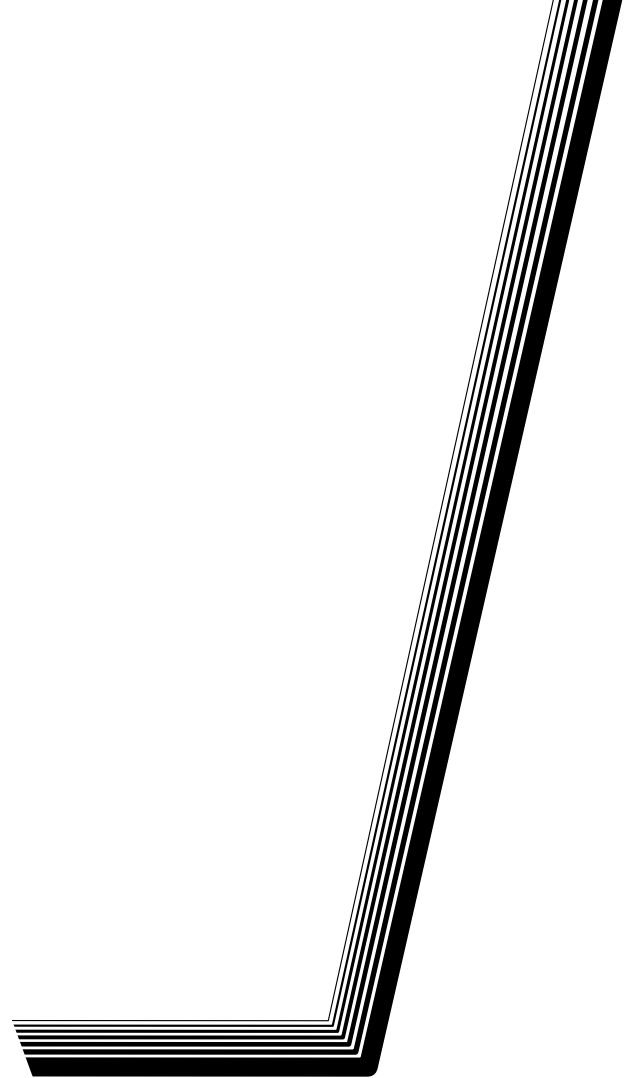


ВЕСТНИК



Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 1 (53)

Красноярск 2014

ВЕСТНИК

Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 1(53)

Главный редактор

Ковалев Игорь Владимирович,
доктор технических наук, профессор

Заместители главного редактора

Логинов Юрий Юрьевич, доктор

физико-математических наук, профессор

Сенашов Сергей Иванович, доктор физико-
математических наук, профессор

Мурыгин Александр Владимирович,

доктор технических наук, профессор

Ответственный секретарь

Зеленков Павел Викторович, кандидат технических
наук

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аплеснин С. С., доктор физико-математических наук,
профессор

Головенкин Е. Н., доктор технических наук, профессор

Ерыгин Ю. В., доктор экономических наук, профессор

Лаптенко В. Д., доктор технических наук, профессор

Ловчиков А. Н., доктор технических наук, профессор

Медведев А. В., доктор технических наук, профессор

Михеев А. Е., доктор технических наук, профессор

Москвичев В. В., доктор технических наук, профессор

Сафонов К. В., доктор физико-математических наук,
доцент

Смирнов Н. А., доктор технических наук, профессор

Сомов В. Г., доктор технических наук, доцент

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Васильев С. Н., академик РАН, доктор
физико-математических наук, профессор

Дегерменджи А. Г., академик РАН, доктор
физико-математических наук, профессор

Дегтерев А. С., доктор технических наук, профессор

Колмыков В. А., кандидат технических наук,
профессор

Краточвиллова И., доктор, доцент (Чехия)

Краус И., профессор (Чехия)

Лю Т., профессор (Китай)

Минкер В., доктор, профессор (Германия)

Миронов В. Л., член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

Младенов Г., член-корреспондент Болгарской академии
наук, доктор физических наук, профессор (Болгария)

Тестоедов Н. А., член-корреспондент РАН, доктор
технических наук, профессор

Ужуле К., доктор (Латвия)

Фошнер М., доктор, доцент (Словения)

Чжанг Ш., доктор (Китай)

Шабанов В. Ф., академик РАН, доктор
физико-математических наук, профессор

Шайдуров В. В., член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

Швиденко А., доктор инженерных наук, профессор
(Австрия)

Эйя Х., доктор инженерных наук, профессор (Норвегия)

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)

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)

Журнал включен в каталог:

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

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

Учредитель

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Редактор: О. А. ПЛЕХОВА

Редактор английского текста: С. Г. ЭФА

Оригинал-макет и верстка: О. В. Булатниковой

Подписано в печать 25.03.2014. Формат 70×108/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 29,6.

Уч.-изд. л. 38,6. Тираж 1000 экз. Заказ 87/196. С 32/14.

Редакционно-издательский отдел

Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.

660014, г. Красноярск,

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

Отпечатано в типографии ИП Михайловой И. Г.

660125, г. Красноярск, ул. Водопьянова, 6в-69

© Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2014

РАЗДЕЛ
1



МАТЕМАТИКА,
МЕХАНИКА,
ИНФОРМАТИКА



ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ РЕГРЕССИОННОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ОТ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕТОДИКИ ЕЁ СИНТЕЗА*

Д. В. Борисов¹, А. В. Лапко^{1,2}, В. А. Лапко^{1,2}

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: valapko@yandex.ru

²Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44. E-mail: lapko@icm.krasn.ru

Исследуются аппроксимационные свойства регрессионной оценки плотности вероятности. Синтез оценки основывается на декомпозиции исходных статистических данных и анализе вероятностных характеристик получаемых множеств случайных величин. Устанавливается зависимость свойств регрессионной оценки плотности вероятности от методов дискретизации интервала значений случайной величины. Из условия минимума асимптотического выражения среднеквадратического отклонения определена процедура оптимального выбора количества интервалов дискретизации. Полученная формула зависит от вида восстанавливаемой плотности вероятности и объёма априорных данных. Результаты исследований имеют важное значение при решении задач проверки гипотез о распределениях случайных величин и достоверного оценивания плотности вероятности.

Ключевые слова: плотность вероятности, регрессионная оценка, аппроксимационные свойства, методы дискретизации.

DEPENDENCE OF THE REGRESSION ESTIMATOR PROPERTIES OF A PROBABILITY DENSITY ON SINGULARITIES OF ITS SYNTHESIS TECHNIQUE

D. V. Borisov¹, A. V. Lapko^{1,2}, V. A. Lapko^{1,2}

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: valapko@yandex.ru

²Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: lapko@icm.krasn.ru

Approximating properties of the regression estimator of a probability density are investigated. Estimation synthesis is based on decomposition of initial statistical data and the analysis of probabilistic characteristics of received sets of random variables. Dependence of the regression estimator properties of a probability density on methods of digitization of an interval of values of a random variable is established. A deviation mean square procedure of an optimum choice of an amount of intervals of digitization is defined from a condition of a minimum of asymptotic expression. The received formula depends on an aspect of a restored probability density and volume of a priori data. Outcomes of researches are important to the solution of the problems of a hypothesis test about distributions of random variables and a confidential estimation of a probability density.

Keywords: probability density, regression estimator, approximating properties, digitization methods.

Непараметрические оценки плотности вероятности типа Розенблатта–Парзена широко используются при синтезе алгоритмов обработки информации и принятии решений в условиях априорной неопределённости [1–11]. Однако их вычислительная эффективность во многом определяется объёмом статистических данных и снижается по мере его увеличения.

В данных условиях целесообразно использовать принципы декомпозиции исходных статистических данных по их объёму и технологию параллельных вычислений. С этих позиций предложена и исследована смесь непараметрических оценок плотностей вероят-

ности для одномерных и многомерных случайных величин [4; 12; 13].

Перспективное направление решения проблем больших выборок связано с декомпозицией исходных статистических данных и последующим анализом вероятностных характеристик получаемых множеств случайных величин [14; 15].

Пусть имеется выборка $V = (x^i, i = \overline{1, n})$ из n независимых значений одномерной случайной величины x с неизвестной плотностью вероятности $p(x)$. Разобьём область определения $p(x)$ на N непересекающихся

* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ (СибГАУ № Б121/14).

интервалов длиной 2β и сформируем множества случайных величин $X^j, j = \overline{1, N}$. В качестве характеристик X^j примем частоту $\bar{P}^j$ попадания случайной величины x в j -й интервал и его центр z^j . На основе полученной информации определим массив данных $V_1 = (z^j, \bar{P}^j / (2\beta), j = \overline{1, N})$, составленный из центров z^j введенных интервалов и соответствующих им значений оценок плотности вероятности. Объём N полученных данных V_1 может быть значительно меньше объёма n исходной статистической информации V .

В качестве приближения по эмпирическим данным V_1 искомой плотности вероятности $p(x)$ примем статистику [15]

$$\bar{p}(x) = c^{-1} \sum_{j=1}^N \bar{P}^j \Phi\left(\frac{x - z^j}{c}\right), \quad (1)$$

в которой ядерные функции $\Phi(u)$ являются положительными, симметричными и нормированными [16]. Коэффициенты размытости c ядерных функций характеризуют область их определения.

В работе исследуется зависимость аппроксимационных свойств регрессионной оценки плотности вероятности (1) от известных методов дискретизации области изменения значений случайной величины.

