные (область 3) – социально активное население (заинтересовано в сокращении сроков формирования инфраструктуры).

2. Выжидательные заинтересованные стороны:

- доминирующие (область 4);
- опасные (область 5);
- зависимые (область 6) – производители (заинтересованы в минимальных сроках построения РЛИ и принятия законов в области логистики); ученое сообщество (разрабатывают проект РЛИ, вносят предложения по формированию законодательства в этой области, предлагают решения, сокращающие время реализации проекта).

3. Безусловные заинтересованные стороны (область 7): администрации муниципалитетов и края; владельцы транспортных и экспедиторских фирм; владельцы складов и РЦ; логистические операторы; владельцы торговых сетей; ассоциации и союзы производителей.

На третьем этапе предложенной методики оценивается влияние и значимость заинтересованных сторон. Это можно сделать с помощью матриц «власть–динамизм» и «власть–интерес».

Матрица «власть–динамизм» (табл. 2) классифицирует стейкхолдеров по отношению к власти, которой они обладают, и динамизму их положения. Карту «власть–динамизм» можно использовать для того, чтобы определиться с тем, куда должны быть направлены политические усилия во время разработки новых стратегий. Заинтересованные стороны в группах 1 и 2 наиболее просты в общении. Стейкхолдеры в группе 3 важны, поскольку имеют власть. Тем не менее их уровень динамизма низок, поэтому положение предсказуемо и их ожидания относительно легко выполнить.

Заинтересованные стороны в группе 4 заслуживают наибольшего внимания со стороны менеджмента, так как у них есть власть и их положение трудно предсказать. В общении с ними нужно попробовать испытать новые стратегии прежде, чем принимать окончательные решения.

Из табл. 2 видно, что в рассмотренном примере большая часть участников попадает в группу «наи-

большая опасность или возможности». Это объясняется тем, что они являются основными инвесторами проекта, а поэтому несут основные риски.

Далее проведем классификацию заинтересованных сторон по отношению к власти, которой они обладают, и степени их заинтересованности в стратегиях организации (табл. 3). Заинтересованные стороны в группе *A* требуют минимальных усилий и мониторинга. Заинтересованных сторон в группе *B* необходимо постоянно держать информированными. Они могут быть важными для оказания влияния на заинтересованные стороны с большей властью. Заинтересованные стороны в группе *C* обладают властью, но их уровень интереса в стратегиях организации низок. Они, как правило, относительно пассивны, но могут внезапно приобрести большее значение в результате определенных событий, перейдя в группу *D* по данному вопросу. Их требования должны быть удовлетворены. Заинтересованные стороны в группе *D* как влиятельны, так и высокозаинтересованы в стратегиях организации. Приемлемость стратегий с точки зрения этих ключевых игроков должна быть важной составляющей в оценке новых стратегий.

Таблица 2

Матрица «сила–динамизм»

|              |         | Изменчивость                               |                                              |
|--------------|---------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
|              |         | Низкая                                     | Высокая                                      |
| Сила влияния | Низкая  | 1<br>Наименее проблематичные               | 2<br>Непредсказуемые, но управляемые         |
|              |         | Союз потребителей                          | Производители                                |
|              |         |                                            | Социально активное население                 |
|              | Высокая | 3<br>Обладающие влиянием, но предсказуемые | 4<br>Наибольшая опасность или возможности    |
|              |         | Администрации муниципалитетов и края       | Владельцы транспортных и экспедиторских фирм |
|              |         | Ассоциации и союзы производителей          | Владельцы складов и РЦ                       |
|              |         |                                            | Логистические операторы                      |
|              |         |                                            | Владельцы торговых сетей                     |
|              |         |                                            | Ученое сообщество                            |
|              |         |                                            |                                              |
|              |         |                                            |                                              |

Таблица 3

Матрица «власть–интерес»

|              |         | Уровень заинтересованности           |                                              |
|--------------|---------|--------------------------------------|----------------------------------------------|
|              |         | Низкий                               | Высокий                                      |
| Сила влияния | Низкая  | <i>A</i><br>Минимальные усилия       | <i>B</i><br>Держать в курсе                  |
|              |         |                                      | Производители                                |
|              |         |                                      | Союз потребителей                            |
|              |         |                                      | Ученое сообщество                            |
|              |         |                                      | Социально активное население                 |
|              | Высокая | <i>C</i><br>Удовлетворять требования | <i>D</i><br>Ключевые игроки                  |
|              |         |                                      | Администрации муниципалитетов и края         |
|              |         |                                      | Владельцы транспортных и экспедиторских фирм |
|              |         |                                      | Владельцы складов и РЦ                       |
|              |         |                                      | Логистические операторы                      |
|              |         |                                      | Владельцы торговых сетей                     |

Определение роли стейкхолдеров в проекте

| Стейкхолдер                                  | Ресурсы  |     |                    |    |                             |     |       | Роль в проекте        |
|----------------------------------------------|----------|-----|--------------------|----|-----------------------------|-----|-------|-----------------------|
|                                              | Know how | %   | Финансовые ресурсы | %  | Законодательные возможности | %   | Сумма |                       |
| Союз потребителей                            | 0        | 0   | 0                  | 0  | 2                           | 100 | 2     | Контролер             |
| Производители                                | 2        | 50  | 2                  | 50 | 0                           | 0   | 4     | Консультант-инвестор  |
| Администрации муниципалитетов и края         | 1        | 20  | 1                  | 20 | 3                           | 60  | 5     | Организатор           |
| Владельцы транспортных и экспедиторских фирм | 2        | 67  | 1                  | 33 | 0                           | 0   | 3     | Консультант-инвестор  |
| Владельцы складов и РЦ                       | 2        | 50  | 2                  | 50 | 0                           | 0   | 4     | Консультант-инвестор  |
| Логистические операторы                      | 3        | 75  | 1                  | 25 | 0                           | 0   | 4     | Консультант-инвестор  |
| Владельцы торговых сетей                     | 2        | 50  | 2                  | 50 | 0                           | 0   | 4     | Консультант-инвестор  |
| Ассоциации и союзы производителей            | 1        | 33  | 0                  | 0  | 2                           | 67  | 3     | Консультант-контролер |
| Ученое сообщество                            | 3        | 100 | 0                  | 0  | 0                           | 0   | 3     | Консультант           |
| Социально активное население                 | 0        | 0   | 0                  | 0  | 1                           | 100 | 1     | Наблюдатель           |

На следующем этапе определяется роль стейкхолдеров в проекте. Описанные выше матрицы можно свести к одной, отражающей роль в проекте каждой заинтересованной стороны (табл. 4). Если стейкхолдер имеет 100 % по отдельному ресурсу, то учитывается степень его влияния на проект, т. е. если заинтересованной стороне в сфере законодательства присваивается два балла, то его роль – контролер, если один – наблюдатель. Если стейкхолдер имеет в распоряжении финансовый ресурс, то его роль – инвестор. Если же владеет всеми тремя ресурсами – организатор.

Последний этап оценки роли заинтересованных сторон в формировании РЛИ – разработка мероприятий по вовлечению в проект/нейтрализации.

Существуют различные механизмы вовлечения заинтересованных сторон в проекты регионального и федерального масштабов: ГЧП, кластерный подход, индустриальные платформы и т. п.

В проекте по формированию РЛИ могут найти отражение организационные подходы, использованные в Германии, имевшей схожую проблему (износ инфраструктуры при дефиците бюджета). К ним относятся: сетевая модель, модель рабочей группы, модель советов по поддержке ГЧП [2].

Под сетевой моделью следует понимать объединение различных органов государственной и муниципальной власти, представителей частного бизнеса, лоббистских групп различных секторальных союзов по сетевому принципу. В середине сети всегда находится орган поддержки развития ГЧП, берущий на себя обязанности по разработке методических рекомендаций, оказанию консультационных услуг, а также являющийся центральным и связующим звеном между другими участниками сети, т. е. представителями государства, муниципалитетов, частного сектора экономики.

Находясь в центре сети, орган поддержки выполняет функцию перевалочного пункта для обмена информацией между различными игроками. Кроме того, он даёт новые импульсы для развития системы, внося в поток обмена информацией между различными звеньями сети результаты своих исследований и накопленную за время деятельности экспертизу.

Использование сетевой организационной модели позволяет добиться высокой степени горизонтальной интеграции всех потенциальных игроков на рынке ГЧП. Благодаря относительно неформальной структуре сети, участие в ее деятельности возможно также и для представителей бизнеса, которые, как правило, не могут принимать участие в работе иерархически организованных органов государственной власти. Кроме того, следует отметить и сохранение добровольного начала в работе сети, что, в свою очередь, также положительно влияет на степень внедрения институтов ГЧП на районном уровне.

Недостатком этого организационного подхода является то, что из-за отсутствия четкой вертикали внутри самой структуры возможно возникновение конфликтов компетенции между различными государственными и муниципальными структурами, что может негативно отразиться на атмосфере внутри организации и тем самым сказаться на готовности игроков внедрять механизмы ГЧП при реализации конкретных проектов.

Рассмотрим пример возможной реализации описанного организационного подхода в Красноярском крае. На уровне региона он может быть представлен рабочими группами. Как правило, в их состав входят представители министерства финансов, ответственные за финансирование инфраструктурных и других социально значимых проектов. Участников рабочей группы можно разделить на постоянных и временных или приглашенных.

К первой группе относятся представители министерства финансов и органов муниципальной власти. На отдельные заседания групп приглашаются представители среднего и крупного бизнеса, а также сотрудники крупных лоббистских секторальных организаций (например, Торгово-промышленная палата). Рассматривая этот вид организации органов по поддержке ГЧП, следует, в первую очередь, отметить четкость разделения компетенций, исключающую любые конфликты. Основным адресатом потенциальных обращений представителей муниципалитетов и частного бизнеса становятся оперативные группы при районных министерствах финансов, которые при необходимости могут привлечь сотрудников других ведомств.

Рациональным также видится созданная по принципу консультационного совета организация, являющаяся платформой для обмена информацией и опытом между представителями государственной и муниципальной власти, частного бизнеса, потенциальных кредиторов. Кроме того, широта представленных интересов благотворно сказывается на научно-методическом сегменте деятельности, так как сотрудники совета, ответственные за эту отрасль, получают необходимые для работы информационные импульсы от всех потенциальных участников проекта. В число его членов входят чиновники краевого правительства и органов исполнительной власти муниципалитетов, представители частного бизнеса, а также ученые, исследующие применение механизмов ГЧП на практике. Встречи совета проходят на регулярной основе несколько раз в году. На заседаниях участники обмениваются опытом и разрабатывают дальнейшие цели деятельности совета по внедрению институтов ГЧП на практике. Предложенный механизм позволяет учесть интересы выделенных заинтересованных сторон, способствует увеличению инвестиционной привлекательности проектов по формированию РЛИ на территории Красноярского края.

Описанная методика оценки заинтересованных сторон может быть использована для их выбора, определения роли в процессе формирования РЛИ и разработки мероприятий для вовлечения в проект, что позволит в кратчайшие сроки создать инфраструктуру с учетом интересов всех стейкхолдеров. Рассмотренные инструменты позволяют в простой и наглядной форме отразить не только очевидные, но и скрытые интересы стейкхолдеров. Наиболее сложной задачей, на наш взгляд, является отбор участников и поиск способов вовлечения в проект, которые бы учитывали

специфику экономической ситуации, расположения и стратегию развития региона.

### Библиографические ссылки

1. Белякова Е. В., Самарцева А. В. Инструменты формирования региональной логистической инфраструктуры // Вестник СибГАУ. 2012. № 6 (46). С. 23–29.
2. Левин И. Г. Внедрение государственно-частного партнерства в Германии: структурные предпосылки и организационно-правовые особенности [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pppcenter.ru/ru/activities/analytics/analiticheskaya-statya-vnedrenie-gosudarstven-no-chastnogo-partnerstva-v-germanii-strukturnye-predposylki-i-organizacionno-pravovye-osobennosti>.
3. Stakeholder Mapping (Систематизация заинтересованных сторон) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hr-portal.ru/varticle/stakeholder-mapping-sistematizaciya-zainteresovannyh-storon>.

### References

1. Belyakova E. V., Samartseva A. V. *Vestnik SibGAU*. 2012, № 6 (46), pp. 23–29.
2. Levin I. G. Vnedreniye gosudarstvennogo chastnogo partnerstva v Germanii (Implementation public private partnership in Germany: structural background and legal organizational features). Available at: <http://www.pppcenter.ru/ru/activities/analytics/analiticheskaya-statya-vnedrenie-gosudarstven-no-chastnogo-partnerstva-v-germanii-strukturnye-predposylki-i-organizacionno-pravovye-osobennosti> (accessed 9 April 2013).
3. Stakeholder Mapping. Available at: <http://www.hr-portal.ru/varticle/stakeholder-mapping-sistematizaciya-zainteresovannyh-storon> (accessed 9 April 2013).

© Белякова Е. В., Самарцева А. В., 2013

УДК 658.012.7

## ПРИНЦИПЫ КОНТРОЛЛИНГА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

З. А. Васильева, А. В. Назаревич

Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. академика Киренского, 26а. E-mail: anazarevich70@mail.ru

*Представлено исследование особенностей системы оперативного контроллинга на малых и средних предприятиях машиностроения с серийным типом производства. Выделены факторы, оказывающие существенное влияние на функционирование системы контроллинга рассматриваемых предприятий. Обоснованы принципы оперативного контроллинга производственной деятельности малых и средних предприятий машиностроения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что создание системы оперативного контроллинга позволяет достичь большей мобильности и адекватности при реагировании на возникшие условия в данный момент времени, а также принятия управленческого решения, не перегружая при этом всю управленческую систему предприятия.*

*Ключевые слова: оперативный контроллинг, режим реального времени, декомпозиция процессов контроллинга, степень детализации технологического процесса в системе оперативного контроллинга.*



## PRODUCTION ACTIVITY CONTROLLING PRINCIPLES OF SMALL AND MEDIUM-SIZED MACHINE INDUSTRY ENTERPRISES

Z. A. Vasilyeva, A. V. Nazarevich

Siberian Federal University  
26a Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: anazarevich70@mail.ru

*The article contains materials about the research of operative controlling system features at the small and medium-sized machine industry enterprises with serial type of production in modern conditions of the market. The factors having essential impact on functioning of the considered enterprises controlling system are allocated. The operative controlling principles of the small and medium-sized machine industry enterprises production activity are proved. The received results testify that operative controlling system creation allows to reach higher mobility and adequacy at response to the conditions emerged at present time, as well as to take the administrative decision without overloading the whole enterprise administrative system.*

*Keywords: operative controlling, real time mode, decomposition of controlling processes, extent of technological process specification in operative controlling system.*

Современная ситуация в экономике, характеризующаяся высокой динамикой внешней среды на рынках различного уровня, приводит менеджмент компаний к пониманию необходимости изменения системы управления с точки зрения учета и отражения информации, используемой при принятии управленческих решений. Исследования закономерности тенденций, которые в настоящее время имеют место в экономических процессах на предприятиях машиностроения, выделяют ряд особенностей, обусловленных влиянием внутренних и внешних факторов. К их числу можно отнести:

- постоянное дифференцирование ассортимента выпускаемой продукции;
- сокращение времени вывода новой промышленной продукции на рынок и получения от ее реализации экономического эффекта;
- необходимость снижения издержек, обусловленная высоким уровнем конкуренции;
- повышение уровня диверсификации производственных программ (за счет малых и средних предприятий), а также применение инкрементных инноваций, вызванное высокой степенью коммерческих рисков.

В последнее время основной задачей процессов диверсификации продукции машиностроительных предприятий становится увеличение доли производства для рынков продукции потребительского назначения в условиях ужесточения конкурентной борьбы с импортной продукцией [1].

При этом машиностроительные предприятия сталкиваются с комплексом специфических проблем, характерных для рынка потребительских товаров и вызывающих необходимость перестройки всей системы управления производственными процессами и финансово-хозяйственной деятельности. Среди основных проблем можно выделить следующие:

- существенное сокращение временных интервалов, в течение которых реализуются этапы жизненного цикла продукции, оказывающих влияние на производственно-технологические циклы выпуска

продукции и систему оперативного управления производственными процессами; особенно актуально это для экономически выгодных этапов роста и зрелости;

- необходимость управления рисками и распределения их между участниками процессов производства, продвижения, продажи дифференцированных продуктов, в том числе на основе использования системы аутсорсинга (передачи отдельных функций, от процесса переработки сырья до выпуска готовой продукции, малым и средним предприятиям);

- необходимость замены методов текущего анализа и планирования, ориентированных на данные бухгалтерского учета, которые имеют отставание на период до трех месяцев, методами оперативного управления, использующими информацию, получаемую и анализируемую подразделениями производства в режиме реального времени.

Решение данных проблем возможно при использовании контроллинга как эффективного направления в системе управления микроэкономическими объектами [2]. Однако варианты применения контроллинга при решении указанных проблем могут иметь значительные отличия в зависимости:

- от размеров предприятия (крупные, средние и малые);
- типов производства (массовое, серийное, единичное).

Исследование опыта организации системы контроллинга как основы системы управления на российских и зарубежных предприятиях, отличающихся друг от друга масштабами и типом производства, позволило выявить, что от данных факторов во многом зависит, прежде всего, соотношение долей стратегической и оперативной составляющей в системе контроллинга предприятия (табл. 1, 2).

Анализ приведенных таблиц позволяет охарактеризовать степень влияния вышеуказанных факторов на функционирование системы контроллинга на предприятии.

Таблица 1

**Характеристика влияния размера предприятия на функционирование системы контроллинга**

| Показатель                                                                    | Крупные предприятия                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Малые и средние предприятия                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Место и роль стратегической и оперативной составляющей в системе контроллинга | Слабая гибкость и мобильность реагирования при изменении факторов внешней среды.<br>Низкая степень оперативного реагирования в краткосрочных интервалах.<br>Концентрация внимания менеджмента на вопросах стратегического контроллинга                                                                                                                        | Высокая гибкость и мобильность при изменении факторов внешней среды.<br>Высокая степень оперативного реагирования в режиме реального времени.<br>Концентрация внимания менеджмента на вопросах оперативного контроллинга                                                                                                                                                                          |
| Структура контроллинга                                                        | Глубокая функциональная специализация подразделений и разветвленная структура управления с многоуровневой системой контроллинга.<br>Концентрация внимания на контроллинге постоянных затрат из-за высокого уровня их влияния на рентабельность продукции.<br>Отсутствие гибкости и оперативности по перестройке производства на выпуск других видов продукции | Слабая функциональная специализация подразделений и неразветвленная структура управления предприятия с системой контроллинга на производственном уровне.<br>Концентрация внимания на контроллинге переменных затрат из-за высокого уровня их влияния на рентабельность продукции.<br>Гибкость и оперативность по перестройке структуры контроллинга производства на выпуск других видов продукции |
| Степень детализации контроллинга                                              | Мониторинг отклонений параметров проводится по укрупненным планово-учетным единицам на основе сбора и обработки информации от производственных подразделений в ретроспективном режиме                                                                                                                                                                         | Мониторинг отклонений параметров может проводиться на основе сбора и обработки информации с высокой степенью детализации в режиме реального времени                                                                                                                                                                                                                                               |

Таблица 2

**Характеристика влияния типа производства на функционирование системы контроллинга**

| Показатель                                                                    | Единичное производство                                                                                                   | Серийное производство                                                                                         | Массовое производство                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Место и роль стратегической и оперативной составляющей в системе контроллинга | Концентрация внимания менеджмента на вопросах стратегического контроллинга                                               | Концентрация внимания менеджмента на вопросах стратегического и оперативного контроллинга                     | Концентрация внимания менеджмента на вопросах стратегического контроллинга                                               |
| Структура контроллинга                                                        | Отсутствие гибкости и оперативности по перестройке структуры контроллинга производства под выпуск других видов продукции | Гибкость и оперативность по перестройке структуры контроллинга производства под выпуск других видов продукции | Отсутствие гибкости и оперативности по перестройке структуры контроллинга производства под выпуск других видов продукции |
| Степень детализации контроллинга                                              | Используются укрупненные планово-учетные единицы                                                                         | Необходимость высокой степени детализации процессов контроллинга                                              | Высокая степень детализации процессов контроллинга                                                                       |

Влияние размера предприятия на место и роль стратегической и оперативной составляющей в системе контроллинга характеризуется:

- изменением степени гибкости и мобильности реагирования системы контроллинга на изменения факторов внешней среды;
- изменением степени оперативного реагирования в краткосрочных интервалах;
- увеличением роли одной из составляющих в системе контроллинга.

Влияние размера предприятия на структуру контроллинга характеризуется:

- изменением степени сложности структуры контроллинга от разветвленности структуры и степени функциональной специализации подразделений предприятия;
- акцентом в структуре на контроллинг переменных или постоянных затрат;
- изменением степени гибкости и оперативности перестройки структуры контроллинга под выпуск новой продукции.

Влияние размера предприятия на степень детализации в системе контроллинга характеризуется изменением степени детализации планово-учетных единиц при сборе и обработке информации.

Влияние типа производства на место и роль стратегической и оперативной составляющей в системе контроллинга характеризуется акцентом менеджмента компании на вопросах оперативного или стратегического контроллинга.

Влияние типа производства на структуру системы контроллинга характеризуется возможностью ее оперативного изменения.

Влияние типа производства на степень детализации контроллинга характеризуется изменением степени детализации планово-учетных единиц при сборе и обработке информации.

Из приведенных таблиц также видно, что с учетом использования системы оперативного контроллинга малые и средние предприятия серийного типа обладают такими преимуществами, как возможность быстрого реагирования на изменения во внешней среде,

гибкость и оперативность при перестройке производства и системы контроллинга на выпуск новой продукции, а соответственно, имеют больше возможностей для конъюнктурного маневра.

В условиях высокой динамики развития рынков потребительского назначения, ужесточения конкурентной борьбы с импортной продукцией, постоянный вывод на рынок новой продукции, удовлетворяющей дифференцированные потребности потребителей, становится для малых и средних предприятий машиностроения основной стратегической задачей. Данные условия неизбежно приводят эти предприятия к необходимости инновационной деятельности, постоянному совершенствованию своих изделий на всех стадиях производственно-технологического процесса. И если радикальные инновации характерны на этапе зарождения продукта, то на этапах отработки опытных партий характерны процессы модернизации и постепенных улучшений, т. е. инкрементные инновации. Инкрементная инновация в современных условиях имеет наиболее ярко выраженную тенденцию к сокращению временного интервала, т. е. изменения должны совершаться непрерывно и постоянно.

Инновационная деятельность всегда характеризуется высокими рисками, связанными с неопределен-

ностью ее результатов. Отсутствие достаточной финансовой устойчивости малых и средних предприятий повышает эти риски. В связи с этим данные предприятия должны непрерывно отслеживать производственные процессы особенно на стадии производства опытной партии.

Характер такой деятельности, соответственно, повышает требования к организации системы оперативного контроллинга данных процессов и пересмотру ряда его существующих принципов (табл. 3).

В условиях динамично развивающегося рынка руководству для принятия решений необходимы постоянно обновляемые данные как о внешней, так и внутренней среде и результаты их анализа. Способность организации к своевременному реагированию на рыночные изменения зависит от временного интервала между возникновением нового шанса или риска и конкретным действием руководства, а также от затрат времени на изменение плана и внедрение новинки. Чем продолжительнее этот интервал, тем вероятнее потери прибыли, соответственно, чем больше данный интервал стремится к нулю, тем выше шанс получения экономического эффекта, что говорит о непрерывности процессов оперативного контроллинга.

Таблица 3

**Соответствие особенностей системы оперативного контроллинга на малых и средних предприятиях принципам контроллинга**

| Особенности системы оперативного контроллинга                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Требования                                                                                                       | Принципы контроллинга                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Слабая функциональная специализация подразделений и неразветвленная структура управления предприятия с контроллингом на производственном уровне. Высокая гибкость и мобильность при изменении факторов внешней среды. Гибкость и оперативность по перестройке структуры контроллинга производства под выпуск других видов продукции | Мобильность, гибкость и оперативность системы оперативного контроллинга                                          | Принцип движения и торможения.<br>Принцип гибкости.<br>Принцип непрерывности во времени |
| Концентрация внимания менеджмента на вопросах оперативного контроллинга. Концентрация внимания на контроллинге переменных затрат из-за высокого уровня их влияния на рентабельность продукции                                                                                                                                       | Соответствие целей оперативного контроллинга целям стратегического контроллинга                                  | Принцип стратегического сознания.<br>Принцип декомпозиции                               |
| Высокий уровень влияния оперативных изменений переменных затрат каждого рабочего места производства на рентабельность продукта                                                                                                                                                                                                      | Фиксация переменных затрат и факторов, влияющих на них, на всех этапах технологического процесса                 | Принцип документирования.<br>Принцип декомпозиции.<br>Принцип непрерывности во времени  |
| Мониторинг отклонений параметров экономических процессов в режиме реального времени. Высокая степень оперативного реагирования в режиме реального времени                                                                                                                                                                           | Временной интервал процессов оперативного контроллинга должен стремиться к нулю                                  | Принцип непрерывности во времени                                                        |
| Необходимость высокой степени детализации процессов оперативного контроллинга переменных затрат на конкретном производственном участке и рабочем месте                                                                                                                                                                              | Оперативный контроллинг должен охватывать каждую отдельную технологическую операцию                              | Принцип декомпозиции.<br>Принцип документирования                                       |
| Мониторинг отклонений параметров экономических процессов проводится на основе сбора и обработки информации в соответствии с технологическим процессом с каждого производственного участка и рабочего места                                                                                                                          | Оперативный контроллинг должен осуществляться в порядке, обратном ходу производственно-технологического процесса | Принцип обратного хода.<br>Принцип декомпозиции                                         |

Непрерывность данных процессов зависит от скорости сбора, обработки информации, получаемой от производственных подразделений.

Среди основных факторов, оказывающих влияние на сокращение временного интервала процессов оперативного контроллинга на малых и средних предприятиях машиностроения, можно выделить:

- постоянное совершенствование выпускаемой готовой продукции и, как следствие, постоянное осуществление инкрементных инноваций производственно-технологических процессов;

- сокращение экономически выгодных этапов жизненного цикла продукции на рынке (роста и зрелости), обеспечивающих максимальные объемы и наибольшую прибыль.

С учетом современных требований рынка в оперативном контроллинге необходимо применить *принцип непрерывности во времени*, когда временной интервал стремится к нулю. Реагирование на происходящие события в производственных подразделениях предприятия (их мониторинг, учет, анализ, корректировка) при этом идет в режиме реального времени. Однако такое возможно при полной автоматизации процессов оперативного контроллинга.

Система оперативного контроллинга не может не учитывать особенности типов производства, различие которых в данной системе состоит, главным образом, в специфике выбираемой планово-учетной единицы, большей или меньшей ее детализации, что предопределяет степень декомпозиции производственно-технологических процессов.

В условиях единичного производства наибольшее распространение имеет позаказная система калькулирования затрат, в которой планово-учетной единицей служит комплект деталей, входящих в конструктивный узел или машинокомплект. В условиях серийного производства используется поддетальная система калькулирования затрат, в которой планово-учетной единицей служит деталь. Если номенклатура изделий велика и планово-диспетчерская служба предприятия не в состоянии эффективно контролировать движение каждого изделия в производственном цикле, применяются комплектные, укрупненные планово-учетные единицы (бригадокомплект, приборокомплект). В массовом производстве, отличающемся устойчивостью номенклатуры выпускаемых изделий, деталей, узлов, видов работ и т. п. и организуемом по поточному методу, используется система поддетальных планово-учетных единиц [3].

Осуществление инкрементных инноваций в процессе отработки опытных партий наиболее характерно для серийного типа производства, так как при единичном опытный экземпляр и есть готовый продукт, а при массовом производстве применение такого типа инноваций довольно проблематично из-за высоких затрат на перенастройку автоматизированных линий.

Однако при серийном производстве с учетом его структуры, состоящей из предметно-замкнутых участков возникает необходимость точного определения места возникновения проблемы. При применении укрупненных планово-учетных единиц в виде бригадо-

комплекта, машинокомплекта нет возможности точного определения проблемных мест участка, даже при использовании планово-учетной единицы в виде детали, так как может пройти несколько технологических операций, при этом на каждой стадии в нее добавляется стоимость новой операции и нового материала.

Поэтому при инкрементных инновациях для процессов оперативного контроллинга опытных партий в серийном производстве становится актуальным более высокая степень декомпозиции производственно-технологических процессов.

Основными требованиями к декомпозиции производственно-технологических процессов на малых и средних предприятиях машиностроения серийного типа являются:

- необходимость наличия информации о точном месте возникновения отклонений от норм и нормативов;

- необходимость наличия достоверной информации о производственных факторах, оказавших влияние на отклонения в данном месте, в определенный момент времени.

Вследствие вышесказанного декомпозиция планово-учетной единицы должна достигнуть технологической операции – первичного элемента производственно-технологического процесса.

Ранее процессы контроллинга при такой детализации были трудоемки и не позволяли получать объективную информацию в реальном режиме времени. Но с учетом возможности современной автоматизации данные процессы значительно упрощены и появляется возможность осуществлять одновременно оперативный контроллинг нескольких технологических операций на разных предметно-замкнутых участках.

Вследствие вышесказанного, представляется целесообразным дополнить перечень принципов оперативного контроллинга *принципом декомпозиции* процессов оперативного контроллинга в соответствии с местом и видом технологических операций. Высокая степень детализации позволяет учитывать в системе оперативного контроллинга события и бизнес-процессы, происходящие на низовых операционных уровнях (уровень рабочего места), с тем, чтобы была возможность достовернее определять причинно-следственные связи этих событий и факторы, оказывающие на них влияние, непосредственно в месте их возникновения.

При организации системы оперативного контроллинга необходимо четко понимать, что основная задача производственной деятельности – выпуск качественной готовой продукции с минимально возможной себестоимостью. Вследствие этого конечным объектом анализа становится готовый продукт. При декомпозиции производственно-технологических процессов готовый продукт раскладывается на составляющие части в соответствии с технологическими операциями.

Во всех типах производства расчеты производственных программ осуществляются в порядке, обратном ходу производственно-технологического процесса, начиная с выпускающих участков и далее до обрабатывающих и затем заготовительных участков.

Можно проводить анализ, используя нормы с начала технологического процесса, но тогда получение результатов возможно только после ретроспективного анализа, что противоречит принципу непрерывности во времени. В данном случае следует применить *принцип обратного хода* процессов оперативного контроллинга по отношению к производственно-технологическому процессу, когда учет и анализ идет от остатков готового продукта на складе, т. е. от факта, и приходит ко входу в производство со склада сырья, материалов и комплектующих.

Выделение системы оперативного контроллинга, передача ей больших полномочий в регулировании текущими процессами позволяют достичь большей мобильности и адекватности при реагировании на создавшиеся условия в данный момент времени, а также при принятии управленческого решения, не перегружая при этом всю управленческую систему предприятия.

Однако вместе с этим разработка систем оперативного контроллинга, способных адекватно отображать в режиме реального времени сложившуюся ситуацию на предприятии, анализировать и выдавать в виде результатов рекомендации по реагированию на изменения внешней среды, требует более четкой научной проработки следующих вопросов:

- исследование причинно-следственных связей изменений экономических процессов в краткосрочных периодах деятельности производственных подразделений малых и средних машиностроительных предприятий серийного типа и факторы, определяющие степень необходимой детализации системы оперативного контроллинга;
- выбор инструментов подготовки и принятия управленческих решений на уровне системы оперативного контроллинга текущих производственно-технологических процессов в режиме реального вре-

мени без вмешательства всей системы управления предприятием в целом;

- построение информационно-аналитической модели мониторинга отклонений параметров от нормативных значений в режиме реального времени при производстве готовой продукции.

### Библиографические ссылки

1. Концепция формирования Государственной комплексной программы развития машиностроения России [Электронный ресурс] // Союз машиностроителей России. 2008. URL: <http://www.soyuzmash.ru/informcenter/concept/concept.htm>.
2. Контроллинг как инструмент управления предприятием / под ред. Н. Г. Данилочкиной. М. : ЮНИТИ, 2001.
3. Казанцев А. К., Рабинович М. Г., Казанцев А. К. Производственный менеджмент и контроллинг. Деловая игра «Сипромек». СПб. : Изд. СПбГИЭА, 1993.

### References

1. *Koncepciya formirovaniya Gosudarstvennoy kompleksnoy program razvitiya mashinostroyeniya Rossii. Souz mashinostroiteley Rossii* (The concept of formation of the State comprehensive programme of development of mechanical engineering of Russia. The Union of machine builders of Russia.) 2008. Available at: <http://www.soyuzmash.ru/informcenter/concept/concept.htm>.
2. Danilochkina N. G. *Controlling kak instrument upravleniya predpriyatiem* (Controlling as an instrument of enterprise management). Moscow, UNITI, 2001, 279 p.
3. Kazancev A. K. *Proizvodstvenniy management i controlling* (Production management and controlling). St.-Peterburg, SPBGIEA, 1993, 96 p.