Выбор оптимального количества интервалов дискретизации области значений случайной величины. В работе [17] исследованы свойства среднеквадратического отклонения

$$M \int_{-\infty}^{+\infty} (p(x) - \bar{p}(x))^2 dx$$

оценки $\bar{p}(x)$ (1) от восстанавливаемой плотности вероятности $p(x)$ при больших объёмах исходных статистических данных, где M – знак математического ожидания. При оптимальных значениях коэффициентов размытости получено его асимптотическое выражение

$$W_2(N) = \left(\frac{\left(\|\Phi(u)\|^2 \right)^4 \left\| p^{(2)}(x) \right\|^2}{2N^4} \right)^{\frac{1}{5}} \times \left(\frac{3}{2} \left(\Delta \|p(x)\|^2 \right)^{4/5} + \frac{N^2}{n \left(\Delta \|p(x)\|^2 \right)^{1/5}} \right), \quad (2)$$

где

$$\|\Phi(u)\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi^2(u) du, \quad \|p(x)\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} p^2(x) dx, \\ \|p^{(2)}(x)\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (p^{(2)}(x))^2 dx;$$

Δ – длина интервала изменения значений случайной величины.

Из условия минимума асимптотического выражения среднеквадратического отклонения $\bar{p}(x)$ от $p(x)$ получена процедура оптимального выбора количества интервалов дискретизации [17; 18]

$$\bar{N} = \sqrt{\Delta \|p(x)\|^2 n}, \quad (3)$$

которая определяется видом восстанавливаемой плотности вероятности, значением Δ и объёмом n исходных статистических данных. Полученная закономерность является объективной, так как не зависит от вида ядерных функций оценки плотности вероятности (1).

Исследование аппроксимационной регрессионной оценки плотности вероятности. Будем восстанавливать плотность вероятности случайной величины с нормальным законом распределения

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right).$$

Для выбора количества интервалов дискретизации области изменения значений случайной величины используется выражение (3), а также следующие формулы:

– Хайнкольда и Гаеде

$$N = \sqrt{n}; \quad (4)$$

– Брукса и Каррузера

$$N = 5 \lg n; \quad (5)$$

– Старджесса

$$N = \log_2 n + 1. \quad (6)$$

Синтез непараметрической оценки плотности вероятности (1) осуществлялся на основе ядерных функций В. А. Епанечникова [16]

$$\Phi(u) = \begin{cases} \frac{3}{4\sqrt{5}} - \frac{3u^2}{20\sqrt{5}} & \forall |u| < \sqrt{5}, \\ 0 & \forall |u| \geq \sqrt{5}. \end{cases}$$

В данных условиях выражение (2) запишется в виде

$$\bar{W}_2 = \frac{3}{10} \left(\frac{2}{15N^4} \right)^{\frac{1}{5}} \left(\frac{9}{2\sqrt{\pi}} + \frac{N^2}{n} \right).$$

При увеличении объёма n исходных статистических данных применение исследуемых методов дискретизации интервала изменения значений случайной величины приводит к уменьшению значений $\bar{W}_2$ (см. рисунок). Наблюдаемое улучшение аппроксимационных свойств $\bar{p}(x)$ объясняется увеличением объёма N массива данных V_1 , используемого при построении регрессионной оценки плотности вероятности (см. таблицу). Данный факт согласуется с условиями её асимптотической сходимости [15].

Зависимость количества интервалов N от значений n и используемых формул дискретизации

n	Формулы дискретизации			
	(3)	(4)	(5)	(6)
50	9	7	8	7
100	13	10	10	8
150	16	12	11	8
200	18	14	12	9
250	21	16	12	9
300	23	17	12	9

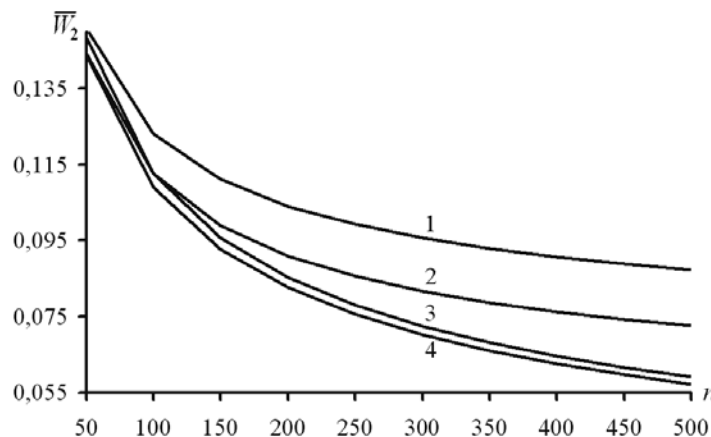
Окончание таблицы

n	Формулы дискретизации			
	(3)	(4)	(5)	(6)
350	24	19	13	9
400	26	20	13	10
450	28	21	13	10
500	29	22	13	10

Применение формулы (3) при выборе количества N интервалов дискретизации является более предпочтительным по сравнению с другими, так как она получена на основе минимизации асимптотического выражения среднеквадратического отклонения (2).

Зависимости $\bar{W}_2$ от объема n исходных данных при использовании формул (3), (4) являются близкими. Им свойственны сопоставимые значения количества N интервалов дискретизации области изменения случайной величины (см. таблицу). При малых $n < 100$ количество N интервалов дискретизации, которые определяются формулами (3)–(6), и соответствующие им значения $\bar{W}_2$ отличаются незначительно.

При восстановлении плотности вероятности с нормальным законом распределения целесообразно использовать формулы (3), (4). Менее предпочтительными являются формулы (5), (6). Полученные выводы согласуются с результатами исследований асимптотических свойств регрессионной оценки плотности вероятности.



Зависимость среднеквадратического отклонения $\bar{W}_2(N)$

от объема n значений случайной величины с нормальным законом распределения: кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют значениям N , вычисленным по формулам (3)–(6)

Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А. Гибридные модели стохастических зависимостей // Автометрия. 2002. № 5. С. 38–48.
2. Лапко В. А., Капустин А. Н. Синтез нелинейных непараметрических коллективов решающих правил в задачах распознавания образов // Автометрия. 2006. Т. 42, № 6. С. 26–33.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ непараметрических алгоритмов распознавания образов в условиях пропуска данных // Автометрия. 2008. Т. 44, № 3. С. 65–74.
4. Лапко А. В., Лапко В. А., Егорочкин И. А. Непараметрические оценки смеси плотностей вероятности и их применение в задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 1 (35). С. 60–64.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Коллектив непараметрических решающих функций в двувальтернативной задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 3.1 (37). С. 156–160.

6. Лапко А. В., Лапко В. А. Разработка и исследование двухуровневых непараметрических систем классификации // Автометрия. 2010. Т. 46, № 1. С. 70–78.
7. Лапко А. В., Лапко В. А. Асимптотические свойства многомерной непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности в двувальтернативной задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 1 (39). С. 16–19.
8. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрическая оценка уравнения разделяющей поверхности в условиях больших выборок и её свойства // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 1.2 (39). С. 300–304.
9. Лапко А. В., Лапко В. А. Применение непараметрического алгоритма распознавания образов в задаче проверки гипотезы о распределениях случайных величин // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 3 (41). С. 8–11.
10. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы распознавания образов в задаче проверки статистической гипотезы о тождественности двух законов распределения случайных величин // Автометрия. 2010. Т. 46, № 6. С. 47–53.

11. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры семейства непараметрических решающих функций в задаче распознавания образов // *Автометрия*. 2011. Т. 47, № 4. С. 76–82.
12. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры смеси непараметрических оценок плотности вероятности многомерной случайной величины // *Системы управления и информационные технологии*. 2011. № 1 (43). С. 12–15.
13. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ свойств непараметрических оценок смеси плотностей вероятности при различных условиях распределения статистических данных // *Информатика и системы управления*. 2013. № 1 (35). С. 119–126.
14. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические методики анализа множеств случайных величин // *Автометрия*. 2003. Т. 39, № 1. С. 54–61.
15. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка плотности вероятности и ее свойства // *Системы управления и информационные технологии*. 2012. № 3 (49). С. 152–156.
16. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // *Теория вероятности и ее применения*. 1969. Т. 14. Вып. 1. С. 156–161.
17. Лапко А. В., Лапко В. А. Оптимальный выбор количества интервалов дискретизации области изменения одномерной случайной величины при оценивании плотности вероятности // *Измерительная техника*. 2013. № 7. С. 24–27.
18. Lapko A. V., Lapko V. A. Optimal selection of the number of sampling intervals in domain of variation of a one-dimensional random variable in estimation of the probability density // *Measurement Techniques*. 2013. Vol. 56, no. 7. P. 24–27 (DOI: 10.1007/s11018-013-0279-x).

References

1. Lapko A. V., Lapko V. A. *Avtometriya*. 2002, no. 5, p. 38–48.

2. Lapko V. A., Kapustin A. N. *Avtometriya*. 2006, vol. 42, no. 6, p. 26–33.
3. Lapko A. V., Lapko V. A. *Avtometriya*. 2008, vol. 44, no. 3, p. 65–74.
4. Lapko A. V., Lapko V. A., Egorochkin I. A. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*. 2009, no. 1 (35), p. 60–64.
5. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*. 2009, no. 3.1 (37), p. 156–160.
6. Lapko A. V., Lapko V. A. *Avtometriya*. 2010, vol. 46, no. 1, p. 70–78.
7. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*. 2010, no. 1 (39), p. 16–19.
8. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*. 2010, no. 1.2 (39), p. 300–304.
9. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*. 2010, no. 3 (41), p. 8–11.
10. Lapko A. V., Lapko V. A. *Avtometriya*. 2010, vol. 46, no. 6, p. 47–53.
11. Lapko A. V., Lapko V. A. *Avtometriya*. 2011, vol. 47, no. 4, p. 76–82.
12. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*. 2011, no. 1 (43), p. 12–15.
13. Lapko A. V., Lapko V. A. *Informatika i sistemy upravleniya*. 2013, no. 1 (35), p. 119–126.
14. Lapko A. V., Lapko V. A. *Avtometriya*. 2003, vol. 39, no. 1, p. 54–61.
15. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*. 2012, no. 3 (49), p. 152–156.
16. Epanechnikov V. A. *Teoriya veroyatnosti i ee primeneniya*. 1969, vol. 14, no. 1, p. 156–161.
17. Lapko A. V., Lapko V. A. *Izmeritel'naja tehnika*. 2013, no. 7, p. 24–27.
18. Lapko A. V., Lapko V. A. Optimal selection of the number of sampling intervals in domain of variation of a one-dimensional random variable in estimation of the probability density (2013) *Measurement Techniques*, 56 (7), p. 24–27. doi: 10.1007/s11018-013-0279-x.