© Васильева З. А., Назаревич А. В., 2013

УДК 658.001.76; 338.2

## ИНСТРУМЕНТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРТФЕЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Ю. В. Ерыгин, Е. О. Павлова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: pavlova\_89@sibsau.ru

*Определена роль инновационного потенциала в формировании портфельной стратегии инновационного развития предприятия. Проведен анализ понятия «инновационный потенциал», представлена структура инновационного потенциала, предложены показатели оценки достигнутого и предельного потенциалов. Разработана методика формирования портфельной стратегии инновационного развития предприятия.*

*Ключевые слова:* инновационный потенциал, экономический потенциал, инновационный портфель.

## INSTRUMENTS OF PORTFOLIO FORMATION STRATEGY FOR INNOVATIVE DEVELOPMENT OF ENTERPRISES IN THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX

Yu. V. Erygin, E. O. Pavlova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: pavlova\_89@sibsau.ru

*The role of innovative potential in formation of the portfolio strategy is determined in this article. The analysis of the concept of "innovative potential" is made; the structure of innovative potential is suggested; the assessment indicators of the achieved potential and the potential critical potential are presented. The methodology of formation of the portfolio strategy of innovative development of the enterprise is developed.*

*Keywords: innovative potential, economic potential, innovative portfolio.*

Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) России представляет собой наиболее качественный, высокотехнологичный сектор экономики. В него включены как новейшие достижения страны в области организации производства технологий, так и лучшие ученые, специалисты и рабочие. Он непосредственно влияет на национальную безопасность государства, а также на экономическое развитие, внешнеполитическую ситуацию и темпы научно-технического прогресса в стране. С переходом государства на инновационный путь развития ОПК становится одной из приоритетных отраслей, продукция которой должна быть интегрирована в систему рыночной экономики. Это возможно только при разработке и внедрении на предприятиях отрасли инноваций, обеспечивающих их конкурентоспособность в военной и технологической сферах. В свою очередь, это свидетельствует о возрастании значения инновационного потенциала, необходимости учета его структуры и оценки составляющих элементов, которые играют определяющую роль при выборе стратегии инновационного развития предприятия.

Управление инновационным потенциалом является составной частью инновационного менеджмента и решает вопросы планирования и реализации инновационных стратегий, обеспечивающих успешное развитие предприятия. Разработка инновационных стратегий осуществляется на основе оценки достигнутого потенциала. Анализ внешнего окружения предприятия позволяет выявлять шансы и факторы риска на рынке, анализ же инновационного потенциала позволяет оценить ресурсы предприятия с точки зрения возможности их использования для предприятия.

Вместе с тем задача по формированию инструментов стратегии инновационного развития и роли в ней инновационного потенциала на предприятиях ОПК является новой и недостаточно изученной. Необходимо предложить инструменты формирования стратегии инновационного развития предприятия с учетом потенциальных возможностей ее реализации. В связи с указанной ролью инновационного потенциала в формировании стратегии возникает необходимость в определении содержания понятия инновационного потенциала.

Ряд авторов отождествляет инновационный потенциал с экономическим, но единого мнения нет и в его представлении. В. Штанский, М. Жемчуева [1] представляют инвестиционно-инновационный потенциал

отдельным элементом. В его состав входят: незавершенное строительство, технологически эффективные объекты, инновационные разработки. Экономический потенциал представляют как производственно-экономический, состоящий из основного и оборотного капитала.

Г. С. Мерзликина, Л. С. Шаховская [2] предлагают включить в состав экономического потенциала рыночный, производственный и финансовый потенциалы. Л. С. Сосненко [3] также выделяет три составляющих экономического потенциала. В структуру производственного потенциала включен имущественный, трудовой и научно-технический потенциал, не выделяя их отдельными элементами. Экономический потенциал, по мнению М. Ф. Тестиной, Е. В. Шевченко, представлен только двумя составляющими: трудовым потенциалом, который включает в себя весь персонал предприятия, и производственным потенциалом: нематериальные активы, права, лицензии, цена предприятия, ноу-хау, фонды обращения, запасы товаров, ценные бумаги, дебиторская задолженность, оборотные фонды, основные фонды, здания, оборудование [4]. Важно отметить, что отсутствует финансовый потенциал и научно-технический потенциал, но их элементы можно увидеть в производственном потенциале. Ю. С. Валеева, Н. С. Исаева основными составляющими потенциала предприятия считают маркетинговые, трудовые, интеллектуальные, производственно-финансовые возможности. Последние являются наиболее значимыми, как отмечают авторы, и состоят из двух локальных субпотенциалов – производственного и финансового. Под производственным потенциалом предприятия авторы понимают отношения, которые возникают в организации по причине формирования максимально допустимого производственного результата при условии эффективного использования [5]:

- интеллектуального капитала предприятия для поиска передовых форм организации производства;
- имеющейся техники в целях получения наиболее высокого уровня технологий;
- материальных ресурсов для обеспечения максимальной экономии и оборачиваемости.

Финансовый потенциал, по мнению авторов, является комплексным понятием и характеризуется системой показателей, отражающих наличие и размещение средств, реальные и потенциальные финансовые возможности [5].

Ряд авторов [6] дает определение экономического потенциала как наличия активов (ресурсов и резервов), используемых в настоящее время либо авансированных и обеспеченных соответствующими источниками финансирования, возникающих в результате экономической деятельности предприятия в рамках стратегии развития, а также существующих либо возможных условий и ограничений законодательного, финансового, организационно-технического, отраслевого и территориального характера.

Авторы [7] в своих трудах представляют структуру инновационного потенциала в системе единства трех составляющих: ресурсной, внутренней и результативной (рис. 1).

Ресурсная составляющая включает в себя материально-технические, информационные, финансовые, человеческие ресурсы, которые служат основой инновационного потенциала и в дальнейшем будут влиять на результат инновационной деятельности предприятия.

Второй составляющей инновационного потенциала является внутренняя составляющая, которая обеспечивает эффективность функционирования предыдущих элементов ресурсной составляющей. Внутренняя составляющая обеспечивает способность системы инновационного развития привлекать ресурсы для инициирования, создания и коммерциализации новшества.

Результативная составляющая – это целевая характеристика инновационного потенциала.

Особенностью данной составляющей является то, что она несет в себе потенциальные возможности, являясь результатом количественного и качественного изменения, ее увеличение способствует развитию ресурсной и внутренней составляющих.

В большинстве случаев состав инновационного потенциала предприятия представляется в виде набора ресурсов с разной степенью их детализации. Так, например, в работе [8] состав инновационного потенциала представлен как совокупность следующих составляющих:

- части трудовых ресурсов, занятых инновационной деятельностью, в их количественно-качественной определенности;
- новых комбинаций природных ресурсов;

- современных производственных фондов и технологий предприятий;
- институциональной компоненты в виде норм и правил осуществления новаторской деятельности;
- форм предприятий, осуществляющих инновационные процессы;

– информации в форме знаний, навыков и умения индивида, а также полученные им сведения от природной и социальной среды.

Другая группа исследователей считает, что в состав инновационного потенциала необходимо включить следующую совокупность ресурсов, необходимых для эффективного осуществления инновационной деятельности [9]:

- интеллектуальные (технологическая документация, изобретения, патенты, лицензии, полезные модели, промышленные образцы);
- материальные (опытно-приборная база, пилотные установки, исследовательское, экспериментальное и лабораторное оборудование);
- финансовые (собственные, заемные, инвестиционные, бюджетные, грантовые);
- кадровые (лидер-новатор, заинтересованный в инновациях; персонал, имеющий специальное образование и опыт проведения НИР и ОКР; специалисты в сфере маркетинга, планирования и прогнозирования скрытых потребностей покупателей);
- инфраструктурные (собственные подразделения НИР и ОКР, конструкторский отдел, отдел главного технолога, отдел маркетинга новой продукции, лаборатория контроля качества продукции, патентно-лицензионный отдел);
- дополнительные источники повышения результатов инновационной деятельности (партнерские и личные связи сотрудников с НИИ и вузами, в том числе зарубежными, ресурс площадей, информационный отдел, опыт управления проектами, стратегическое управление предприятием).

Основываясь на анализе содержания предложенных определений экономического и инновационного потенциалов, предлагается структура инновационного потенциала для предприятий ОПК (рис. 2).

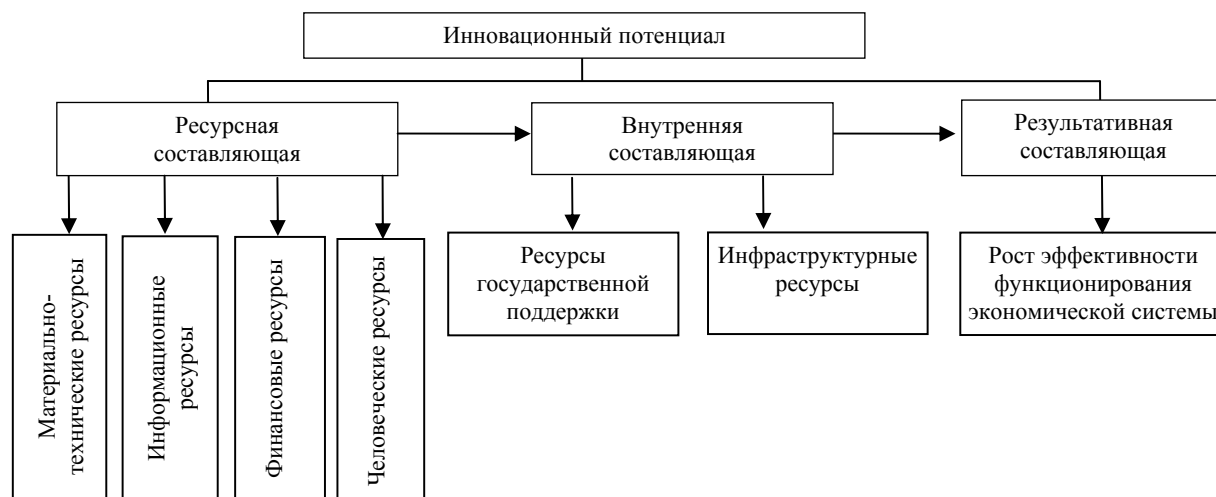


Рис. 1. Структура инновационного потенциала предприятия

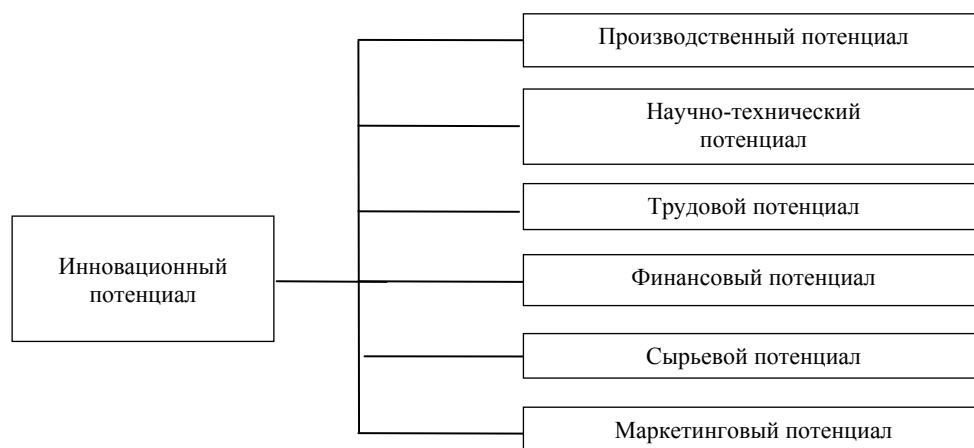


Рис. 2. Структура инновационного потенциала предприятия ОПК

Таблица 1

## Показатели оценки элементов инновационного потенциала предприятия

| Элементы инновационного потенциала | Показатель                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Производственный                   | Производственная мощность.<br>Уровень развития научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР).<br>Оснащенность опытно-экспериментальным оборудованием, материалами, приборами, орг-техникой, компьютерами, автоматическими устройствами для осуществления инновационной деятельности |
| Научно-технический                 | Результат поисковых и фундаментальных теоретических исследований, лежащих в основе научного задела, имеющегося на предприятии.<br>Изобретения, товарные знаки, ноу-хау, новшества, которые могут быть предложены к использованию, инновационные программы и проекты                                   |
| Трудовой                           | Состав.<br>Количество.<br>Структура.<br>Квалификация персонала, необходимая для реализации целей организации                                                                                                                                                                                          |
| Финансовый                         | Объем инвестиций в НИОКР.<br>Нематериальные активы.<br>Источники финансирования                                                                                                                                                                                                                       |
| Сырьевой                           | Степень удаленности предприятия от источника сырья.<br>Качество сырья.<br>Ценовая политика поставщиков сырьевых ресурсов                                                                                                                                                                              |
| Маркетинговый                      | Уровень конкурентоспособности новшеств.<br>Наличие спроса.<br>Наличие заказов на проведение НИОКР и инновационную деятельность                                                                                                                                                                        |

Каждый элемент инновационного потенциала делится на два типа – достигнутый и предельный. В табл. 1 представлены элементы инновационного потенциала и показатели его оценки с учетом предложенной структуры, по которым оценивается достигнутый и предельный потенциалы.

Инновационная деятельность не является однородной, а зависит от типа инноваций. Й. Шумпетером в 1911 г. выделены пять типов инноваций: создание новых технологических процессов; создание новых технологических продуктов; освоение новых рынков сбыта; освоение новых источников сырья; изменения в организации производства и его материально-техническом снабжении [10].

В табл. 2 предложена зависимость структуры инновационного потенциала от типа инноваций.

Сырьевой тип инноваций присутствует во всех элементах инновационного потенциала. При осуществлении технологического типа инноваций сырьевой потенциал, как правило, отсутствует, так как технология разрабатывается с использованием существующих видов сырья. При производстве технологического типа инноваций следует включать продуктовый потенциал, как и при продуктивном типе инноваций следует учитывать научно-технический потенциал в виде продукта. Рыночный тип инноваций не использует производственный, научно-технический и сырьевой потенциал, потому что для производства и реализации данного типа важно учитывать три составляющих элемента инновационного потенциала: кадровый, финансовый, маркетинговый. Управленческий тип инноваций может включать в себя все виды потенциала, в зависимости от направления новых управленческих решений.



Структура инновационного потенциала в зависимости от типа инноваций

| Элемент инновационного потенциала | Тип инноваций |                 |             |          |                |
|-----------------------------------|---------------|-----------------|-------------|----------|----------------|
|                                   | Сырьевой      | Технологический | Продуктовый | Рыночный | Управленческий |
| Производственный                  | +             | +               | +           | –        | +              |
| Научно-технический                | +             | +/-             | +/-         | –        | +              |
| Трудовой                          | +             | +               | +           | +        | +              |
| Финансовый                        | +             | +               | +           | +        | +              |
| Сырьевой                          | +             | –               | +           | –        | +              |
| Маркетинговый                     | +             | +               | +           | +        | +              |

Таким образом, инновационный потенциал является сквозным и присутствует во всех составляющих элементах экономического потенциала. Состав показателей оценки инновационного потенциала будет зависеть от типа инноваций и, соответственно, структуры инновационного потенциала. Вместе с тем при выборе стратегии развития предприятия важно учитывать как экономический, так и инновационный потенциал.

В современных условиях функционирование инновационного потенциала на предприятиях осуществляется в рамках постоянно изменяющихся условий, что обуславливает необходимость непрерывного совершенствования программ инновационной деятельности. В этих условиях распределение объемов денежных средств на формирование инновационного портфеля предприятия может состоять из разнообразных проектов: крупных и мелких; близких к завершению и начинающихся. Однако каждый проект требует выделения дефицитных ресурсов в зависимости от его особенностей (сложности, трудоемкости и т. п.). Количество инновационных проектов, находящихся в портфеле в конкретный период времени, должно зависеть от их масштабов, которые измеряются общим объемом ресурсов и инвестиций, необходимых для их разработки и завершения. Предприятиям необходимо решить, каким количеством инновационных проектов можно одновременно эффективно управлять, распределяя между ними имеющиеся ресурсы. Исходя из вышеизложенного, отметим, что инновационный портфель представляет собой набор инновационных проектов, подлежащих разработке и внедрению на предприятии с учетом имеющегося инновационного потенциала, например, уровня задела по НИОКР для каждого из проектов, характеризующих уровень достигнутого потенциала.

На первом этапе оценивается уровень достигнутого  $j$ -го элемента потенциала по  $i$ -му проекту на основе существующих заделов (разработок НИОКР). На втором шаге оценивается предельная величина  $j$ -го элемента потенциала по  $i$ -му проекту. Здесь необходимо учитывать, сколько средств уже было вложено в тот или иной вид потенциала, с тем, чтобы обеспечить баланс распределения ресурсов и инвестиций, который бы давал максимальную производственную мощность и, как следствие, получение максимального финансового результата от реализации проекта. Таким образом, распределение средств между элементами инновационного потенциала должно быть основано на принципе сбалансированности. Третьим шагом

является оценка дополнительных инвестиций для  $j$ -го элемента инновационного потенциала в зависимости от объема уже вложенных средств, связанных с формированием предельного потенциала. На данном этапе важно понять, в какой элемент инновационного потенциала еще нужно вкладывать средства, а в каком их достаточно. Инвестиции в определенные элементы потенциала повлияют на прирост финансовых результатов от реализации проекта. Поэтому следующим шагом оцениваем прибыль в зависимости от объема вложенных средств, направленных на формирование предельного потенциала. Далее формируем портфельную стратегию инновационного развития предприятия на основе метода динамического программирования, который учитывает дискретный характер инвестиций и финансовых результатов, а также нелинейность между зависимой и объясняющими переменными. И заключительным этапом является определение портфеля инвестиций, направляемых на формирование инновационного потенциала (по элементам потенциала).

В данной методике (рис. 3) наибольшую сложность представляет оценка предельной составляющей. При ее расчете должны учитываться динамика и характер изменения выделенных элементов инновационного потенциала, соответствующие особенностям инновационного развития. Корректная оценка этих составляющих позволит осуществить выбор эффективной стратегии инновационного развития.

Важным этапом является построение оптимизационной модели формирования портфельной стратегии. При условии, что по каждому из  $n$  проектов известен возможный прирост максимальной прибыли в зависимости от вложенных средств, решение задачи распределения инвестиций между проектами, обеспечивающими максимальный общий прирост прибыли, может быть осуществлено с использованием метода динамического программирования. Этапы постановки задачи динамического программирования могут быть представлены следующими шагами:

1. В качестве  $n$ -го шага принимается вложение инвестиций в  $n$  проект.
2. Параметр, характеризующий состояние системы перед каждым шагом – невложенные инвестиции (И).
3. Параметры «шагового управления» – средства, вложенные в проект  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ .
4. Выигрыш на шаге  $n$  определяется приростом прибыли  $g_n(x)$  от  $n$ -го проекта в зависимости от вложенных средств  $x$ .

5.  $I_n = I_{n-1} + x_n$ , где  $I_n$  – невложенные инвестиции в один проект, которые можно вложить в другой на данном этапе;  $x_n$  – инвестиции из  $I_n$ , которые вложили на данном этапе в  $n$  проект,  $I_{n-1}$  – оставшиеся невложенные на предыдущем этапе ( $n - 1$ ) инвестиции для распределения по оставшимся ( $n - 1$ ) проектам.  $F_n(I)$  – максимально возможный прирост прибыли при распределении суммы  $I$  между четырьмя проектами.

6. Следовательно, функциональное уравнение Беллмана будет иметь вид

$$F_n(I) = \max [g_n(x) + f_{n-1}(I - X)],$$

где  $F_{n-1}(I - X)$  максимальное значение прироста прибыли на предыдущем этапе ( $n - 1$ ) при распределении объема инвестиций  $I_{n-1} = I_n - x_n$  между ( $n - 1$ ) проектами,  $0 \leq x \leq I$ .

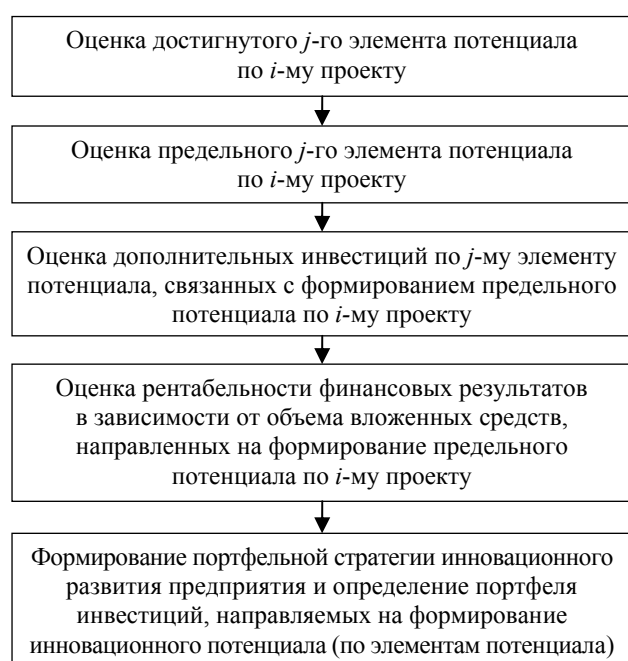


Рис. 3. Этапы методики формирования портфельной стратегии инновационного развития предприятия ОПК

С помощью метода динамического программирования можно определить не только портфель проектов, но и портфель средств, инвестируемых в различные элементы инновационного потенциала.

#### Библиографические ссылки

1. Штанский В., Жемчуева М. Управление потенциалом металлургических холдингов // *Экономист*. 2005. № 8. С. 30–39.
2. Мерзликина Г. С., Шаховская Л. С. Оценка экономической состоятельности предприятия : моногр. / ВолгГТУ. Волгоград, 1998.
3. Сосненко Л. С. Анализ экономического потенциала действующего предприятия. М. : Экономическая литература, 2007.

4. Тестина М. Ф., Шевченко Е. В., Соломко Г. П., Горшков В. О. Оценка экономического потенциала предприятия // *Проблемы совершенствования механизма хозяйствования в современных условиях* : сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф. Ч. II. Пенза, 2001. С. 68–71.

5. Валеева Ю. С., Исаева Н. С. Диагностика производственно финансового потенциала промышленного предприятия // *Экономический анализ: теория и практика*. 2007. № 1 (82). С. 38–43.

6. Ерыгин Ю. В., Улицкая Т. Р. Потенциал: содержание понятия и его структура [Электронный ресурс]. URL: <http://www.science-bsea.bgita.ru>.

7. Кокурин Д. И. Инновационная деятельность. М. : Экзамен, 2001. 126 с.

8. Коробейников О. П., Трифилова А. А., Коршунов И. А. Роль инноваций в процессе формирования стратегии предприятий // *Менеджмент в России и за рубежом*. 2000. № 3. С. 150–154.

9. Кортон С. В. Оценка инновационной активности технического вуза : метод. рекомендации. СПб, 2004.

10. Sociolain.ru : сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://sociolain.ru/book/j-shumpeter-teoriya-ekonomicheskogo-razvitiya>.

#### References

1. Shtansky B., Zhemchueva M. Management of potential metallurgical holdings. *Economist*. 2005, № 8, pp. 30–39.
2. Merzlikina G. S., Shahovskaya L. S. *Otsenka ekonomicheskoy sostoyatel'nosti predpriyatiya* (Assessment of the economic viability Company), VolgGTU, Volgograd, 1998, 63 p.
3. Sosnenko L. S. *Analiz ekonomicheskogo potentsiala deystvuyushchego predpriyatiya* (The analysis of the economic potential concern). Moscow, Economic Literature, 2007, 207 c.
4. Testina M. F., Shevchenko Ye. V., Solomko G. P., Gorshkov V. O. *Sb. materialov III Vseros. nauch.-prakt. konf. «Problemy sovershenstvovaniya mekhanizma khozyaystvovaniya v sovremennykh usloviyakh»* (Proceedings of the III All-Russian scientific-practical conference «Problems of improving the management mechanism in modern conditions»). Part II, Penza, 2001, pp. 68–71.
5. Valeyeva Y. S., Isaev N. S. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika*. 2007, № 1 (82), pp. 38–43.
6. Erygin Yu. V., Ulitskaja T. R. Potential: the content of the concept and its structure. Available at: <http://www.science-bsea.bgita.ru>.
7. Kokurin D. I. *Innovatsionnaya deyatel'nost'* (Innovative activities). Moscow, Ekzamen, 2001, 126 p.
8. Korobeynikov O. P., Trifilova A. A., Korshunov I. A. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom*, 2000, № 3, pp. 150–154.
9. Kortov S. V. *Otsenka innovatsionnoy aktivnosti tekhnicheskogo vuza* (Assessment of innovative activity of a technical college (guidelines). St. Petersburg, 2004, 83 p.
10. Sociolain.ru. Available at: <http://sociolain.ru/book/j-shumpeter-teoriya-ekonomicheskogo-razvitiya>.

© Ерыгин Ю. В., Павлова Е. О., 2013

# **К ВОПРОСУ О СБАЛАНСИРОВАННОМ РОСТЕ ЭКОНОМИКИ РЕГИОНА И ИНСТРУМЕНТАХ СОДЕЙСТВИЯ РОСТУ**

О. И. Карелин, Р. В. Болтов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: karelin@sibsau.ru

*Рассматривается необходимость разработки новых механизмов государственно-частного партнерства и подход к моделированию сбалансированного устойчивого роста региональной экономики.*

*Ключевые слова: сбалансированность, устойчивый рост, региональная экономика, валовый региональный продукт, государственно-частное партнерство.*

## **REVISITED THE PROBLEM OF BALANCED REGIONAL ECONOMIC GROWTH AND GROWTH ASSISTANCE TOOLS**

O. I. Karelin, R. V. Boltov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: karelin@sibsau.ru

*The authors consider the problem of need for the new public-private partnership mechanisms and the approach to balanced sustainable growth of the regional economy modeling.*

*Keywords: balance, sustainable growth, regional economy, gross regional product, public-private partnership.*

Развитие инновационного потенциала возможно посредством разработки новых механизмов государственно-частного партнерства. Анализ существующих институциональных программ на примере г. Красноярска и Красноярского края показывает низкую эффективность их реализации [1; 2]. Прослеживается слабая реализация целей и задач программ и, как следствие, отсутствие мультипликативного эффекта, обуславливающего развитие экономики региона.

Рассматривая экономическую систему региона, можно представить ее как относительно самостоятельную производственно-территориальную единицу с высокой степенью законченности воспроизводственного цикла и со специфическими особенностями протекания социально-экономических процессов. С точки зрения воспроизводства экономических благ сбалансированное развитие должно обеспечивать соответствие структуры производства и потребностей экономической системы.

С целью сбалансированного устойчивого роста предлагается в качестве варианта рассмотреть подход, основанный на взаимодействии хозяйствующих субъектов и государственного инвестиционного капитала, обеспечивающих своим комплексным подходом рост валового регионального продукта (ВРП).

В качестве объекта, влияющего на рост ВРП, предлагается взять всех участников предпринимательской деятельности в регионе: как субъектов малого и среднего предпринимательства (СМСП), так и крупные предприятия. Несмотря на то, что СМСП обеспечивают сравнительно небольшой вклад в ВРП, в то же время часть из них является сервисными предприятиями для крупных предприятий края и обуславливает их эффективное функционирование.

Сбалансированность региональной экономической системы может определяться на основе модели межотраслевого баланса «затраты–выпуск», впервые предложенной американским экономистом русского происхождения В. В. Леонтьевым и нашедшей свое развитие у других исследователей [3; 4]. Так как региональные воспроизводственные пропорции взаимосвязаны и взаимообусловлены, изменение одной группы оказывает воздействие на всю систему региональных пропорций.

В случае, если в качестве показателя, характеризующего устойчивое развитие экономики региона, принять валовой региональный продукт, то возможно установить взаимосвязь между ВРП по видам экономической деятельности и производимой продукцией предприятий.

В таком случае модель сбалансированного устойчивого роста может быть представлена в общем виде:

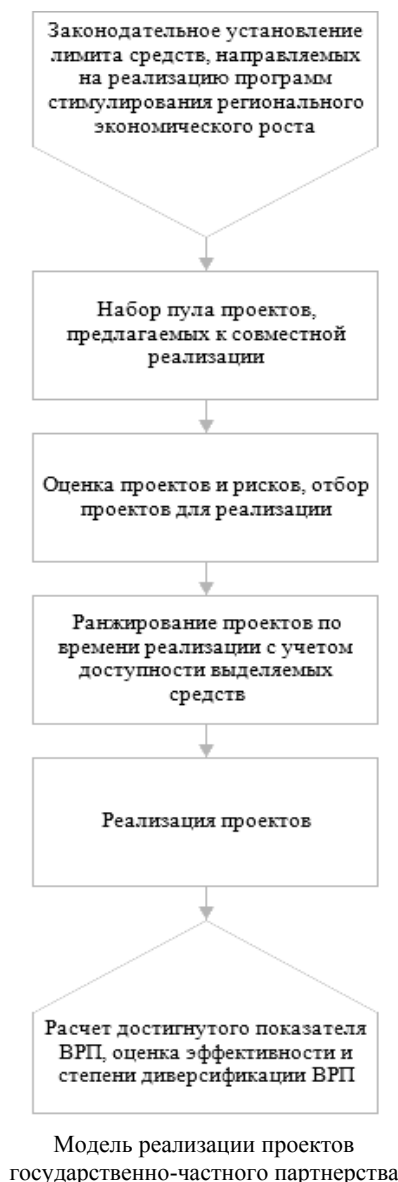
$$ВРП_{ОКВЭД_i} = \sum_{j=1}^n ОКПД_j \cdot a_{ij} + y_i.$$

В качестве целевой функции:

$$ВРП = \sum_{i=A}^Q ВРП_{ОКВЭД_i} \rightarrow \max,$$

где  $i = \overline{A, Q}$ , т. е. все виды ОКВЭД согласно утвержденному классификатору;  $y_i$  – продукция  $i$ -го вида, отгруженная на сторону;  $a_{ij}$  – доля продукции  $j$ -го вида в общем объеме продукции, направленной для внутреннего производства; ОКВЭД – общероссийский классификатор видов экономической деятельности; ОКПД – общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности.

Сегодня, когда государственное устройство дает регионам определенную управленческую и бюджетную автономию, сбалансированный устойчивый рост должен рассматриваться во взаимозависимости с их бюджетами, которые должны быть финансовой основой реализации этих функций.



Следовательно, можно определить возможный лимит бюджетного участия, который может быть направлен на поддержку участников, влияющих на рост ВРП, как Limit. Тогда, учитывая фактическую заинтересованность хозяйствующих субъектов в мероприятиях повышения эффективности развития, можно предложить распределение указанного лимита между всеми заинтересованными СМСП пропорционально их вкладу в ВРП:

$$\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\sum_{j=1}^n d_j} \text{Limit}$$

где  $d$  – доля данного субъекта в ВРП.

Проекты к реализации должны быть оценены с учетом специфики законодательства по рискам, способам финансирования, целевым показателям для получения государственной поддержки. Отбор и реализация проектов могут выполняться согласно рисунку.

Необходимо отметить, что достижение устойчивого экономического роста ВРП посредством реализации инновационного потенциала должно одновременно характеризоваться сбалансированностью, поэтому построение модели межотраслевого баланса позволит выявить признаки диверсификации между видами деятельности и отраслями и, таким образом, определить взаимное влияние реализации инновационных проектов на смежные виды экономической деятельности.

Инновационные проекты как составляющие новой экономической системы региона таким образом будут создаваться и функционировать на фундаменте существующего межотраслевого баланса, и будут характеризовать уровень достижения перспективного отраслевого баланса в экономической системе.

#### Библиографические ссылки

1. Об итогах работы Счетной палаты Красноярского края за 2011 год и основных направлениях деятельности на 2012 г. [Электронный ресурс]. URL: [http://spkrk.ru/index.php?option=com\\_content&view=%20article&id=17&Itemid=18](http://spkrk.ru/index.php?option=com_content&view=%20article&id=17&Itemid=18).
2. Отчет о деятельности контрольно-счетной палаты города Красноярска в 2010 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.krasksp.ru/reports/>.
3. Карасев А. И., Кремер Н. Ш., Савельева Т. И. Математические методы и модели в планировании / под ред. А. И. Карасева. М.: Экономика, 1987.
4. Шнипер Р. И. Региональные предплановые исследования. Экономический аспект. Новосибирск: Наука, 1979.