© Борисов Д. В., Лапко А. В., Лапко В. А., 2014

УДК 004.93

INFORMATIVE ATTRIBUTE SELECTION WITH HYBRID SELF-ADJUSTED EVOLUTIONARY OPTIMIZATION ALGORITHM*

S. S. Volkova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarskiy Rabochiy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: Svetlana.volkova.mail@yandex.ru

An informative attribute selection problem is considered. The problem is solved with the hybrid self-adjusted evolutionary algorithm. The algorithm is used as an optimization method of bandwidth parameters in kernel regression. The algorithm is experimented on the test function with various dimensions. Reliability depends on the dimension function which is also presented. The results of the hybrid self-adjusted algorithm are presented too.

Keywords: *informative attribute selection, kernel regression, genetic algorithm, hybrid self-adjusted genetic algorithm.*

* The study was supported by The Ministry of education and science of Russian Federation, project № 14.B37.21.1521. The second International Workshop on Mathematical Models and its Applications (IWMMA 2013).

ОТБОР ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ С ПОМОЩЬЮ ГИБРИДНОГО САМОНАСТРАИВАЮЩЕГОСЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ

С. С. Волкова

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

Рассматривается задача отбора информативных признаков. Задача решается с помощью гибридного самонастраивающегося эволюционного алгоритма, используемого в качестве метода оптимизации для определения оптимальных значений параметров размытия непараметрической оценки регрессии. Представлены исследования эффективности применения рассматриваемого алгоритма на тестовых задачах различной размерности. Показаны полученные зависимости эффективности применения рассматриваемого метода от размерности задач. Продемонстрирована эффективность предлагаемого подхода к самонастройке эволюционных алгоритмов.

Ключевые слова: отбор информативных признаков, непараметрическая оценка регрессии, генетический алгоритм, гибридный самонастраивающийся генетический алгоритм.

1. Introduction

Processes in technical and organization systems are described with many attributes. But using of non-informative attributes in model is negative for research. And so processing with real data should start with selection of informative attributes.

The informative attribute selection problem is well-known. There are many classical methods for solving this problem (Factor analysis methods, Principal component analysis) [1]. But these methods usually have limitations in practice, i. e. principal component analysis can be not appropriate for processes with strong nonlinear relations among variables. And now new methods are investigated.

Informative attribute selection problem is solved by regression models in this paper. They base on Nadaraya-Watson nonparametric estimation (kernel regression) [2]. This estimation has advantages: the method does not need to search a structure of a mathematical model of the process and it can be applied for processes with nonlinear relations among variables.

Nonparametric regression estimation (Nadaraya-Watson kernel regression) depends on parameter "bandwidth" (see section 2). And so successful at using of kernel regression comes to optimization problem. If kernel regression is used for multivariable function, it is necessary to select bandwidth for each variable. Using of classical optimization methods is difficult. This problem has non-analytical form and high dimension. One of the possible methods for this optimization problem may be evolutionary algorithm [3]. In paper it is proposed to use genetic algorithm. In this case individuals are binary code representation of the vector of bandwidth parameters at nonparametric regression estimation. Fitness function is average error of the nonparametric regression estimation for test sample.

Idea of informative attribute selection bases on one of the properties of non-parametric evaluation. Bandwidths of non-informative attributes trend to high values (see section 2). And so high optimal (suboptimal) value of

bandwidth means low information content of the relevant attribute.

It is necessary to notice that genetic algorithm has disadvantage because reliability of genetic algorithm greatly depends on algorithm settings. And experienced researcher need to spend a lot of time to select effective settings, so it is necessary to use self-adjusted algorithm. In paper it is proposed to use hybrid self-adjusted genetic algorithm.

This work is outlined as follows: Information about kernel regression is presented in section 2. Information about genetic algorithm and algorithm setting is introduced in section 3. Experiments are described in section 4; results of algorithm running are discussed in section 4 too.

2. Kernel regression

Let's us consider Nadaraya-Watson kernel regression. The kernel regression is a non-parametric technique in statistics to estimate the conditional expectation of a random variable.

Let $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ be a vector of variable values, y be a regression value, N be a training sample size. Non-parametric regression estimation for variable vector $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ looks like (1):

$$\hat{y}(\bar{x}^*) = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_j^i - x_j^*}{c_j}\right)}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{x_j^i - x_j^*}{c_j}\right)}, \quad (1)$$

here c_j is bandwidth parameter, $\Phi(\dots)$ is kernel function (weighting function). Quality of regression estimation does not depend on selection of kernel function significantly. This choice is determined by requirements of estimation differentiability. Triangular is one of the common types of kernel functions:

$$\Phi(t) = \begin{cases} 1 - |t|, & \text{if } |t| < 1, \\ 0, & \text{else.} \end{cases}$$

Quality criterion is used for assessment regression estimation. In paper quality criterion is mean-square error (2):

$$W = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} (\hat{y}_i - y_i)^2, \quad (2)$$

here N_t is an exam sample, y_i is regression value (from exam sample), $\hat{y}_i$ is estimation of regression value (calculated by kernel regression).

Problem of non-parametric regression estimation construction comes to selection of the best values of bandwidth parameters c_j , i. e. to minimize quality criterion W with bandwidth parameters c_j .

It is necessary to notice optimal bandwidth parameter c_j is increasing for non-informative attributes [4]. If c_j trends to infinity ($c_j \rightarrow \infty$), argument of kernel function $\Phi(x_j)$ trends to zero, and $\Phi(0) = 1$. In this situation kernel regression (1) does not depend on variable value x_j .

3. Hybrid self-adjusted genetic algorithm for optimization of bandwidth parameter

Optimization of the bandwidth parameters is complicated problem because the problem has non-analytical form and dimension can be high. So an appropriate tool for such problem solving can be genetic algorithm.

Genetic algorithm is a stochastic optimization method of direct search. And so this algorithm is wide applicability. And genetic algorithm can process with complex discontinuous implicitly defined function. This optimization method copies evolution processes and uses idea of collective learning. Population is a set of individuals. Each individual is point of search space and takes part in collective learning. Individual has fitness calculated with value of criterion function (quality criterion). Genetic algorithm has stages such as generation formation, selection, crossover, and mutation. Individuals compete with other individuals in the population for transmission of its genetic information to the next population (selection stage). Selected individuals are parents for creating new offspring-individuals (crossover stage). In our case individuals are binary code representation of the vector of bandwidth parameters at nonparametric regression estimation. Fitness function is average error of the nonparametric regression estimation for train sample.

There are various selection types (proportional, rank, tournament), various crossover types (two-point, one-point, uniform), and various mutation types (week, average, strong). It means there are many combinations of algorithm settings.

Genetic algorithm greatly depends on algorithm settings. There are no universal settings because genetic algorithm realizes two strategies. First strategy is exploration. Aim is search of new solution areas. It is the most valid on initial stages of search. Second strategy is execution. It needed for improving of existing decision. It is the most valid on final stages of optimization algorithm. In genetic algorithm mutation realizes

exploration strategy, crossover realizes execution strategy. Also the most effective algorithm settings depend on function topology. And so it is necessary to implement algorithm with self-adjusted settings during optimization process.

Self-adjusted method is based on hybrid self-adjusted evolutionary Gomez algorithm. This algorithm combines genetic algorithm and evolutionary strategies [5]. So it names hybrid method. The idea of the algorithm is as follows: every individual has personal probability of using each type of genetic operators. The algorithm randomly selects combination of settings (proportional selection) and runs with each individual in population with personal settings. In the end of generation the offspring is compared with its parent. If fitness function value of the offspring is better than fitness function value of the parent, then probability of selected operator types are increased. Otherwise probabilities of selected operator types are decreased. Probability of using selected operator is evaluated with (3):

$$\begin{aligned} p_k &= (1 + \delta) \cdot p_k, k = 1, 2, 3, \\ &\text{if } (fitness(offspring) \geq fitness(ind_i)); \\ p_k &= (1 - \delta) \cdot p_k, k = 1, 2, 3, \\ &\text{if } (fitness(offspring) < fitness(ind_i)), \end{aligned} \quad (3)$$

here k is sequence number of operator (selection, crossover, mutation); p_k is probability of using selected type operator; δ is a training parameter that is generated with equally probable distribution on interval $[0, 1]$; *offspring* is new individual *ind_i* is parent-individual;

fitness(ind) is fitness function value of individual *ind*.

After that probabilities of all types of all genetic operators are normalized. It is necessary to notice in first population the probability of using various genetic operators is the same.

So we use hybrid self-adjusted evolutionary optimization algorithm for bandwidth parameters optimization at nonparametric estimation regression.

4. Experiments and Result

Linear combinations of input attributes are taken as test functions for our method:

- 1) $y(\bar{x}) = 0,01 \cdot x_1 + 7 \cdot x_2 + 5 \cdot x_3$;
- 2) $y(\bar{x}) = 0,01 \cdot x_1 + 7 \cdot x_2 + 5 \cdot x_3 + 12 \cdot x_4 + 8 \cdot x_5$;
- 3) $y(\bar{x}) = 0,01 \cdot x_1 + 7 \cdot x_2 + 5 \cdot x_3 +$
 $+ 12 \cdot x_4 + 8 \cdot x_5 + 15 \cdot x_6 + 3 \cdot x_7$;
- 4) $y(\bar{x}) = 0,01 \cdot x_1 + 7 \cdot x_2 + 5 \cdot x_3 + 12 \cdot x_4 +$
 $+ 8 \cdot x_5 + 15 \cdot x_6 + 3 \cdot x_7 + 9 \cdot x_8 + 13,5 \cdot x_9$;

Functions with various dimensions are examined. And all functions have non-informative attribute (with low weight coefficient). The aim of research is to identify non-informative attributes.

Training sample (100 points) is generated randomly from the interval $[0, 3]$ with equally probable distribution for each attributes. Test sample (100 points) is generated randomly too for the same interval. Algorithm is tested without noise and with noise (10 %). We use centered noise with mean equals zero and we add it randomly with

with equally probable distribution. Algorithm has 50 individuals for 50 generations. We tested each setting of the genetic algorithm for each problem for 100 times. After that we calculated reliability of the algorithm. It means percentage of the successful runs of the algorithms. Successful run means that algorithm found the least important variable with the highest value of the bandwidth parameter. We have got values of reliability for 10 times for statistical significance of our numerical experiments and corresponding conclusions.

Experiments were conducted at the same algorithm resource on function with various dimensions because it is necessary to estimate effectiveness of self-adjusted genetic algorithm in the same conditions and fall of algorithm reliability with increasing dimensions.

Implemented genetic algorithm runs 20 times for each combination of settings. After that bandwidth parameters are averaged for each attributes. In each runs the algorithm finds non-informative attributes, mean-square error of kernel regression with all attributes and without each attribute is calculated. Obtained statistical data is processed; results are presented in tables and graphs.

Previously numerical research was investigated with all combinations of algorithm settings. Genetic algorithms with different settings have various reliabilities on test functions [6]. Results were averaged like expectation value, if researcher does not know the best algorithm settings. The most effective algorithm settings were found with exhaustive search, and result on these settings was saved. Fig. 1 and 2 display averaged results and result on the best settings and with self-adjusted result.

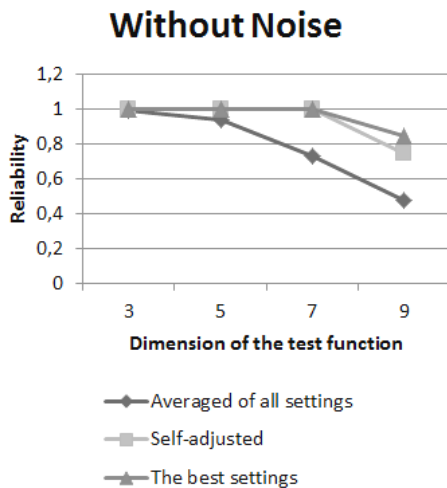


Fig. 1. Algorithm reliability dependence of test function dimension without noise

Obviously reliability of hybrid self-adjusted genetic algorithm above averaged results and little below result on the best settings. And so if researcher does not know the most effective algorithm settings, he should use self-adjusted algorithm. Hybrid self-adjusted genetic algorithm does not increase running time compared with the standard algorithm because much time is required to calculate the fitness function and these algorithms have the same number of fitness function calculations on the generation.

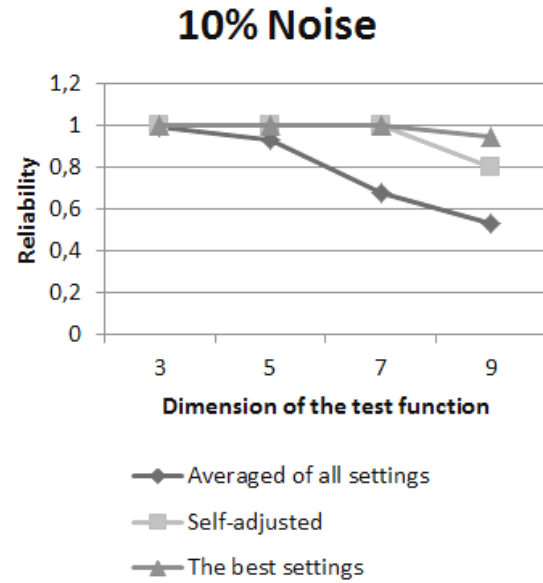


Fig. 2. Algorithm reliability dependence of test function dimension with 10 % noise on training sample

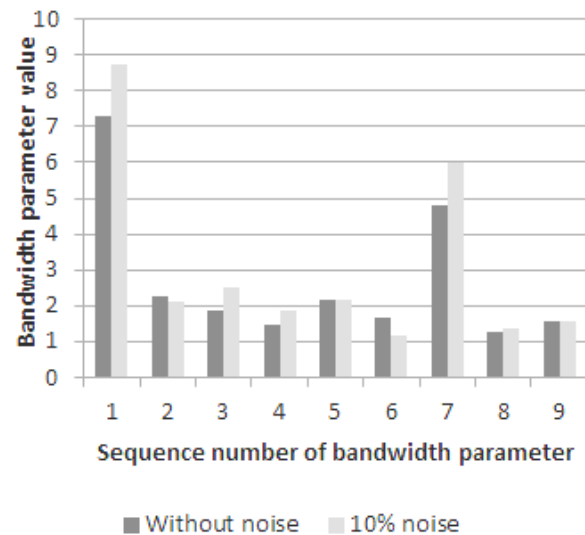


Fig. 3. Bandwidth parameter values for test function 4

You should pay attention to research result like result of informative attribute selection problem with kernel regression [6]. Fig. 3 and table present results of genetic algorithm on test function 4. Fig. 3 shows the values of bandwidth parameters. It is necessary to notice bandwidth parameter values are increased with reducing of weight of corresponding attribute in criterion function value. That is to say if you make decreasing sequence of bandwidth value, attributes is located mainly in order of increasing attribute weight. Only mean-square error of kernel regression without non-informative attribute may compare with mean-square error with all attributes (see table).

Fig. 3 and table show the final results for the different features with the conclusion that features 1 and 7 are the least important ones.

**Mean-square error of kernel regression
on test function 4**

	Without noise	10 % noise
Mean-square error without attribute 1	96,7	128,38
Mean-square error without attribute 2	136,43	148,63
Mean-square error without attribute 3	107,71	144,03
Mean-square error without attribute 4	185,31	221,83
Mean-square error without attribute 5	128,82	152,7
Mean-square error without attribute 6	261,45	261,23
Mean-square error without attribute 7	98,91	129,77
Mean-square error without attribute 8	144,75	179,09
Mean-square error without attribute 9	190,72	228,52
Mean-square error with all attributes	98,07	127,98

In addition we tested parallel version of our method for multiprocessor based on the parallelization of the genetic algorithm (fitness function calculation). We used multiprocessor with 2, 4, and 6 cores. And we got following values of the computing speed-up coefficients:

- 1) Configuration with 2 cores: 1,81–1,85;
- 2) Configuration with 4 cores: 3,20–3,76;
- 3) Configuration with 6 cores: 3,63–4,14.

So we can conclude that our method is appropriate for parallelization and using for multiprocessors.

5. Conclusions

So hybrid self-adjusted evolutionary algorithm is implemented for informative attribute selection. Reliability of its algorithm was experimented.

Genetic algorithm effectively solves optimization problem with bandwidth parameters in kernel regression.

Hybrid self-adjusted algorithm solves problem of algorithm setting.

So hybrid self-adjusted genetic algorithm solves informative attribute selection problem on test functions effectively. Also this algorithm gives some data for analysis of information content of the attributes. The method is appropriate for parallelization.

References

1. Aivazyan, S. A. [et al.] Applied statistics. Classification and reduction of dimensionality. Moscow, Finansy i statistika, 1989, 607 p.
2. Medvedev A. V. Non-parametrical systems of adaptation. Novosibirsk, Nauka, 1983. 174 p.
3. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
4. Hall P., Li Q. and J. S. Racine, «Nonparametric Estimation of Regression Functions in the Presence of Irrelevant Regressors. *Review of Economics and Statistics*. 2007. 89. P. 784–789.
5. Gomez J. Self-adaptation of operator rates in evolutionary algorithms. *Proc. of Genetic and Evolutionary Computation Conference*. 2004. P. 1162–1173.
6. Volkova S., Sergienko R. B. Informative attributes selection in non-parametric regression estimation by making use of genetic algorithms. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vichislitel'naya tekhnika i informatica*. 2013. № 1 (22). P. 40–48.

© Волкова С. С., 2014

УДК 004.6

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГЕРТ-СЕТЕЙ
ДЛЯ АНАЛИЗА МУЛЬТИВЕРСИОННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Д. И. Ковалев, М. В. Сарамуд, М. В. Карасева, Ю. А. Нургалеева

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: saramud@bk.ru

В настоящее время практически все большие программные системы являются распределенными. Анализ мультиверсионного программного обеспечения (ПО) можно проводить, основываясь на распределенных системах обработки информации. На примере ГЕРТ-сети, моделирующей поведение системы Condor при расчете задачи с фиксированной продолжительностью в режимах без резервного копирования и миграции (режим Vanilla), показаны эквивалентные преобразования, позволяющие существенно упростить сеть и облегчить поиск петель. Приведены расчеты, позволяющие получить вероятностные характеристики приведенной сети. Описываются различные режимы работы системы Condor, преимущества распределенных гетерогенных систем обработки информации.

Ключевые слова: мультиверсионное программное обеспечение, ГЕРТ-сети, вероятностные характеристики.

DEVELOPMENT OF THE EQUIVALENT TRANSFORMATION OF GERT-NETWORKS METHODS FOR MULTIVERSION SOFTWARE ANALYSIS

D. I. Kovalev, M. V. Saramud, M. V. Karaseva, Yu. A. Nurgaleeva

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: saramud@bk.ru

Nowadays approximately all software is distributed. Analysis of multiversinal software can be done on the basis of distributed systems of data processing. This paper shows on GERT-network example that the equivalent transformations allow to simplify considerably the network and facilitate the search loops. GERT-networks simulate the behavior of Condor while the fixed-length modes computation without backup and migration (mode "Vanilla"). Calculations which allow to obtain probabilistic characteristics of the given network are given. The various modes of the operation Condor, the advantages of distributed heterogeneous information processing systems are described.