#### References

1. *Results of the Accounts Chamber of the Krasnoyarsk Territory in 2011 and the main activities in 2012*. Available at: [http://spkrk.ru/index.php?option=com\\_content&view=%20article&id=17&Itemid=18](http://spkrk.ru/index.php?option=com_content&view=%20article&id=17&Itemid=18).
2. *Report on the activities of the Accounts Chamber of the city of Krasnoyarsk in 2010*. Available at: <http://www.krasksp.ru/reports/>.
3. Karasev A. I., Kremer N. S., Saveliev T. I. *Matematicheskiye metody i modeli v planirovanii* (Mathematical methods and models in the planning). Moscow, Economy, 1987, 239 p.
4. Shniper R. I. *Regional'nyye predplanovyye issledovaniya. Ekonomicheskiy aspekt* (Regional preplan research. Economical aspect). Novosibirsk, Science, 1979, 367 p.

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В КАЗНАЧЕЙСКОЙ СЛУЖБЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

Т. П. Сацук

Сибирский федеральный университет  
Россия, 660075, Красноярск, ул. Лидии Прушинской, 2. E-mail: stp13@mail.ru

*Обосновывается необходимость создания казначейской службы на промышленных предприятиях. Рассматривается подход к организации учетно-аналитической информации в казначейской службе. Особое внимание уделяется схеме преобразования информации, что позволяет судить о возможных спектрах получения новой информации за счет ее детализации, сравнения и анализа при управлении денежными потоками.*

*Ключевые слова:* казначейская служба, управление, денежные потоки.

## CONVERSION OF ACCOUNTING RESEARCH INFORMATION AT DISBURSING SERVICE OF A COMPANY

T. P. Satsuk

Siberian Federal University  
2 Lidiya Prushinskaya st., Krasnoyarsk, 660075, Russia. E-mail: stp13@mail.ru

*The article substantiates the need for the establishment of the disbursing service of the industrial enterprises. We consider an approach to the development of accounting and analytical information in the disbursing service. Special attention is paid to the scheme of transformation of the information that allows to judge about the possible spectra of the new information received at the expense of its detailing, comparison and analysis of the cash flow management.*

*Keywords:* treasury services, management, cash flow.

Актуальной проблемой в современных условиях является балансирование между поддержанием текущей платежеспособности и получением дополнительной прибыли от вложения денежных средств. Организация управления денежными средствами и их потоками варьируется в зависимости от стратегии развития предприятия. Положителен опыт ряда зарубежных компаний, которые для эффективности управления денежными средствами создают специальные казначейские службы. Такой опыт, по нашему мнению, следует шире использовать в российской практике. В рамках данной статьи делается попытка рассмотреть основные возможности организации казначейской службы и оценить преобразования учетно-аналитической информации при принятии управленческих решений.

Организация казначейской службы основывается на следующих принципиальных позициях:

- генеральная дирекция должна уточнить задачи и пределы свободы действий казначейской службы; казначейская служба может являться центром получения прибыли, управление которым должно быть направлено на прирост прибыли за счет собственной дополнительной прибыли казначейской службы;
- казначейская служба входит в состав центрального аппарата головного предприятия корпорации, а представительства этой службы должны быть расположены в каждом дочернем предприятии;
- на предприятиях с небольшим оборотом функции казначая обеспечиваются бухгалтерией [1].

Казначейские операции являются оперативным буфером, регулирующим инструментом при возникновении дисбалансов в управлении активами и пассивами, выступающих как следствие изменения структуры финансовых рисков. Структура же финансовых рисков есть объект управления финансовой и аналитической службы организации, поэтому эти службы и казначейство должны общаться и работать без посредников, реализуя решения менеджера по управлению активами и обязательствами.

Основные задачи казначейской службы такой организации состоят:

- в прогнозе входящих и исходящих денежных потоков и управлении ими;
- обеспечении ликвидности предприятия;
- оценке различных типов вложений и размещении излишков денежных средств;
- определении источников краткосрочного финансирования;
- управлении рисками по процентным ставкам и курсовому обмену;
- определении плана поступления денежных средств и их использования [2].

Требования рыночного ведения хозяйства возлагают на казначейские службы функцию управления рисками. Они должны управлять задолженностью предприятия, организацией покрытия процентных ставок и курсовых ставок.

Бухгалтер-казначей, прежде всего, должен определить минимальный уровень наличных денежных

средств в кассе, чтобы подстраховаться от риска неплатежей, риска недостаточного запаса наличности, поскольку предприятие при этом вынуждено будет просить об отсрочке своих платежей, что может привести:

– к предоставлению суммы банками по более высокой процентной ставке;

– потере кредитного доверия у поставщиков товаров.

К тому же, если предприятие обладает слишком малым запасом денежных средств, оно не сможет воспользоваться такими выгодными возможностями, как скидки, предоставляемые при оплате денежными средствами, приобретение материалов по низким ценам и т. п.

Для определения минимальной суммы наличных денежных средств применяются разные методы, основанные на использовании финансовых показателей. Например, обычный метод состоит в том, что умножают ежедневный средний расход денежных средств по организации на количество дней. Так, если средняя за год сумма ежедневного расхода денежных средств составляет 40 000 руб. и если казначей считает, что ему следует иметь эквивалент в кассе на 5 дней, то он зарезервирует 200 000 руб. ( $40\,000 \text{ руб.} \cdot 5$ ).

Заметим, что «омертвление» финансовых ресурсов в виде наличных денежных средств, связано с определенными потерями, величину которых можно оценить размером упущенной выгоды.

Общая схема преобразования информации в казначейской службе представлена на рисунке.

На примере схемы преобразования информации можно судить о возможных спектрах получения новой информации за счет ее детализации, сравнения и анализа. Причем уровневой аналитики, так же как и уровневой детализации может быть несколько.

Если стремиться к формализации, то модель информационно-аналитического поля, охватывающего всесторонние денежные потоки, можно представить в виде информационно-аналитического «дерева» или «пирамиды», вершина которой сориентирована на руководителя, принимаемые им решения. Основой для принятия решения послужит собранная информация. Каждый уровень «дерева» содержит в себе информацию, сформированную с использованием методик учета и анализа денежных потоков. Синтез этих методик позволяет дать реальную характеристику движения денежных средств по отношению к текущим и прогнозируемым параметрам денежных потоков.

*Первый уровень* аналитики – это информация о всей совокупности финансовых и хозяйственных операций, отраженных на счетах бухгалтерского учета и в аналитических бухгалтерских регистрах.

*Второй уровень* информации вытекает из процедуры бухгалтерского учета, завершающегося формированием бухгалтерской финансовой отчетности, и процедуры налогового учета, завершающегося формированием налоговых деклараций.



Схема преобразования информации

На втором уровне инвесторы и кредиторы могут пользоваться информацией о денежных потоках следующих типов:

1. Движение денежных средств по производственной и торговой деятельности на внешнем и внутреннем рынках от опта и розницы.

2. Эпизодические (или случайные) потоки денежных средств, не связанные с основной деятельностью, но являющиеся результатом непредвиденных событий и стремлением сохранить для фирмы благоприятную окружающую среду.

3. Денежные потоки, образованные необходимостью расширения бизнеса или увеличения материальных запасов.

4. Денежные средства, полученные от держателей облигаций или собственников в качестве финансирования организации.

5. Выплаты процентов или дивидендов инвесторам и собственникам.

В результате отчет о движении денежных средств имеет цель представить внешним пользователям годовой отчетности дополнительные сведения, раскрывающие финансовое положение организации, которые не могут быть прямо или косвенно получены из прочих составных частей отчетности.

*Третий уровень* аналитики и публикация отчета о движении денежных средств позволяют инвесторам, кредиторам и третьим лицам получить информацию:

- для оценки платежеспособности организации;
- оценки кредитоспособности организации;
- оценки возможных расхождений между финансовым результатом отчетного года и финансовым положением организации;
- оценки влияния финансовых и инвестиционных сделок, связанных с платежами и не связанных с ними, на финансовое положение организации.

*Четвертый уровень* аналитики содержит информацию, которую можно интерпретировать для принятия конкретного управленческого решения. Представление таких данных осуществляется после завершения процесса преобразования информации 1–3 уровня соответствующими службами предприятия.

Следует отметить, что ясное понимание и анализ требуют разграничения показателей, характеризующих торговую деятельность и рентабельность, от показателей финансирования предприятия. И те, и другие существенны, взаимосвязаны, но не идентичны. Их смешивание приводит к тому, что анализ становится нечетким [3].

Отчет о движении денежных средств демонстрирует влияние прибыльных видов деятельности на ресурсы денежных средств и на то, какие активы приобретаются и как они финансируются. Он может более четко выдвинуть на первый план различие между чистым доходом и денежными средствами, полученными в результате деятельности компании.

Таким образом, с целью получения достоверной и оперативной информации о движении денежных потоков и принятия взвешенных решений в процессе управления активами и обязательствами компаниям следует создать казначейскую службу. Изложенный подход к организации учетно-аналитической информации в казначейской службе с выделением отдельных значимых блоков, таких как блок информации о движении денежных средств, позволяет организационно увязать формируемые данные для стратегического и оперативного управления, а также задействовать весь информационный ресурс для эффективного управления рисками, связанными с бизнесом внутри страны и за рубежом.

#### Библиографические ссылки

1. Бакулевская Л. В. Управление денежными потоками: теоретический и методический аспекты : моногр. Йошкар-Ола : Стринг, 2011.
2. Ковалев В. В. Управление денежными потоками, прибылью и рентабельностью : учеб.-практ. пособие. М. : Велби ; Проспект, 2008.
3. Сацук Т. П. Концепции экономического содержания, функций, механизма и инструментария управления финансами корпораций // Вестник Государственного университета управления. 2009. № 21. С. 341–346.

#### References

1. Bakulevskaya L. V. *Upravlenie denezhnymi potokami: teoreticheskiy i metodicheskiy aspekty* (Management of cash flows: theoretical and methodical aspects). Ioshkar Ola, 2011, 161 p.
2. Kovalev V. V. *Upravlenie denezhnymi potokami, pribylyu i rentabelnostyu* (Management of cash flows, profit and profitability). Moscow, 2008, 336 p.
3. Satsuk T. P. *Vestnik State University of Management. Development of branch and regional management*. Moscow, 2009, no. 21, pp. 341–346.

© Сацук Т. П., 2013

УДК 658.7:339.9

## ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКАЯ ЛОГИСТИКА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А. В. Селиванов, Я. И. Шамлицкий

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: imanselivan@gmail.com

*Предлагается статистическая модель транспортно-складского хозяйства предприятия с оценкой эффективности логистической поддержки автомобильных перевозок по требованиям его подразделений. Исследуется процесс распределения разнотипного автотранспорта по кольцевому маршруту с обязательным формированием локального контура управления транспортно-складской логистикой.*

*Ключевые слова: транспортно-складская логистика, статистическая модель перевозок, управление материало потоками.*

## TRANSPORT AND STORAGE LOGISTICS OF THE PRODUCTION SYSTEM OF ENGINEERING ENTERPRISES

A. V. Selivanov, Y. I. Shamlitskiy

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: imanselivan@gmail.com

*The authors offer a statistical model of transport and warehousing commercial unit of a company with the assessment of the effectiveness of logistics support for the transport requirements of its subsidiaries. Process of distribution of polytypic motor transport on a ring route with obligatory formation of a local contour of management by transportation-warehouse logistics is investigated.*

*Keywords: transportation and storage logistics, statistical model of traffic management, material flow.*

Транспортировка – это составная часть логистики, она взаимодействует потребности в материальных ресурсах (МР) основных и вспомогательных цехов предприятия с их комплектованием на его складах.

Актуальность данного исследования связана с тем, что в настоящий момент на предприятиях крупносерийного производства сложилась ситуация постоянной недозагрузки автотранспорта из-за отсутствия методики его распределения для случая эксплуатации комбинированного автотранспорта [1]. Радиус внутренних перемещений грузов достигает 15 км, а для предприятий оборонного комплекса транспортная задача осложняется наличием контрольно-пропускных пунктов. Документооборот требований подразделений составляет 3,2...3,5 тыс. заявок в месяц и содержит 13,4...17,5 тыс. номенклатурных наименований МР за годовой период.

В работе предлагается статистическая модель транспортно-складской деятельности крупносерийного машиностроительного предприятия с оценкой эффективности логистического обеспечения внутренних автомобильных перевозок МР по заявкам его производственных подразделений. Одним из способов повышения эффективности доставки товаров в смешанном сообщении является оптимизация проектирования транспортных работ. Целью данного исследования является разработка и внедрение локального контура системы управления транспортно-складскими

операциями предприятия [2]. Объектом исследования выступает процесс по доставке грузов от складов до цехов-потребителей и от поставщиков до материальных складов предприятия.

В случае с машиностроительным заводом подходит модель General Pickup and Delivery Problem (GPDP) – основная модель вывоза и доставки. Следует отметить, что в модели GPDP не раскрывается алгоритм принятого распределения транспортных средств по маршрутной сети, и она не определяет решения, например, для условий работы разнотипного транспорта в ОАО «Красмаш». Предлагаемая статистическая модель транспортно-складской системы позволяет полнее отражать реальную картину функционирования исследуемого контура управления. Расчётами по модели определяется план сменной загрузки разнотипного автотранспорта как по нормативным, так и по фактическим базам данных.

Рассмотрим более детально процесс кольцевых перевозок сырья и комплектующих между центральным складом и цехами-потребителями в ОАО «Красмаш» (рис. 1).

Процесс планирования работы транспортных средств основывается на рассчитанной потребности в материалах, которая дополнительно конкретизируется по заявкам цехов. Планирование внутреннего грузооборота МР по заявкам производственных подразделений производится с учётом различных видов грузовых единиц (см. таблицу).



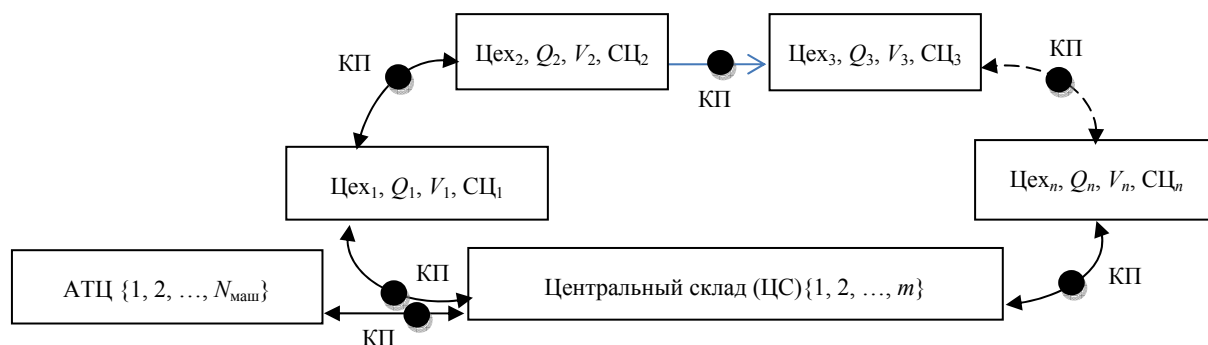


Рис. 1. Схема взаимодействия элементов транспортно-складской системы:  
ЦС – центральный склад;  $Q_i$  – объем заявки  $i$ -го цеха с ЦС;  $V_i$  – габариты заявленных МР  $i$ -м цехом с ЦС;  
СЦ – внутренней склад  $i$ -го цеха; КП – остановка транспортных средств на контрольно-пропускных пунктах

### Классификация внутреннего материального потока по учетным признакам

| Учетный признак        | Операции                                                                         |                               |                                          | Потребность                         |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
|                        | Склада                                                                           | Автотранспорта $i$ -го вида   |                                          |                                     |
|                        |                                                                                  | Грузоподъемность ( $q_i$ ), т | Вместимость ( $V_i$ ), м <sup>3</sup>    |                                     |
| Номенклатурная единица | Погрузка с одного места (однородные)                                             | $\leq q_i$                    | Размещение                               | Ежесменная                          |
| Партия                 | Погрузка с разных мест (составные)                                               | $\leq q_i$                    | Рациональное использование объема кузова | По мере необходимости               |
| Машино-комплект        | Параллельная погрузка двух и более машин (комбинированные)                       | $\approx q_i$                 | $\approx V_i$                            | По количеству рейсов автотранспорта |
| Цехозаказ              | Селективная погрузка по требованиям производственных подразделений (селективная) | Кратно $q_i$                  | Кратно $V_i$                             | По мере поступления цеховых заявок  |

Предлагаемая статистическая модель транспортно-складской системы учитывает реальную картину функционирования исследуемого контура управления, что в итоге позволяет планировать сменную работу разнотипного (до трёх разных типов) автотранспорта как по нормативной, так и по фактической базам данных. Накопленная статистика работы контура легко используется и в имитационном моделировании интегрированного транспортно-складского процесса.