Keywords: multiversion software, GERT-network, probabilistic characteristics.

Как уже не раз отмечалось, мультиверсионное программное обеспечения (ПО) обладает рядом особенностей, которые и позволяют классифицировать различное ПО по принципу, является ли оно мультиверсионным. Одной из особенностей является то, что область применения мультиверсионного программного обеспечения остается достаточно узкой в связи с тем, что повышение надежности при таком подходе идет за счет программной и ресурсной избыточности [1]. Вследствие этого большая часть таких программ используется для управления объектами, для которых надежность является ключевой характеристикой (например, космическая промышленность). Это обстоятельство, в свою очередь, затрудняет получение реальных технических характеристик таких систем [2]. С другой стороны, анализ мультиверсионного ПО можно проводить, основываясь на распределенных системах обработки информации. Ведутся исследования в этом направлении [3].

В настоящее время практически все большие программные системы являются распределенными. Распределенной называется такая система, в которой обработка информации сосредоточена не на одной вычислительной машине, а распределена между несколькими компьютерами. Зачастую, в таких системах компьютер пользователя управляется одной операционной системой (ОС), компьютер по сбору заявок на обработку запросов – второй, а компьютеры – узлы системы могут управляться третьей ОС, отличной от первых двух. В таком случае эти системы называются распределенными гетерогенными системами обработки информации.

Подобные системы могут быть построены при помощи готовых библиотек. Для примера возьмем проект Condor (<http://www.cs.wisc.edu/condor>). Condor позволяет использовать в составе единого кластера узлы, не только различающиеся в аппаратной части, но и работающие под разными операционными системами, что дает возможность использовать для вычислений существующую компьютерную технику и уже имеющиеся коммуникации, тем самым существенно удешевляя стоимость создания кластера [4].

Condor имеет несколько режимов запуска вычислительных задач: Standard, Vanilla, PVM, MPI, Globus, Java. Режимы PVM, MPI, Globus и Java – это поддержка совместимости для программ, написанных с использованием данных библиотек, поэтому мы не будем их рассматривать. Наиболее интересными с точки зрения мультиверсионного подхода являются режимы Standard (с резервным копированием) и Vanilla (без резервного копирования) [5].

В режиме Standard Condor делает контрольные точки с заданным интервалом. Контрольная точка – это «снимок» текущего состояния задачи. Если необходима миграция задачи (например, пользователь начал использование компьютера), то Condor создает образ контрольной точки, перемещает его на другую машину и возобновляет вычисления с места, где он остановился. Если вычисляющий узел завершил работу аварийно или нарушилась связь с узлом, то Condor размещает на другом узле последний сохраненный образ контрольной точки задачи и возобновляет вычисления. Таким образом, задача может непрерывно вычисляться в течение длительного периода времени. Данный режим соответствует режиму выполнения задачи с периодическим выполнением резервного копирования ее состояния.

Режим Vanilla позволяет запускать произвольное консольное приложение, но не позволяет осуществить миграцию и резервное копирование задачи.

Ниже представлены функциональные схемы ГЕРТ-сети, моделирующие поведение системы Condor при расчете задачи с фиксированной продолжительностью в режимах без резервного копирования и миграции (рис. 1).

ГЕРТ-сеть, изображенная на рис. 2, состоит из узлов, соответствующих началу и завершению каждой отдельной работы, и дуг, представляющих действительное время выполнения каждой работы. Перед тем как перейти к поиску петель данной сети, произведем некоторые преобразования, которые существенно упростят сеть [6]. Соответствующие замены показаны на рис. 3–5.

Таким образом, удалось получить эквивалентную сеть, показанную на рис. 6, для которой существенно упростился поиск петель.



Рис. 1. Функциональная схема работы системы Condor в режиме Vanilla



Рис. 2. ГЕРТ-сеть, описывающая работу системы Condor в режиме Vanilla

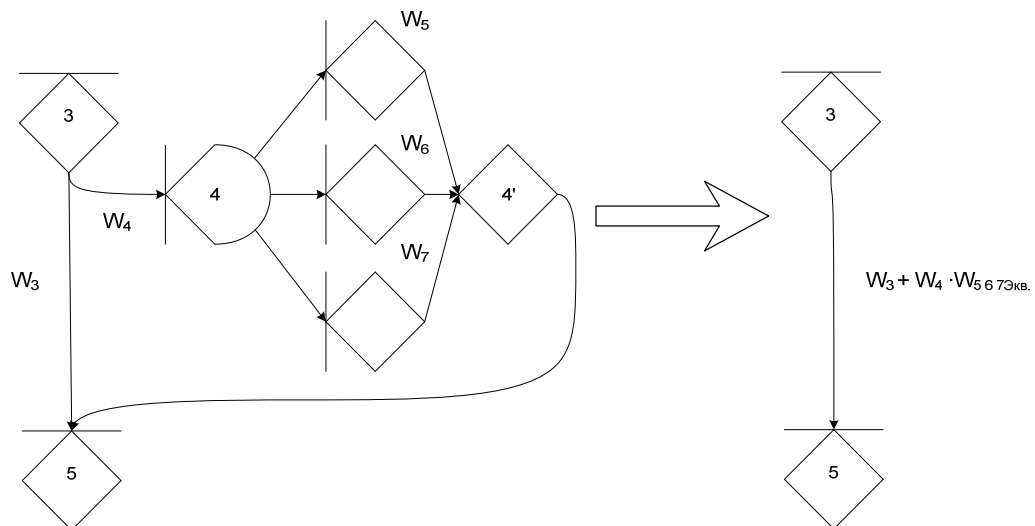


Рис. 3. Применение эквивалентных преобразований для узлов 3 и 5

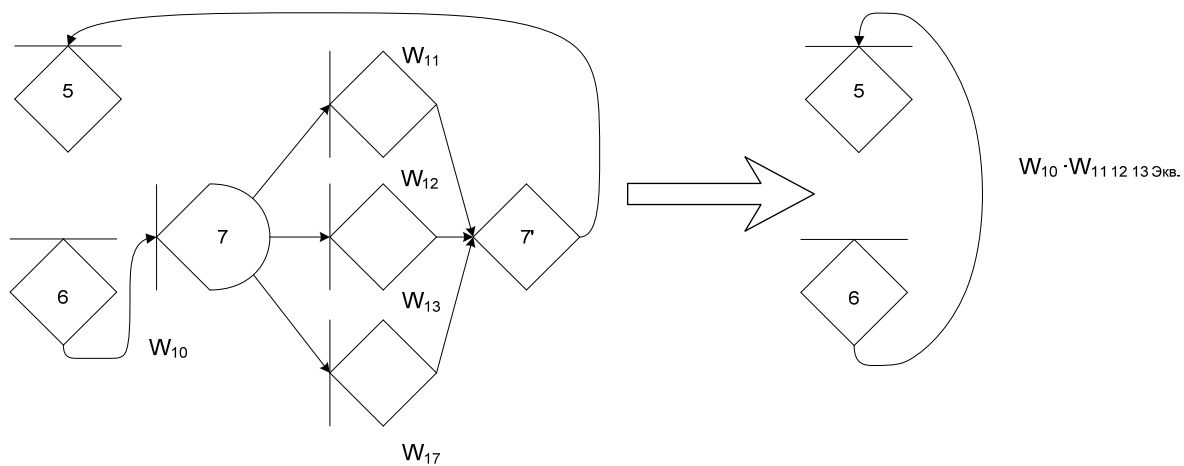


Рис. 4. Применение эквивалентных преобразований для узлов 5 и 6

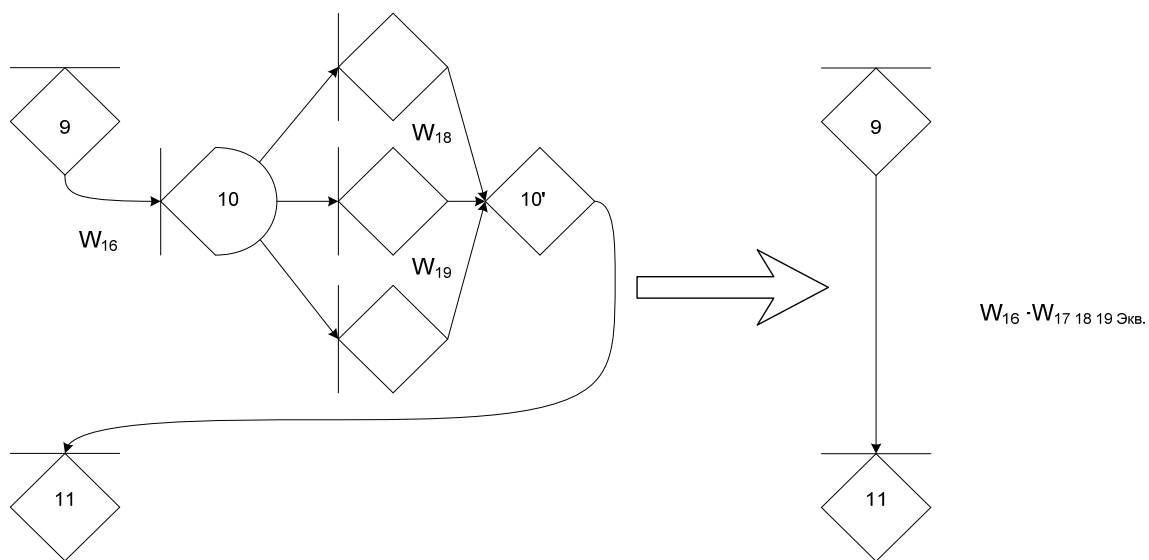


Рис. 5. Применение эквивалентных преобразований для узлов 9 и 11

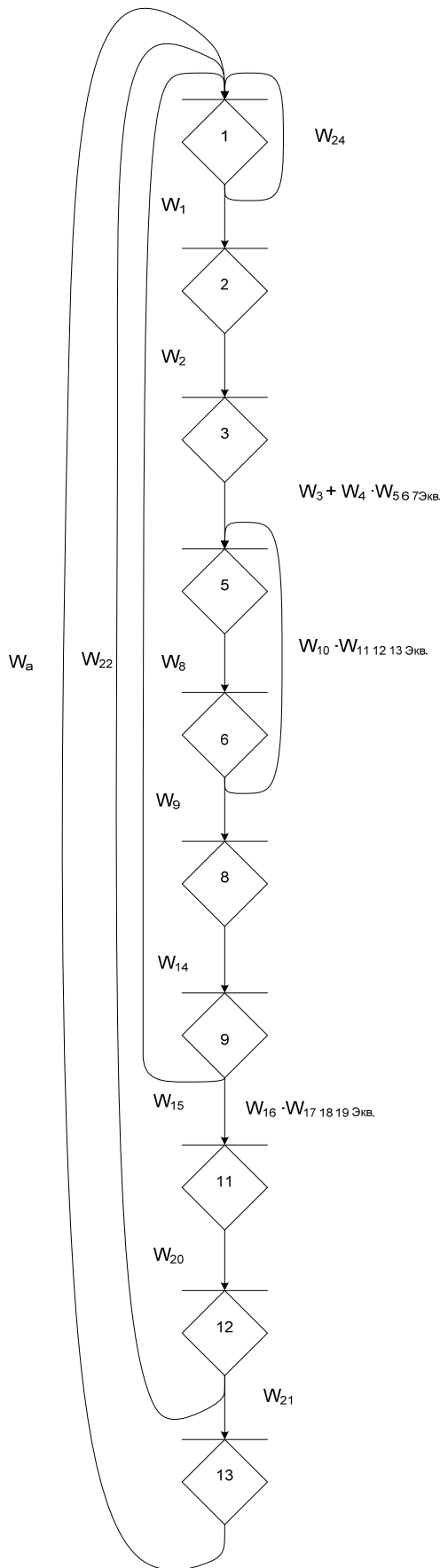


Рис. 6. Эквивалентная ГЕРТ-сеть, описывающая работу системы Condor в режиме Vanilla

По сети (рис. 6) определим соответствующие эквивалентные коэффициенты пропускания петель первого и второго порядка.

Петли первого порядка: $W_{24} \cdot W_8 \cdot W_{10} \cdot W_{11,12,13 \text{ экв.}}$,

$$W_1 \cdot W_2 \cdot W_8 \cdot W_9 \cdot W_{14} \cdot W_{15} (W_3 + W_4 \cdot W_{5,6,7 \text{ экв.}}),$$

$$W_1 \cdot W_2 \cdot W_8 \cdot W_9 \cdot W_{14} \cdot W_{16} \cdot W_{17,18,19 \text{ экв.}} \cdot W_{20} \cdot W_{21} \text{ и}$$

$$W_1 \cdot W_2 \cdot W_8 \cdot W_9 \cdot W_{14} \cdot W_{16} \cdot W_{17,18,19 \text{ экв.}} \cdot W_{20} \cdot W_{21} \cdot \left(\frac{1}{W_E} \right).$$

Петли второго порядка: $W_8 \cdot W_{10} \cdot W_{11,12,13 \text{ экв.}} \cdot W_{24}$

Используя топологическое уравнение, получаем следующую эквивалентную W -функцию для ГЕРТ-сети, которая описывает работу системы без резервного копирования:

$$W_E(t) = \frac{W_1 W_2 W_8 W_9 W_{14} W_{16} W_{17,18,19 \text{ экв.}} W_{20} W_{21}}{1 - W_{24} - W_8 W_{10} W_{11,12,13 \text{ экв.}}} - \frac{W_1 W_2 W_8 W_9 W_{14} W_{16} W_{17,18,19 \text{ экв.}} W_{20} W_{21}}{W_1 W_2 W_8 W_9 W_{14} W_{15} (W_3 + W_4 W_{5,6,7 \text{ экв.}})} - \frac{W_1 W_2 W_8 W_9 W_{14} W_{16} W_{17,18,19 \text{ экв.}} W_{20} W_{21}}{W_1 W_2 W_8 W_9 W_{14} W_{16} W_{17,18,19 \text{ экв.}} W_{20} W_{22}} + \frac{W_1 W_2 W_8 W_9 W_{14} W_{16} W_{17,18,19 \text{ экв.}} W_{20} W_{21}}{W_8 W_{10} W_{11,12,13 \text{ экв.}} W_{24}}.$$

Используя полученные функции можно получить математическое ожидание и дисперсию.

Методы эквивалентного преобразования ГЕРТ-сетей позволяют упростить поиск петель и расчеты характеристик сети.

Библиографические ссылки

1. Ковалёв П. В., Лайков А. Н., Гриценко С. Н. Определение надежности мультиверсионного программного обеспечения с использованием методов анализа сетей // Вестник СибГАУ : в 2 ч. Ч. 2. 2009. № 1 (22). С. 55–60.
2. Ковалёв П. В. ГЕРТ-сетевой анализ мультиверсионных архитектур программного обеспечения // Успехи современного естествознания. 2009. № 9. С. 161–164.
3. Доррер М. Г., Зырянов А. А. Прогноз динамики событийных моделей бизнес-процессов на основе ГЕРТ-сетей // Информация и связь. 2012. № 7. С. 124–127.
4. Ковалев И. В. Модели оценки времени выполнения задачи на кластере с последовательной и параллельной архитектурой обмена данными // Системы управления и информационные технологии. 2005. № 3(20). С. 58–62.
5. Дегтерев А. С., Письман Д. М. ГЕРТ-сетевой анализ времени выполнения задачи на неспециализированном гетерогенном кластере // Фундаментальные исследования. 2005. № 4. С. 79–80.
6. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей. М. : Мир, 1984.

References

1. Kovalev P. V., Laykov A. N., Gritsenko S. N. *Vestnik SibGAU*. 2009, no. 1(22) in 2 series. Series 2, p. 55–60.
2. Kovalev P. V. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*. 2009, no. 9, p. 161–164.
3. Dorrer M. G., Ziryaynov A. A. *Informatsiya I svyaz*. 2012, no. 7, p. 124–127.
4. Kovalev I. V. *Sistemi upravleniya I informatzionnie technologii*. 2005, no. 3 (20), p. 58–62.
5. Degterev A. S., Pisyman D. M. *Fundamentalnyie issledovaniya*. 2005, no. 4, p. 79–80.
6. Fillips D., Garsia-Dias A. *Metodi analiza sete* (Methods for analyzing networks). Moscow, Mir, 1984.

© Ковалев Д. И., Сарамуд М. В.,
Карасева М. В., Нургалеева Ю. А., 2014

УДК 004.056.55

РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛИС ШИФРА ЗАКРЕВСКОГО НА ОСНОВЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО АВТОМАТА

Д. С. Ковалев

ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: dmisk@hotmail.com

Рассматривается задача проектирования быстродействующего компактного криптопроцессора. Предлагается решение данной задачи на базе конечно-автоматной модели. В качестве представителя класса автоматных шифров выбран шифр Закревского на основе перестраиваемого автомата. Представлена аппаратная реализация на ПЛИС Xilinx Spartan-3 данного шифра. Приведены значения ресурсоёмкости и производительности данной реализации. Произведено сравнение реализаций на ПЛИС шифра Закревского на основе перестраиваемого автомата, блочного шифра AES и поточных шифров – финалистов конкурса eSTREAM, рекомендованных для аппаратной реализации. Сделано заключение о возможности использования шифра Закревского на основе перестраиваемого автомата на практике.

Ключевые слова: криптопроцессор, ПЛИС, конечно-автоматная шифрсистема, шифр Закревского, перестраиваемый автомат.

FPGA IMPLEMENTATION OF THE ZAKREVSKIJ'S CIPHER BASED ON RECONFIGURABLE FSM

D. S. Kovalev

JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: dmisk@hotmail.com

The problem of the compact high-throughput cryptoprocessor design is considered. This problem solution based on the Finite State Machine model is offered. Zakrevskij's Cipher Based on Reconfigurable FSM is chosen as a representative of the finite automata ciphers class. FPGA Xilinx Spartan-3 hardware implementation of this cipher is presented. Values of the hardware resource using and throughput of this implementation are given. The FPGA implementation comparison of Zakrevskij's Cipher Based on Reconfigurable FSM, block cipher AES and hardware-oriented stream ciphers became eSTREAM competition finalists was made. The conclusion about Zakrevskij's Cipher Based on Reconfigurable FSM practice using possibility is made.

Keywords: cryptoprocessor, FPGA, finite automata cryptosystem, Zakrevskij's cipher, reconfigurable finite state machine.

В настоящее время существует высокая потребность в создании быстродействующих компактных криптопроцессоров, которые используются для снижения вычислительной нагрузки основного процессора, в средствах автоматического регулирования и управления техпроцессами, в телекоммуникационном

оборудовании, так же как аппаратные модули доверенной загрузки операционной системы и пр.

Криптопроцессоры, как правило, являются устройствами, в которых реализованы криптографические алгоритмы различного назначения (симметричное/асимметричное шифрование, электронная цифровая

подпись, хэширование). Часто разнородность криптоалгоритмов не позволяет использовать единый объединяющий все алгоритмы подход при проектировании криптопроцессора, что может дать существенный выигрыш по быстродействию, энергопотреблению, компактности и др. Как вариант объединяющего подхода предлагается использование автоматной модели при задании криптоалгоритмов.