Планирование внутреннего грузооборота МР по заявкам производственных подразделений начинается с определения суммарного грузооборота за смену ( $Q_{см}$ ):

$$Q_{см} = \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (1)$$

Все маршруты доставки материалов (комплектующих) выбираются на основании заявок от  $i$ -го производственного подразделения, при этом должно выполняться следующее условие:

$$\text{Заявки} = \begin{cases} Q_i, \text{ м/смену;} \\ V_i - \text{объем груза, соответствует} \\ \text{вместимости транспортного средства.} \end{cases} \quad (2)$$

В данном случае транспортное средство выполняет циклический маршрут доставки грузов. Зная общий объем груза  $Q_{см}$ , который необходимо доставить во все запланированные точки (цеха) по кольцевому

маршруту, и грузоподъемность конкретного  $i$ -го вида транспортного средства, можно рассчитать необходимое плановое количество рейсов за смену ( $n_{пл}$ ) для данного одного вида автотранспорта:

$$n_{пл} = \frac{Q_{см}}{q_i \cdot k_{и.г}}, \quad (3)$$

где  $Q_{см}$  – суммарный грузооборот за смену, т/смену;  $q_i$  – грузоподъемность  $i$ -го транспортного средства, т;  $k_{и.г}$  – коэффициент использования грузоподъемности.

На практике этот показатель рассчитывается исходя из времени одного рейса  $i$ -го вида автотранспорта по  $j$ -му маршруту [3; 4]:

$$t_{рейсij} = t_{двиj} + t_{погрj} + t_{разгрj} + t_{кпj}, \quad (4)$$

где  $t_{рейсij}$  – время рейса одного  $i$ -го вида автотранспорта по  $j$ -му маршруту;  $t_{двиj}$  – время на движенические операции  $i$ -го вида автотранспорта по  $j$ -му маршруту;  $t_{погрj}$  – время на погрузочные операции  $i$ -го вида автотранспорта по  $j$ -му маршруту;  $t_{разгрj}$  – время на разгрузочные операции  $i$ -го вида автотранспорта по  $j$ -му маршруту;  $t_{кпj}$  – время на прохождение контрольно-пропускных пунктов  $i$ -го вида автотранспорта по  $j$ -му маршруту.

При этом в расчете общего количества рейсов учитывается средневзвешенное время рейса ( $\bar{t}_{рейсi}$ )  $i$ -го вида автотранспорта:

$$\bar{t}_{рейсi} = \sum_{j=1}^n t_{рейсij} \cdot L_j / \sum_{j=1}^n L_j, \quad (5)$$

где  $n$  – общее количество маршрутов на территории завода;  $L_j$  – расстояние транспортировки по  $j$ -му маршруту, км.

Следовательно, количество рейсов автотранспорта ( $n_{\text{рейси}}$ ), которые выполняются одной единицей  $i$ -го вида транспорта за смену, определяется как

$$n_{\text{рейси}} = \frac{T_{\text{оп}} - t_{\text{аси}}}{\bar{t}_{\text{рейси}}}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{оп}}$  – оперативное время работы транспорта в смену,  $T_{\text{оп}} \approx 7$  ч;  $t_{\text{аси}}$  – время движения по маршруту «автоцех–склад–автоцех»  $i$ -го вида автотранспорта;  $\bar{t}_{\text{рейси}}$  – среднее время рейса  $i$ -го вида автотранспорта, определенное по выражению (5).

Тогда необходимое общее количество транспортных средств  $i$ -го вида ( $N_{\text{маш}}^i$ ), выделяемых на смену, будет равно [3; 4]:

$$N_{\text{маш}}^i = \left( \frac{Q_{\text{см}}}{q_i \cdot k_{\text{и.г}}} \right) / n_{\text{рейси}}, \quad (7)$$

Меняя значения грузоподъемности и коэффициента использования грузоподъемности можно в оперативном порядке менять одни транспортные средства на другие. При этом вышеуказанная формула (7) автоматически будет пересчитывать необходимое количество транспортных средств на разные их виды.

В этом случае количество единиц транспорта, необходимое для замены  $i$ -го вида автотранспорта на  $d$ -й при совместной работе двух их видов ( $N_{\text{маш}}^{i-d}$ ), можно определить [5]:

$$k_{\text{зам}i-d} = N_{\text{маш}}^i / N_{\text{маш}}^d, \quad (8)$$

$$N_{\text{маш}}^{i-d} = N_{\text{маш}}^i - l + \frac{l}{k_{\text{зам}i-d}}, \quad (9)$$

где  $k_{\text{зам}i-d}$  – коэффициент замены  $i$ -го вида автотранспорта на  $d$ -й вид;  $N_{\text{маш}}^i$  ( $N_{\text{маш}}^d$ ) – количество машин  $i$ -го ( $d$ -го) вида, выделенных автоцехом в плановую смену, единиц;  $l$  – фактическое уменьшение плановой потребности в машинах  $i$ -го вида (по технической готовности транспорта или др.) на смену ( $1 \leq N_{\text{маш}}^i$ ), единиц.

Одновременная работа автотранспорта 3-х типов ( $N_{\text{маш}}^{i-d-s}$ ) в транспортно-складской модели определяется по выражению

$$N_{\text{маш}}^{i-d-s} = N_{\text{маш}}^i - l_i + \frac{l_i}{k_{\text{зам}i-d}} - l_d + \frac{l_d}{k_{\text{зам}d-s}}; \quad (10)$$

$$l_i \leq N_{\text{маш}}^i, \quad (11)$$

$$l_d \leq \frac{l_i}{k_{\text{зам}i-d}}, \quad (12)$$

где  $l_i$  ( $l_d$ ) – фактическое уменьшение плановой потребности в машинах  $i$ -го ( $d$ -го) вида на смену, единиц;  $k_{\text{зам}d-s}$  – коэффициент замены  $d$ -го вида автотранспорта на  $s$ -й вид.

Указанный выше процесс доставки можно оптимизировать, внедрив секторизацию (по аналогии с методом Свира [6]) обслуживания производственных подразделений (рис. 2). Основная особенность принципа секторизации состоит в том, что процесс разбиения на секторы, в первую очередь, зависит от грузоподъемности и вместимости транспортного средства.

Предлагается внедрить такой процесс планирования доставки материалов: диспетчер транспортного цеха получает заявки на доставку материалов/компонентующих на следующий день; зная грузоподъемность транспортного средства, диспетчер делит пространство доставки на лучи; принцип разделения состоит в том, что в сектор должно включаться столько производственных цехов, сколько может «обслужить» по грузоподъемности одно транспортное средство; вообще сумма заявок за смену в секторе должна совпадать с грузоподъемностью, умноженной на количество оборотов транспортного средства за смену.

Алгоритм расчета параметров транспортно-складских работ (ТСР) на промышленном предприятии отражен на рис. 3. Алгоритмом предусмотрен известный способ лимитного контроля заявок цеха, по которому осуществляется проверка заданных пограничных значений на МР с суммарным их потреблением каждым цехом (блок А2). В других блоках алгоритма учитываются расчеты по формулам (1)...(12), предусматривается также подключение имитационного моделирования по мере накопления статистических данных (блоки А12, А13).

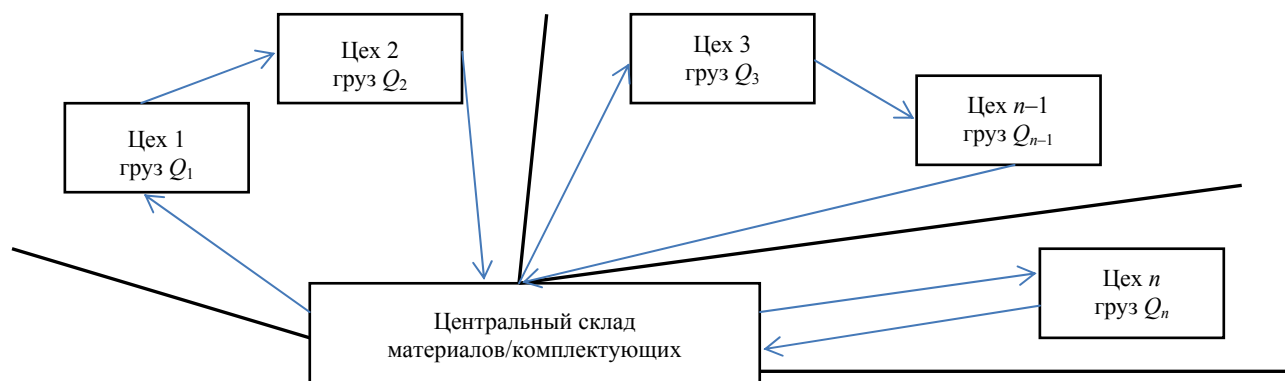


Рис. 2. Модифицированный процесс доставки грузов

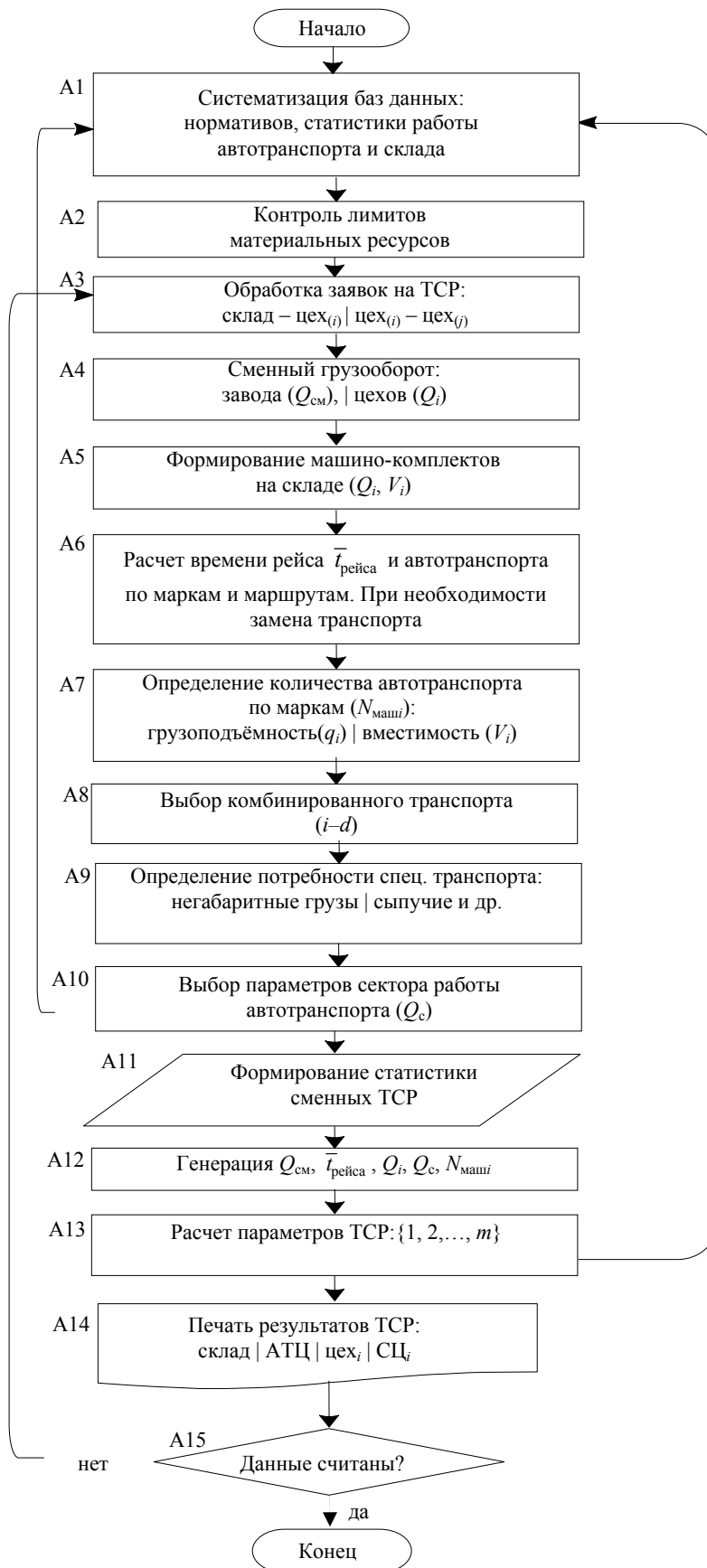


Рис. 3. Алгоритм расчета параметров транспортно-складских работ предприятия

Исследуемый процесс кольцевых перевозок под-держивается работой ряда служб и подразделений завода: плановым отделом, автотранспортным цехом, основными и вспомогательными цехами, складским хозяйством, контрольно-пропускными пунктами, диспетчерской службой, информационно-аналитическим центром. Необходимость в образовании локального контура управления (рис. 4) объясняется многостадийностью решения задачи распределения автотранспорта и обязательным подключением усилий всех специалистов подразделений. Каждое подразделение (отдел) решает определенные частные задачи (примеры приведены на рис. 4), которые в итоге интегрируются и способствуют повышению качества принимаемых управленческих решений в области транспортно-складской логистики промышленного предприятия. Помесечную работоспособность локального контура управления (рис. 4) рекомендуется оценивать рейтинговой системой показателей [7], позволяющей учесть вклад каждого подразделения и его персонала в эффективность предлагаемых мероприятий транспортно-складской логистики.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- вследствие рационального планирования транспортного процесса высвободится 30–35 % транспортных средств;

- налаживается контроль движения транспорта в реальном времени, что снизит возможность возникновения случаев простоя транспорта либо его перезагрузки;
- как продолжение этой работы, в будущем возможно использование обменного фонда прицепов на предприятии;

- расчётный экономический эффект для условий ОАО «Красмаш» составляет 1,38 млн руб./год.

Для внедрения оптимизированного процесса доставки грузов необходимо:

- провести сквозной мониторинг материального и информационного потока предприятия с его детализацией по основным цехам, их внутренним складам, центральному складу, автоцеху, контрольно-пропускным пунктам;

- систематизировать статистику по транспортному процессу на предприятии с постоянным анализом технико-экономических показателей работы транспорта с оценкой его технической готовности;

- необходимо, чтобы заявки на доставку материалов поступали в транспортный цех и склад не позднее, чем за сутки перед предстоящей доставкой;

- создать в цехах производства необходимые минимальные страховые запасы материалов и комплектующих;

- учитывать возможности использования прицепов и перевозку попутного груза из цеха в цех, а также из цеха на центральный склад.



Рис. 4. Локальный контур управления транспортным хозяйством с примерами решаемых задач: КПП – контрольно-пропускной пункт; ППР – планово-предупредительный ремонт; МР – материальные ресурсы; ТЭП – технико-экономические показатели; ТСП – транспортно-складские процессы; двухсторонними стрелками отображены организационные и информационные связи

## Библиографические ссылки

1. Selivanov A. V., Shamlitskiy Y. I., Prokopovich D. A. Modeling of Transportation and Storage System of Material Flows on Machine Building Plant // *Logistics & Sustainable Transport* : Proc. of the 9th Intern. Conf. (14–16 June 2012, Celje). Slovenia : Published by University of Maribor, Faculty of Logistics, 2012. P. 273–278.
2. Selivanov A. V., Vashlayev I. I., Prokopovich D. A. Contour-Integrated Principle of Production Management on Mining Industry Enterprise // *Logistics & Sustainable Transport* : Proc. of the 9th Intern. Conf. (14–16 June 2012, Celje). Slovenia : Published by University of Maribor, Faculty of Logistics, 2012. P. 279–283.
3. Николайчук В. Е. Логистический менеджмент : учебник. М. : Дашков и К°, 2009.
4. Неруш Ю. М., Неруш А. Ю. Практикум по логистике : учеб. пособие. М. : Велби ; Проспект, 2008. С. 51–73.
5. Селиванов А. В., Юрьев И. М. Оценка нормирования труда водителей автосамосвалов по закрытому циклу их работы на карьере // Роль научной организации труда в повышении производительности труда : материалы краевой науч.-техн. конф. (21 июня 1985, г. Красноярск). Красноярск : Дом техники НТО, 1985. С. 89–91.
6. Гаджинский А. М. Логистика. М. : Дашков и К°, 2010.
7. Формирование информационной технологии социального менеджмента на карьере / В. И. Ганицкий [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 6. С. 124–125.