Конечно-автоматные шифрсистемы давно известны криптографам [1], но мало изучены. В частности, в литературе не встречаются исследования на пригодность их к практическому использованию. В данной работе в качестве представителя класса автоматных шифров выбран шифр Закревского на основе перестраиваемого автомата [2]. Исследуются характеристики данного шифра при реализации его на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

Необходимые определения.

Определение 1. Конечно-автоматом A называется пятёрка (X, S, Y, ψ, φ) , где S – конечное непустое множество состояний; X и Y – конечные входной и выходной алфавиты соответственно; $\psi: X \times S \rightarrow S$ и $\varphi: X \times S \rightarrow Y$ – функции переходов и выходов соответственно.

Автомат A при фиксированном состоянии s реализует отображение $f_s: X^* \rightarrow Y^*$, для которого $f_s(\alpha) = \beta$, где $\beta \in Y^*$ – реакция автомата A на входное слово $\alpha \in X^*$.

Определение 2. Автомат A называется сильносвязным, если для любых состояний s и s' существует входное слово, которое переводит автомат из состояния s в состояние s' .

Определение 3. Автомат $A^{-1} = (Y, S, X, \psi', \varphi')$ называется обратным к автомату $A = (X, S, Y, \psi, \varphi)$, реализующему $\{f_s: s \in S\}$, если A^{-1} реализует $\{f_s^{-1}: s \in S\}$.

Определение 4. Шифром Закревского называется автоматный шифр, в котором множества открытых и шифрованных сообщений являются множествами слов в некоторых алфавитах, алгоритмы шифрования и расшифрования задаются взаимно обратными сильносвязными инициальными автоматами A и A^{-1} с биективными в каждом состоянии функциями выходов.

Для практического использования шифра Закревского требуется задать процедуру генерации автоматов A и A^{-1} по ключу. В работе [2] предлагается использовать для этих целей так называемый перестраиваемый автомат, т. е. автомат, функция переходов которого строится «на лету» с помощью блока управления.

Структура перестраиваемого автомата. Структура перестраиваемого автомата представлена на рисунке. Компонента Key управляет работой мультиплексора MUX , который из двух состояний $s_1 = \psi_1(s, x)$ и $s_2 = \psi_2(s, x)$ выбирает одно. Компонента Reg (регистр памяти) предназначена для хранения текущего состояния автомата. Компонента Key реализует булеву функцию, вектор значений которой является секретом (ключом) и «загружается» (вместе с начальным состоянием) в шифрсистему при инициализации. Таким образом, схема на рисунке задает шифрующий автомат

$A = (X, S, Y, \psi, \varphi)$, в котором для любой пары (x, s) из $X \times S$ выполняется, что $\psi(x, s) = \psi_1(s, x)$, когда $\text{Key}(x, s) = 0$, либо $\psi(x, s) = \psi_2(s, x)$, когда $\text{Key}(x, s) = 1$.

Чтобы шифрующий автомат A был сильносвязным, одна из функций $\psi_1(s, x)$ или $\psi_2(s, x)$ (пусть ψ_1) задаёт сильносвязный граф переходов. Пусть $S = \{s_i: i = 1, \dots, m\}$. Тогда существует x из X такой, что $\psi_1(s_i, x) = s_{i+1}$, когда $i < m$ и $\psi_1(s_m, x) = s_1$, причём $\text{Key}(x, s) = 0$ для любого s из S .

Для расшифрования в схеме на рисунке вместо функции выходов $\varphi(s, x)$ нужно использовать функцию $\varphi'(s, y) = x$ такую, что для любого s из S выполняется $\varphi'_s(y) = \varphi^{-1}_s(y)$. Также значение функции $\varphi'(s, y)$ должно подаваться на вход компонентам Key , $\psi_1(s, x)$ и $\psi_2(s, x)$.

Реализация на ПЛИС. В настоящей работе исследуется перестраиваемый автомат, у которого $|X| = |Y| = 16$ (4 бита при кодировании), $|S| = 8$ (3 бита при кодировании). Таким образом, длина ключа равна $16 \cdot 8 - 8 + 3 = 128 - 8 + 3 = 123$ бита (128 бит – вектор состояний булевой функции Key , 8-бит – для реализации сильносвязности, 3 бита – начальное состояние). Таблицы переходов $\psi_1(s, x)$ и $\psi_2(s, x)$ и таблица выходов $\varphi(s, x)$ задавались случайным образом, но с обеспечением требуемых свойств (сильносвязность и биективность в каждом состоянии соответственно).

Исследуемая автоматная шифрсистема была описана на языке VHDL и промоделирована в САПР Xilinx Webpack ISE 14.1 при реализации на ПЛИС Spartan-3 XC3S50, при этом состояния автомата кодировались разными методами, что не влияло на конечные результаты.

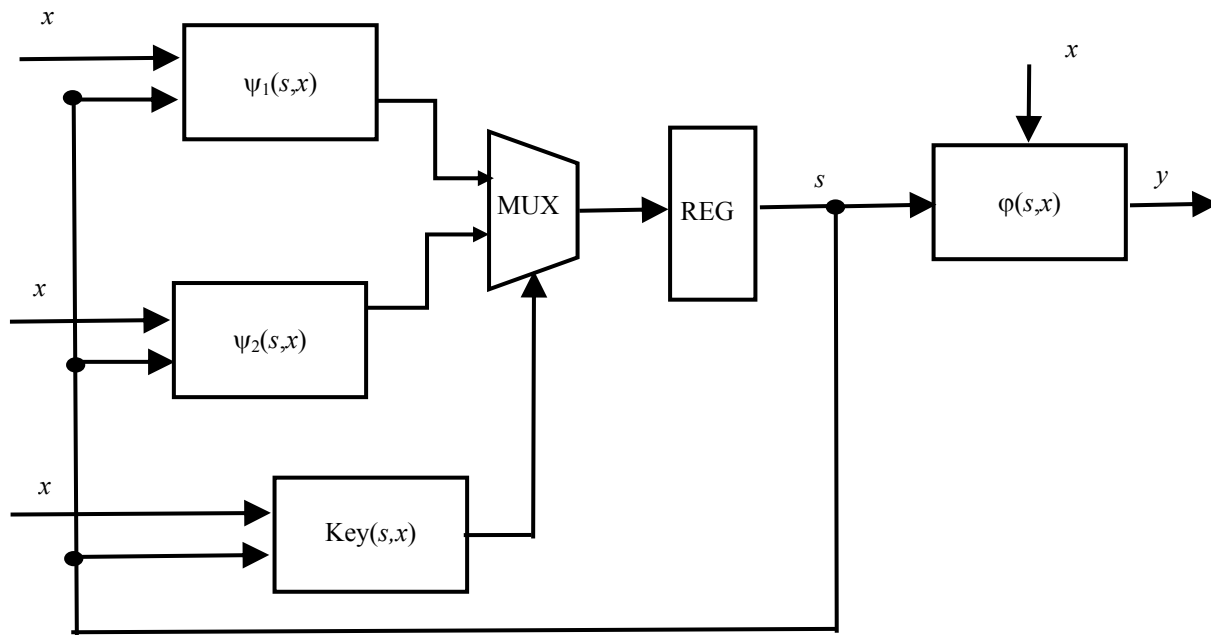
Оказалось, что процедура расшифрования имеет несколько более низкую производительность, чем процедура шифрования, но при этом также требует несколько меньшего числа ресурсов микросхемы.

Критерием оценки практической пригодности криптосистемы является эффективность её ПЛИС-реализации в сравнении с реализациями современных блочных и поточных шифров на ПЛИС того же типа.

В таблице сравниваются результаты реализации шифра Закревского на основе перестраиваемого автомата и современных блочных (представленных шифром AES) и поточных (представленных шифрами – финалистами конкурса eSTREAM, рекомендованными для аппаратной реализации: Grain, MICKEY и Trivium) шифров. Результаты реализации AES взяты из работы [3], шифров – финалистов eSTREAM – из работы [4].

Сравнение ПЛИС-реализаций шифра Закревского на основе перестраиваемого автомата и современных блочных и поточных шифров

Шифр	Ресурсоёмкость (S), Slices	Производительность (T), Мбит/с	T/S
Закревского (шифрование)	370	298	0,805
Закревского (расшифрование)	365	269	0,737
AES	163	208	1,276
Grain	50	196	3,920
MICKEY	115	233	2,026
Trivium	50	240	4,800



Структура перестраиваемого автомата

Таким образом, шифр Закревского на основе перестраиваемого автомата имеет более высокую производительность, чем блочный шифр AES и аппаратно-ориентированные поточные шифры – финалисты eSTREAM, однако уступает им в ресурсоёмкости.

В данной работе предлагается решать задачу проектирования криптопроцессора с набором различного вида криптоалгоритмов на базе автоматной модели. Проводятся исследования шифра Закревского на основе перестраиваемого автомата как представителя симметричных автоматных шифров. Указанный шифр реализован на ПЛИС Spartan-3, проведено сравнение ПЛИС-реализаций шифра Закревского на основе перестраиваемого автомата, шифров AES, Grain, MICKEY, Trivium. Проведённые исследования показывают, что автоматное симметричное шифрование пригодно к использованию на практике.

Библиографические ссылки

1. Агibalов Г. П. Конечные автоматы в криптографии // Прикладная дискретная математика. Приложение. 2009. № 2. С. 43–73.
2. Тренькаев В. Н. Реализация шифра Закревского на основе перестраиваемого автомата // Прикладная дискретная математика. 2010. № 3. С. 69–77.
3. Rouvroy G., Standaert F. X., Quisquater J. J., Legat J. D. Compact and efficient encryption/decryption

module for FPGA implementation of the AES Rijndael very well suited for small embedded applications // Proc. Intern. Conf. Inform. Technology: Coding and Computing. 2004, vol. 2, p. 583–587.