## Referens

1. Selivanov A. V., Shamlitskiy Y. I., Prokopovich D. A. Modeling of Transportation and Storage System of Material Flows on Machine Building Plant. *LOGISTICS & SUSTAINABLE TRANSPORT: Proceedings of the 9th International Conference* (14–16 June 2012, Celje). Slovenia: Published by University of Maribor, Faculty of Logistics, 2012, pp. 273–278.
2. Selivanov A. V., Vashlayev I. I., Prokopovich D. A. Contour-Integrated Principle of Production Management on Mining Industry Enterprise. *LOGISTICS & SUSTAINABLE TRANSPORT: Proceedings of the 9th International Conference* (14–16 June 2012, Celje). Slovenia: Published by University of Maribor, Faculty of Logistics, 2012, pp. 279–283.
3. Nikolaychuk V. Ye. *Logisticheskiy menedzhment* (Logistical management). Moscow, MTK “Dashkov i K°”, 2009, 980 p.
4. Nerush Yu. M., Nerush A. Yu. *Praktikum po logistike* (Workshop Logistics). Moscow, Velbi, Prospekt, 2008, pp. 51–73.
5. Selivanov A. V., Yuryev I. M. *Materialy krayevoy nauch.-tekhn. konf. “Rol' nauchnoy organizatsii truda v povyshenii proizvoditel'nosti truda”* (The role of scientific management to improve productivity: Materials edge scientific and engineering. Conf. (June 21, 1985, Krasnoyarsk). Krasnoyarsk, Dom tekhniki NTO, 1985, pp. 89–91.
6. Gadzhinskiy A. M. *Logistika* (Logistics.). Moscow, MTK “Dashkov i K°”, 2010, 484 p.
7. Ganitskiy V. I., Selivanov A. V., Nekhoroshev D. B., Vashlayev I. I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'.* Moscow, Izd-vo MGGU, 2003, № 6, pp. 124–125.

© Селиванов А. В., Шамлицкий Я. И., 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

### РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

|                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Агафонов Е. Д., Мангалова Е. С., Шестернева О. В.</b> Непараметрическая модель в задаче прогнозирования мощности ветряных электрических установок .....                                         | 4   |
| <b>Бикчентаев А. А.</b> Поддержка данных технологических процессов в интегрированной информационной среде предприятия .....                                                                        | 9   |
| <b>Елубаев С. А., Джамалов Н. К., Алипбаев К. А., Сухенко А. С., Бопеев Т. М.</b> Имитационное моделирование основных компонентов системы управления движением космического аппарата .....         | 13  |
| <b>Жуков В. Г., Шаляпин А. А.</b> Прецедентный анализ инцидентов информационной безопасности .....                                                                                                 | 19  |
| <b>Замятин Д. В., Ловчиков А. Н.</b> Синтез оптимальных по быстродействию систем высокого порядка .....                                                                                            | 24  |
| <b>Карпенко Е. В., Карпенко В. В., Головин М. П.</b> Автоматизация проектирования торцевых генераторов мощностью до 20 кВт .....                                                                   | 28  |
| <b>Ковалев И. В., Нургалеева Ю. А., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Лукин Ф. А.</b> Минимизация межмодульного интерфейса для обеспечения надежности мультiversионного программного комплекса ..... | 35  |
| <b>Корнеева А. А., Чжан Е. А.</b> О параметрическом моделировании стохастических объектов .....                                                                                                    | 37  |
| <b>Лейнартас Е. К., Яковлев Е. И.</b> О разрешимости одной краевой задачи для полиномиального дифференциального оператора в классе функций экспоненциального типа .....                            | 43  |
| <b>Личаргин Д. В., Щурова А. В., Курбатова Е. А., Колбасина И. В.</b> Анализ лексических пар для автоматической генерации диалогической и монологической речи .....                                | 47  |
| <b>Мальцева Т. В., Медведев А. В.</b> О компьютерном исследовании К-моделей .....                                                                                                                  | 52  |
| <b>Медведев А. В.</b> Теория непараметрических систем. Управление-I .....                                                                                                                          | 57  |
| <b>Нестеров В. А.</b> Конечно-элементный расчет цилиндрической оболочки, податливой при трансверсальном сдвиге .....                                                                               | 64  |
| <b>Орлов В. И., Сергеева Н. А.</b> О непараметрической диагностике и управлении процессом изготовления электрорадиоизделий .....                                                                   | 70  |
| <b>Рубан А. И., Кузнецов А. В.</b> Новый генератор случайных равномерно распределенных точек .....                                                                                                 | 75  |
| <b>Савенкова Н. П., Лапонин В. С.</b> Численное исследование методов поиска многомерных солитонов .....                                                                                            | 81  |
| <b>Сенашов С. И., Юферова Н. Ю.</b> Актуальное моделирование стоимости недвижимости в Красноярске .....                                                                                            | 86  |
| <b>Строкова А. Ю., Фролов А. Н., Алешечкин А. М.</b> Эффективность использования OFDM в тропосферном канале связи, способы повышения помехоустойчивости .....                                      | 91  |
| <b>Ступина А. А., Шигина А. А., Шигин А. О.</b> Анализ эффективности функционирования многопараметрической системы .....                                                                           | 94  |
| <b>Царев Р. Ю., Капулин Д. В., Сидорова Г. А., Сержантова М. А., Бесчастная Н. А.</b> Формирование оптимальной структуры АСУ космических систем связи и навигации .....                            | 100 |
| <b>Царев Р. Ю., Прокопенко А. В., Литошник С. В., Зеленков П. В., Брезницкая В. В.</b> Аналитико-имитационная процедура формирования структуры АСУ космических систем связи и навигации .....      | 105 |
| <b>Швецов Е. Г., Ружичка З., Миронов В. Л.</b> Исследование применимости данных спутника SMOS для оценки уровня пожарной опасности на территории Красноярского края .....                          | 110 |
| <b>Юлдашев Т. К.</b> Об обобщенной разрешимости смешанной задачи для нелинейного уравнения с псевдопараболическим оператором высокой степени .....                                                 | 116 |

### РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

|                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Дружинин Э. И., Лукьяненко М. В., Якимов Е. Н.</b> Формирование динамических моделей космических конструкций по данным натуральных испытаний .....                                                       | 124 |
| <b>Карцан И. Н., Тяпкин В. Н., Охоткин К. Г., Карцан Р. В., Пахоруков Д. Н.</b> Дифференциальная коррекция погрешностей определения координат при геомагнитных возмущениях .....                            | 128 |
| <b>Красненко С. С., Недорезов Д. А., Кашкин В. Б., Пичкалев А. В.</b> Магистрально-модульная система для отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры .....                                               | 133 |
| <b>Протевень И. С., Краев М. В.]</b> Исследование обтекания полусферического крыла в потоке газа, растекающегося от центра .....                                                                            | 137 |
| <b>Фурманова Е. А., Бойко О. Г.</b> О точности определения надежности систем статистическими методами .....                                                                                                 | 139 |
| <b>Якимов Е. Н., Раевский В. А., Лукьяненко М. В.</b> Анализ динамики системы ориентации и стабилизации упругого космического аппарата с силовым гироскопическим комплексом на базе гиродин ГД 02-150 ..... | 143 |

### РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Аплеснин С. С., Кретинин В. В., Остапенко А. А., Галяс А. И., Янушкевич К. И.</b><br>Магнитоэлектрические свойства мультиферроиков $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ .....                                                                                                              | 156 |
| <b>Аристов В. Ф., Халиманович В. И., Миронович В. В., Ислентьева Т. А., Гуров Д. А.</b><br>Цианат-эфирные связующие в аэрокосмической отрасли. Каталитические свойства<br>органометаллических комплексов и солей диазония с комплексными анионами<br>в отверждении цианат-эфирных связующих ..... | 159 |
| <b>Бискуб К. Н.</b> Адаптивный наблюдатель прогнозирующей системы управления<br>процессом охлаждения технологических газов плавильной электропечи .....                                                                                                                                           | 165 |
| <b>Богданов В. В., Новосельцев Ю. Г., Готовко С. А.</b> Металлургические особенности<br>плазменной сварки толстостенных изложниц из хромовой бронзы<br>для выплавки крупногабаритных слитков титана .....                                                                                         | 171 |
| <b>Великанов Д. А.</b> Сквид-магнитометр для исследования магнитных свойств материалов<br>в интервале температур 4,2–370 К .....                                                                                                                                                                  | 176 |
| <b>Горемыкин В. А., Кинев Е. С., Головенко Е. А., Гудков И. С., Бежитский С. С.</b> Параметрический<br>синтез оптимальных конструкций индукционных нагревателей с многослойными обмотками .....                                                                                                   | 182 |
| <b>Зуев А. А., Толстомятов М. И., Жуйков Д. А.</b> Установка для экспериментального<br>исследования теплоотдачи вращательного течения газа .....                                                                                                                                                  | 189 |
| <b>Костин Е. В.</b> Алгоритмическое обеспечение управления качеством<br>продуктов плавки в печах Ванюкова .....                                                                                                                                                                                   | 192 |
| <b>Логинев Ю. Ю., Мозжерин А. В., Брильков А. В.</b> Влияние упругих напряжений<br>на формирование структурных дефектов в полупроводниках .....                                                                                                                                                   | 198 |
| <b>Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А.</b> Автоматизированная система управления манипулятором .....                                                                                                                                                                                                     | 201 |
| <b>Михеев А. Е., Гирн А. В., Вахтеев Е. В., Алексеева Е. Г., Башков И. В.</b> Процесс формирования<br>структуры и состава МДО-покрытий на алюминиевых сплавах .....                                                                                                                               | 206 |
| <b>Михеев А. Е., Трушкина Т. В., Гирн А. В., Раводина Д. В., Ивасев С. С.</b> Химические процессы<br>при микродуговом окислении .....                                                                                                                                                             | 212 |
| <b>Михеев А. Е., Харламов В. А., Крючек С. Д., Черныгина А. А., Хоменко И. И.</b> Исследование<br>состава остаточного и плазмообразующего газов в камере установки вакуумного напыления .....                                                                                                     | 216 |
| <b>Оборина Л. И., Трифанов И. В., Исмаилов Б. Н., Стерехов И. В., Шелковская В. М.</b><br>Повышение качества поверхности зеркал лучеводов вибрационным электрохимическим хонингованием .....                                                                                                      | 219 |
| <b>Попов З. И., Федоров А. С., Кузубов А. А., Елисеева Н. С.</b> Исследование влияния<br>концентрации лития на скорость диффузии в кристаллическом кремнии .....                                                                                                                                  | 225 |
| <b>Сысоева Л. П., Сысоев С. К., Сысоев А. С.</b> Методика обеспечения качества каналов<br>деталей летательных аппаратов с использованием абразивно-экструзионной обработки .....                                                                                                                  | 228 |

### РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Аврамчикова Н. Т., Солоненко Н. Н.</b> Инструменты оценки эффективности деятельности персонала .....                                                         | 234 |
| <b>Белякова Е. В., Самарцева А. В.</b> Роль стейкхолдеров в формировании<br>региональной логистической инфраструктуры .....                                     | 239 |
| <b>Васильева З. А., Назаревич А. В.</b> Принципы контроллинга производственной деятельности<br>малых и средних предприятий машиностроения .....                 | 244 |
| <b>Ерыгин Ю. В., Павлова Е. О.</b> Инструменты формирования портфельной стратегии<br>инновационного развития предприятия оборонно-промышленного комплекса ..... | 249 |
| <b>Карелин О. И., Болтов Р. В.</b> К вопросу о сбалансированном росте экономики региона<br>и инструментах содействия росту .....                                | 255 |
| <b>Сацук Т. П.</b> Преобразование учетно-аналитической информации<br>в казначейской службе предприятия .....                                                    | 257 |
| <b>Селиванов А. В., Шамлицкий Я. И.</b> Транспортно-складская логистика<br>производственной системы машиностроительного предприятия .....                       | 260 |

## CONTENTS

### PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

|                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Agafonov E. D., Mangalova E. S., Shesterneva O. V.</b> A nonparametric model in the task of predictive modeling of wind power plants .....                                                                     | 4   |
| <b>Bikchentaev A. A.</b> Support of data of technological processes in integrated information environment of an enterprise.....                                                                                   | 9   |
| <b>Yelubayev S. A., Jamalov N. K., Alipbayev K. A., Sukhenko A. S., Bopeyev T. M.</b> Simulation modeling of the main components of motion control system of the satellite.....                                   | 13  |
| <b>Zhukov V. G., Shalyapin A. A.</b> Case based analysis of information security incidents .....                                                                                                                  | 19  |
| <b>Zamjatin D. V., Lovchikov A. N.</b> Synthesis of time optimal systems of high order .....                                                                                                                      | 24  |
| <b>Karpenko E. V., Karpenko V. V., Golovin M. P.</b> Automation of design of butt generators with the capacity up to 20 kW .....                                                                                  | 28  |
| <b>Kovalev I. V., Nurgaleeva J. A., Shahmatov A. V., Chekmaryov S. A., Lukin F. A.</b> Minimization of inter-module interface for provision of reliability of multiversion software system .....                  | 35  |
| <b>Korneeva A. A., Chzhan E. A.</b> About the parametric modeling of stochastic objects.....                                                                                                                      | 37  |
| <b>Leinartas E. K., Yakovlev E. I.</b> On the solvability of one boundary value problem for polynomial differential operator in the class of functions of exponential type .....                                  | 43  |
| <b>Lichargin D. V., Shchurova A. V., Kurbatova E. A., Kolbasina I. V.</b> Lexical pairs analysis for automatic generation of dialogue and monologue speech.....                                                   | 47  |
| <b>Maltseva T. V., Medvedev A. V.</b> On a computer research of $K$ -models .....                                                                                                                                 | 52  |
| <b>Medvedev A. V.</b> Theory of nonparametric systems. Control-I .....                                                                                                                                            | 57  |
| <b>Nesterov V. A.</b> Finite element analysis of the shear flexible cylindrical shell .....                                                                                                                       | 64  |
| <b>Orlov V. I., Sergeyeva N. A.</b> On nonparametric diagnosis and control of the process of electronics manufacture.....                                                                                         | 70  |
| <b>Ruban A. I., Kuznetsov A. V.</b> The new generator of the random uniformly distributed points .....                                                                                                            | 75  |
| <b>Savenkova N. P., Laponin V. S.</b> Numerical research of methods for multidimensional solutions search.....                                                                                                    | 81  |
| <b>Senashov S. I., Yuferova N. Y.</b> Simulation of current property value in Krasnoyarsk .....                                                                                                                   | 86  |
| <b>Stroкова A. Yu., Frolov A. N., Aleshechkin A. M.</b> Efficiency of use OFDM in the troposcatter communication channel, ways of noise stability rise .....                                                      | 91  |
| <b>Stupina A. A., Shigina A. A., Shigin A. O.</b> The analysis of functioning efficiency of the multiple parameter system.....                                                                                    | 94  |
| <b>Tsarev R. Yu., Kapulin D. V., Sidorova G. A., Serzhantova M. A., Beschastnaya N. A.</b> Formation of optimum structure of ACS of space communication systems and navigation .....                              | 100 |
| <b>Tsarev R. Yu., Prokopenko A. V., Litoshik S. V., Zelenkov P. V., Brezitskaya V. V.</b> Analytical and simulation procedure of formation of structure of ACS of space communication systems and navigation..... | 105 |
| <b>Shvetsov E. G., Ruzicka Z., Mironov V. L.</b> Investigation of possibilities of using SMOS data for fire danger assessment at the territory of Krasnoyarsk region .....                                        | 110 |
| <b>Yuldashev T. K.</b> On generalized solvability of mixed value problem for nonlinear equation with pseudoparabolic operator of higher power .....                                                               | 116 |

### PART 2. AVIATION AND SPACE-ROCKET ENGINEERING

|                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Druzhynin E. I., Lukyanenko M. V., Yakimov E. N.</b> Identification of dynamic models of space constructions according to actual test data .....                                                                                       | 124 |
| <b>Kartsan I. N., Tyapkin V. N., Okhotkin K. G., Kartsan R. V., Pahorykov D. N.</b> Differential correction of position measurement errors in event of geomagnetic disturbances .....                                                     | 128 |
| <b>Krasnenko S. S., Nedorezov D. A., Kashkin V. B., Pichkalev A. V.</b> Bus-modular system for test of onboard radioelectronic equipment .....                                                                                            | 133 |
| <b>Proteven I. S., Kraev M. V.</b> Investigation of flow-around the hemispherical wing in a gas outermost flow .....                                                                                                                      | 137 |
| <b>Furmanova E. A., Boyko O. G.</b> About the accuracy of systems reliability definition with statistic methods .....                                                                                                                     | 139 |
| <b>Yakimov E. N., Raevskiy V. A., Lukyanenko M. V.</b> Analysis of the dynamic performance of the pointing and attitude control subsystem of the resilient spacecraft with power gyroscopic unit on the basis of ГД 02-150 gyrodyne ..... | 143 |



### PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Aplesnin S. S., Kretinin V. V., Ostapenko A. A., Galyas A. I., Yanushkevich K. I.</b> Magnetolectric properties of $\text{Nd}_x\text{Bi}_{1-x}\text{FeO}_3$ multiferroics .....                                                                                                                   | 156 |
| <b>Aristov V. F., Khalimanovich V. I., Mironovich V. V., Isentyeva T. A., Gurov D. A.</b> Cyanate ester coupling agents in aerospace industry. Catalytic properties of organometallic complexes and diazonium salts with complex anions in the curing reaction of cyanate ester coupling agents..... | 159 |
| <b>Biskub K. N.</b> Adaptive observer of predicting system of process control for cooling gases of melting furnace.....                                                                                                                                                                              | 165 |
| <b>Bogdanov V. V., Novoselcev Yu. G., Gotovko S. A.</b> Metallurgical features of plasma welding of thick-walled molds made of chromium bronze for smelting large titanium ingots.....                                                                                                               | 171 |
| <b>Velikanov D. A.</b> Squid magnetometer for investigations of the magnetic properties of materials in the temperature range 4.2–370 K.....                                                                                                                                                         | 176 |
| <b>Goremykin V. A., Kinev E. S., Golovenko E. A., Gudkov I. S., Bezhitskiy S. S.</b> Parametrical synthesis of optimum designs of induction heaters with multilayered coils .....                                                                                                                    | 182 |
| <b>Zuev A. A., Tolstopyatov M. I., Zhuikov D. A.</b> Installation for experimental research of convective heat of the rotational gas flow .....                                                                                                                                                      | 189 |
| <b>Kostin E. V.</b> Algorithmic support of products quality control in melting furnaces of Vanukov.....                                                                                                                                                                                              | 192 |
| <b>Loginov Yu. Yu., Mozherin A. V., Brilikov A. V.</b> Effect of elastic stresses on the formation of structural defects in semiconductors.....                                                                                                                                                      | 198 |
| <b>Mirzaev R. A., Smirnov N. A.</b> Automated control system of a manipulator .....                                                                                                                                                                                                                  | 201 |
| <b>Miheev A. E., Girn A. V., Vahteev E. V., Alekseeva E. G., Bashkov I. V.</b> Process of formation of the structure and composition of MAO-coatings on aluminum alloys.....                                                                                                                         | 206 |
| <b>Miheev A. E., Trushkina T. V., Girn A. V., Ravodina D. V., Ivasev S. S.</b> Chemical processes at microarc oxidation .....                                                                                                                                                                        | 212 |
| <b>Miheev A. E., Harlamov V. A., Kryuchek S. D., Chernyatina A. A., Homenko I. I.</b> Study of composition of residual and plasma-forming gases in the vacuum coaters.....                                                                                                                           | 216 |
| <b>Oborina L. I., Trifanov I. V., Ismailov B. N., Sterekhov I. V., Shelkovsky V. M.</b> Improvement of quality of mirrors surfaces of beam guides with shaky electrochemical honing process .....                                                                                                    | 219 |
| <b>Popov Z. I., Fedorov A. S., Kuzubov A. A., Eliseeva N. S.</b> Influence of lithium concentration on the diffusion rate in crystalline silicon.....                                                                                                                                                | 225 |
| <b>Sysoeva L. P., Sysoev S. K., Sysoev A. S.</b> The technique for guarantee of quality of the aircraft detail channels with the use of abrasive flow machining process .....                                                                                                                        | 228 |

### PART 4. ECONOMICS

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Avramchikova N. T., Solonenko N. N.</b> Tools of assessment of personnel activity efficiency .....                                                              | 234 |
| <b>Belyakova E. V., Samartseva A. V.</b> Role of stakeholders in formation of the regional logistics infrastructure .....                                          | 239 |
| <b>Vasilyeva Z. A., Nazarevich A. V.</b> Production activity controlling principles of small and medium-sized machine industry enterprises .....                   | 244 |
| <b>Erygin Yu. V., Pavlova E. O.</b> Instruments of portfolio formation strategy for innovative development of enterprises in the military-industrial complex ..... | 249 |
| <b>Karelin O. I., Boltov R. V.</b> Revisited the problem of balanced regional economic growth and growth assistance tools .....                                    | 255 |
| <b>Satsuk T. P.</b> Conversion of accounting research information at disbursing service of a company .....                                                         | 257 |
| <b>Selivanov A. V., Shamlitskiy Y. I.</b> Transport and storage logistics of the production system of engineering enterprises .....                                | 260 |

## **Требования к оформлению статей для опубликования в журнале «Вестник СибГАУ»**

**Общие требования.** Тексты представляются в редакцию в электронном и печатном виде. Оригинал должен быть чистым, не помятым, без правок, вписанных от руки. Страницы нумеруются карандашом на обороте.

Печатный оригинал должен полностью совпадать с электронным вариантом статьи.

Файлы со статьями принимаются на CD-диске, флэш-диске (без вирусов) или по электронной почте.

Статьи в распечатанном виде авторы сдают лично секретарю журнала или высылают по почте с указанием обратного адреса (для иногородних).

**ВНИМАНИЕ!** На последней странице обязательно ставится **подпись автора(ов)** статьи.

Количество авторов одной статьи не более 5-ти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй в соавторстве.

Индекс УДК предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

**Электронная копия.** Статья набирается в программе **Microsoft Office Word 2003!**

**Содержание.** В статье необходимо сформулировать проблемы, отразить объект исследования, достигнутый уровень процесса исследования, новизну результатов, область их применения.

Статья должна заканчиваться выводом (слово «Вывод» в статье не пишется!). Текст вывода набирается отдельным абзацем (абзацами), в котором акцентируется новизна результатов, эффективность их использования и др.

**Объем статьи:** 3–8 страниц (включая рисунки, таблицы и библиографические ссылки), краткое сообщение – 1–2 страницы.

**Параметры страницы.** Формат А4 (210×297). Поля: правое и левое – 2 см, верхнее и нижнее – 2,5 см.

**Текст.** Шрифт – Times New Roman, размер 12 пт.

*Не допускается (!) набирать тексты прописными (заглавными) буквами и жирным шрифтом (кроме названия), а также размещать все указанные элементы в рамках и имитировать оформления набора, выполняемого в журнале.*

При представлении научной статьи в журнал «Вестник СибГАУ» необходимо придерживаться **следующей схемы:**

Блок 1 – на русском языке:

- название статьи (по центру жирным шрифтом прописными буквами);
- автор(ы) (по центру строчными буквами);
- адресные данные авторов: организация(и), адрес организации(й), электронная почта всех или одного автора (если авторы из разных организаций, их принадлежность к организации помечается цифрой (верхний индекс) после фамилии автора и перед названием организации);
- аннотация (авторское резюме);
- ключевые слова.

Блок 2 – информация Блока 1 в той же последовательности на английском языке.

Блок 3 – полный текст статьи на русском или другом языке (язык оригинала).

Блок 4 – Список литературы (Библиографические ссылки) с русскоязычными ссылками на русском языке по ГОСТ Р 7.0.5-2008 (для статей на русском языке).

Блок 5 – Список литературы (References) с русскоязычными и другими ссылками в романском алфавите (правила оформления и примеры приведены ниже).

Название списка литературы должно быть на английском языке: REFERENCES, но ни в коем случае не транслитерированным: SPISOK LITERATURY.

**Аннотация.** Аннотация должна состоять минимум из 100–250 слов (по ГОСТу – 850 знаков, не менее 10 строк) и включать следующие аспекты содержания статьи:

- предмет, тему, цель работы;
- метод или методологию проведения работы;
- результаты работы;
- область применения результатов;
- выводы.

Аннотация на английском языке на русскоязычную статью по объему может быть больше аннотации на русском языке (но не более 850 знаков), так как за русскоязычной аннотацией идет полный текст на этом же языке.

**Основной текст** статьи размещается через пробел от резюме. Межстрочный интервал – одинарный, межбуквенный и междусловный интервал – нормальный, перенос слов не допускается. Внутренние подзаголовки статьи центрировать.

**Абзацный отступ** равен 0,5 см.

**Ссылки** на использованные в статье источники заключают в квадратные скобки и последовательно нумеруют, начиная с [1] (обязательно соблюдать последовательную нумерацию по тексту, не нужно выстраивать ссылки в алфавитном порядке!).

**Примечания:** 1. Смысловые пояснения основного текста или дополнения к нему оформляются в виде внутритекстовых примечаний среди строк основного текста специальной рубрикой, выделенной светлым курсивом: *Примечание:* (одно примечание), *Примечания:* (несколько примечаний). Отделяются от текста *точкой* (если стоят в единственном числе в подбор к тексту примечания).

Примечания должны быть последовательно пронумерованы.

2. При наличии гранта ссылка на грант помещается внизу полосы под строками основного текста (подстрочное примечание).

**Формулы.** Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны без использования специальных редакторов. Специальные сложные символы, а также многострочные формулы, которые не могут быть набраны обычным образом, должны быть набраны в редакторе формул Math Type. Набор математических формул в пределах всего текста должен быть единообразен:

- размеры символов определяются стандартными установками Math Type (Размер – Определить – Заводские),
- русские и греческие символы – прямым шрифтом,
- латинские – курсивом.

Формулы, набранные отдельными строками, располагают по центру.

*Не допускается (!) набор в основном тексте статьи простых латинских, греческих или специальных символов в редакторе формул.*

**Таблицы** должны быть последовательно пронумерованы. Слово «таблица» набирается светлым курсивом с выравниванием вправо, шрифтом 11, например, *Таблица 1* ниже – заглавие таблицы (набирается жирным шрифтом по центру). Если таблица имеет большой объем, она может быть помещена на отдельной странице, а в том случае, когда она имеет значительную ширину – на странице с альбомной ориентацией.

**Иллюстрации.** Иллюстрации и подписи к ним должны быть вставлены в текст статьи и дополнительно прикреплены отдельным файлом любого распространенного графического формата (например, .jpg, .bmp, .tiff и т. п.). Иллюстрации последовательно пронумеровываются обычным шрифтом без кавычек с выравниванием по центру, например, Рис. 1. Могут содержать подрисовочную подпись, шрифтом 11 пт. Рисунки могут быть сканированы с оригинала (в этом случае они должны быть четкими, контрастными, без лишнего фона) или выполнены средствами компьютерной графики. Цветные иллюстрации не принимаются.

**Сведения об авторе** помещаются в конце статьи на русском и английском языках и оформляются в следующей последовательности:

- фамилия, имя, отчество (полностью);
- ученая степень, звание;
- должность, место работы;
- e-mail;
- номер телефона;
- адрес для переписки (для иногородних).

В сведениях об авторах нельзя использовать аббревиатуры и сокращения.

Статьи рецензируются. Отклоненные материалы не возвращаются

## Оформление библиографических ссылок в романском алфавите (references)

1. Не использовать разделительные знаки: /; //; –.
2. Следовать правилам, позволяющим легко идентифицировать 2 основных элемента описаний – авторы и источники.
3. Не перегружать ссылки транслитерацией<sup>1</sup> заглавий статей либо давать их совместно с переводом.
4. Придерживаться единой системы транслитерации фамилий авторов, заглавий статей (если их включать) и названий источников (<http://translit.ru/>, выбрать **BGN**).
5. При ссылке на статьи из российских журналов, имеющих переводную версию, лучше давать ссылку на переводную версию статьи.

*Название источника*, независимо от того, журнал это, монография, сборник статей или название конференции, *выделяется курсивом*. Дополнительная информация – перевод на английский язык названия источника приводится в круглых скобках шрифтом, используемым для всех остальных составляющих описания.

Примеры описаний **статей из российских журналов** (фамилии авторов в транслитерации, название журнала в транслитерации курсивом, год, №, страницы. Название статьи опускается):

Dyachenko V. D., Krivokolysko S. G., Nesterov V. N. *Khim. Geterotsikl. Soedin.*, 1996, no. 9, p. 1243.

Polyanchikov Yu. N., Bannikov A. I. *Vestnik SibGAU*. 2007, no. 1 (23), p. 21–24.

**Статьи из электронных журналов** описываются аналогично печатным изданиям с дополнением данных об адресе доступа. Пример описания статьи из электронного журнала:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange, *Journal of Computer- Mediated Communication*, 1999, vol. 5, no. 2, available at: [www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/](http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/)

Наиболее точную идентификацию статей из электронных журналов можно получить, если указать уникальный идентификатор, который используют практически все ведущие зарубежные журналы для идентификации своих статей (Digital Object Identifier – DOI), в том числе и российские переводные журналы. Система DOI является международным ISO стандартом (<http://www.doi.org/>). Поэтому при наличии в статье DOI, в списке литературы желательно указывать ее идентификатор. Примеры описания статей из SCOPUS, имеющих DOI:

Yang S. Y., Ryu I., Kim H. Y., Kim J. K., Jang S. K., Russell T. P. Nanoporous membranes with ultrahigh selectivity and flux for the filtration of viruses (2006) *Advanced Materials*, 18 (6), p. 709–712. Cited 89 times. doi: 10.1002/adma.200501500.

Zhang Z., Zhu D. Experimental research on the localized electrochemical micromachining (2008) *Russian Journal of Electrochemistry*, 44 (8), p. 926–930. Cited 2 times. doi: 10.1134/S1023193508080077.

### Материалы конференций:

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Muhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing [Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma Coveye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi* (Proc. 6th Int. Technol. Symp. “New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact”). Moscow, 2007, p. 267–272.

Главное в описаниях конференций – название конференции на языке оригинала (в транслитерации, если нет ее английского названия), выделенное курсивом. В скобках дается перевод названия на английский язык. Необходимые данные (место проведения конференции, место издания, страницы) должны быть представлены на английском языке.

Возможен и такой сокращенный вариант:

Usmanov T. S., Gusmanov A. A., Mullagalin I. Z., Muhametshina R. Ju., Chervyakova A. N., Sveshnikov A. V. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma “ovey resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi”* (Proc. 6th Int. Technol. Symp. “New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact”). Moscow, 2007, p. 267–272.

---

<sup>1</sup> Транслитерация – перевод одной графической системы алфавита в другую (то есть передача букв одной письменности буквами другой). Пример Т.: немецкий Schiller – русский «Шиллер».

В переводных журналах ссылки на публикации в материалах конференций даются либо вообще без их заголовков, либо приводится только их перевод. Примеры ссылок на публикации в материалах конференций:

Antina E. V., Berezin M. B., Semeikin A. S., Dudina N. A., Yutanova S. L., and Guseva G. B. Abstracts of Papers, *XII Molodezhnaya konferentsiya po organicheskoi khimii* (XII Youth Conference on Organic Chemistry), Suzdal, 2009, p. 248.

Iznairov B. M. *Obespechenie ratsional'nykh geometricheskikh parametrov mnogozvennykh soedinenii i rezervirovanie ikh elementov* (Rational Geometric Parameters of Multicomponent Joints and Backup of Their Components), Saratov: SGTU, 2008.

Riabinina A. A., Berezina E.V. *Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* (Materials XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy conference Reshetnev reading), Krasnoyarsk, 2010, p. 100–115.

**Книги (монографии, сборники, материалы конференций в целом):**

*Belaya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur I nanokompozitov v Rossiiskoi Federatsii (po materialam Pervogo Vserossiiskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditelei v oblasti nanotekhnologii* (White Book in Nanotechnologies: Studies in the Field of Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites in the Russian Federation: Proceedings of the First All-Russian Conference of Scientists, Engineers and Manufacturers in the Field of Nanotechnology). Moscow, LKI, 2007.

Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'tvo SSSR* (Last government of the USSR). Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union (*Ot katastrofy k vrozozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR*). Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Kanevskaya R. D. *Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov* (Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development). Izhevsk, 2002. 140 p.

Latyshev, V.N., *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanie metallov* (Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting), Ivanovo: Ivanovskii Gos. Univ., 2009.

**Ссылка на интернет-ресурс:**

*APA Style* (2011), Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 5 February 2011).

*Pravila Tsitirovaniya Istochnikov* (Rules for the Citing of Sources) Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed 7 February 2011).

На сайте издательства Emerald даны достаточно подробные рекомендации по составлению пристатейных списков литературы по стандарту Harvard (Harvard reference system) практически для всех видов публикаций – <http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/harvard.htm?part=2>., а также программные средства для их формирования. Можно воспользоваться этими рекомендациями.