4. Hwang D., Chaney M., Karanam S., Ton N., Gaj K. Comparison of FPGA-targeted hardware implementations of eSTREAM stream cipher candidates // SASC 2008 Workshop Record. eSTREAM Project, 2008, p. 151–162.

References

1. Agibalov G. P. *Prikladnaya diskretnaya matematika. Prilozhenie*. 2009, no 2, p. 43–73.
2. Tren'kaev V. N. *Prikladnaya diskretnaya matematika*. 2010, no 3, p. 69–77.
3. Rouvroy G., Standaert F. X., Quisquater J. J., Legat J. D. Compact and efficient encryption/decryption module for FPGA implementation of the AES Rijndael very well suited for small embedded applications. *Proc. Intern. Conf. Inform. Technology: Coding and Computing*. 2004, vol. 2, p. 583–587.
4. Hwang D., Chaney M., Karanam S., Ton N., Gaj K. Comparison of FPGA-targeted hardware implementations of eSTREAM stream cipher candidates. *SASC 2008 Workshop Record*. eSTREAM Project, 2008, p. 151–162.

© Ковалев Д. С., 2014

УДК 004.023

МОДИФИКАЦИЯ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ МУЛЬТИВЕРСИОННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

И. В. Ковалев, М. В. Карасева, Е. В. Соловьев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: blackdeathangel@rambler.ru

Исследуется мультиверсионное программное обеспечение и решается задача его формирования как задача оптимизации. Рассматривается муравьиный алгоритм как способ решения задачи формирования мультиверсионного программного обеспечения. Данная методология основывается на введении программной избыточности и позволяет существенно повысить уровень надежности программного обеспечения. Проведены эксперименты с помощью стандартного алгоритма и выполнена модификация алгоритма с повторением экспериментов на тех же данных. Внесенные модификации улучшают алгоритм, что демонстрируют результаты тестовой задачи. Хотя вследствие внесенных изменений скорость расчета на одной итерации замедляется, увеличение скорости схождения алгоритма в область оптимального решения компенсирует данный недостаток. Представлено сравнение полученных результатов.

Ключевые слова: оптимизация, муравьиные алгоритмы, мультиверсионное программное обеспечение.

ANT ALGORITHM MODIFICATION FOR THE PROBLEM OF MULTIVERSION SOFTWARE FORMATION

I. V. Kovalev, M. V. Karaseva, E. V. Solovyev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: blackdeathangel@rambler.ru

Multiversion software is investigated and an optimization problem of its formation is solved. The ant algorithm is considered as a method for the problem of multiversion software formation. This methodology is based on the introduction of software redundancy that can significantly increase the level of the software reliability. The paper conducts the experiments using a standard algorithm; a modification of the algorithm with the repetition of the experiments with the same data is performed. The introduced modifications improve the algorithm that demonstrates the results of the test problem. Although in consequence of changes the calculation speed on one iteration slows down, the speed increase of the algorithm convergence in the field of the optimal solution compensates this deficiency. The comparison of the obtained results is given.

Keywords: optimization, ant algorithm, multiversion software.

В последнее время очень активно идет развитие «естественных алгоритмов», которые представляют собой алгоритмы оптимизации, основанные на природных механизмах принятия решений. Одним из таких алгоритмов является алгоритм муравьиной колонии (алгоритм оптимизации подражанием муравьиной колонии, ant colony optimization – АСО) [1]. Данный алгоритм является продуктом сотрудничества ученых, изучающих поведение социальных насекомых и специалистов в области компьютерных технологий. В основе данного алгоритма лежит поведение муравьев, а точнее их способность к нахождению кратчайших путей до источника пищи.

Муравьиная колония является распределенной системой, и, несмотря на простоту отдельных её представителей, эта система способна решать сложные задачи. Каждый представитель колонии пытается найти кратчайший путь до источника пищи, при это

он не может получить доступ к информации, полученной другими представителями колонии, поэтому у них должен быть механизм, который бы позволил объединить их знания. В качестве данного механизма выступает способность муравьев пометать путь с помощью феромона. Если в процессе поиска муравей находит источник пищи, то на обратном пути он пометит свой маршрут феромоном. Другие муравьи при поиске пищи будут опираться в выборе пути на этот сигнал. Чем большим значением феромона будет помечен путь, тем больше вероятность того, что муравей в своем поиске выберет данный маршрут.

Этот механизм самоорганизации и лег в основу алгоритма муравьиной колонии. Основной идеей алгоритма стало то, что набор агентов, поведение которых копирует поведение муравьев, объединяется для решения задачи оптимизации. Агенты координируют свою работу с помощью стигмергии (stigmergy),

которая является механизмом непрямого взаимодействия, осуществляющимся посредством изменения общей среды. В случае АСО таким механизмом стали феромоны. Агенты отмечают пройденный путь с помощью феромона, увеличивая шансы данного пути при выборе альтернатив. Для того чтобы алгоритм не скатывался в область локального экстремума, существует такой механизм, как испарение феромона. Данный механизм отвечает за то, чтобы пути, ошибочно выбранные в качестве решения, постепенно теряли свою привлекательность за счет испарения феромона на них; при этом пути, которые предпочли агенты в процессе принятия решений, будут увеличивать свою популярность, что должно привести к тому, что все агенты в конечном счете выберут общее решение.

Рассмотрим общий алгоритм муравьиной колонии.

1. Создаем муравьев. Стартовая точка, куда помещается муравей, зависит от ограничений, накладываемых условиями задачи, потому что для каждой задачи способ размещения муравьев является определяющим: либо все они помещаются в одну точку, либо в разные с повторениями (без повторений). На этом же этапе задаётся начальный уровень феромона. Он инициализируется небольшим положительным числом для того, чтобы на начальном шаге вероятности перехода в следующую вершину не были нулевыми.

2. Ищем решения. Вероятность перехода из вершины i в вершину j определяется по следующей формуле:

$$p_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \left[\frac{1}{d_{ij}} \right]^\beta}{\sum_{j \in \text{allowedNodes}} [\tau_{ij}]^\alpha \left[\frac{1}{d_{ij}} \right]^\beta}$$

где $\tau_{ij}(t)$ – уровень феромона; d_{ij} – эвристическое расстояние; α и β – константы. При $\alpha = 0$ выбор ближайшего объекта для включения в итоговое решение, наиболее вероятен, т. е. алгоритм становится жадным. При $\beta = 0$ выбор происходит только на основании феромона, что приводит к субоптимальным решениям.

3. Обновляем значения феромона. Уровень феромона обновляется в соответствии с приведённой формулой:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{\substack{k \in \text{ant that used} \\ \text{edge}(i,j)}} \frac{Q}{L_k}$$

где ρ – интенсивность испарения; L_k – цена текущего решения для k -го муравья; Q – параметр, имеющий значение порядка цены оптимального решения, т. е. Q/L_k – феромон, откладываемый k -м муравьем, использующим ребро (i, j) .

4. Дополнительные действия. Обычно здесь используется алгоритм локального поиска, однако он может также использоваться и после поиска всех решений.

5. Проверка окончания поиска. В случае если заданные ограничения были выполнены, поиск останавливается, в противном случае возвращаемся на 1 шаг.

Формирование состава мультиверсионного программного (N-version programming, NVP) обеспечения является задачей, для которой применяется муравьиный алгоритм [2; 3]. Методология мультиверсионного программирования является одной из наиболее перспективных и уже положительно зарекомендовавших себя методологий обеспечения высокой надежности и отказоустойчивости программного обеспечения. Данная методология основывается на введении программной избыточности и позволяет существенно повысить уровень надежности программного обеспечения [4].

Мультиверсионность исполнения программных модулей подразумевает независимую генерацию ряда функционально эквивалентных версий каждого модуля в соответствии с исходными спецификациями. Для версий программного модуля, называемых мультиверсиями, предоставляются средства конкурентного исполнения. Входными данными версий одного модуля являются идентичные наборы данных. Результаты же работы мультиверсий могут отличаться ввиду различных причин. Выбор правильного решения из представленного множества результатов происходит в блоке оценки и принятия решения, где определяется корректный результат [5].

Вследствие этого перед проектировщиком встает задача выбора оптимального набора программных компонент с учетом ряда критериев. Так к какому же классу проблем можно отнести данную задачу? Эта задача относится к классу задач о покрытии множества (set covering problem – SCP) [6]. Нам дается $m \times n$ матрица $A = [a_{ij}]$, в которой все элементы равны 0 или 1. Дополнительно каждой колонке присвоена положительная стоимость b_j . Можно сказать, что колонка j покрывает строку i , если $a_{ij} = 1$. Цель SCP – выбрать набор колонок с минимальной стоимостью, при этом покрыв каждую строку. Обозначим J набор колонок и y_j обозначим бинарную переменную, равную 1, если $j \in J$, и 0 в противном случае. Формально SCP можно определить следующим образом:

$$\min f(y) = \min \sum_{j=1}^n b_j y_j,$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} y_j \geq 1, i = 1, \dots, m,$$

$$y_j \in \{0, 1\}, j = 1, \dots, n,$$

Для проведения экспериментов мы возьмем алгоритм MAX-MIN Ant System (MMAS), он является одним из наиболее исследованных и одним из наиболее эффективных алгоритмов, относящихся к семейству муравьиных алгоритмов [1]. Основными особенностями данного алгоритма является наличие верхней и нижней границы на значение феромона, а также способа обновления значения феромона. Обновляется и учитывается только лучшее решение. Схема тестовой мультиверсионной программы представлена на рисунке. Параметры версий в каждом модуле приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры стоимости и надежности для всех версий каждого модуля

	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
Module 1	C = 54 R = 0,6	C = 58 R = 0,66	C = 62 R = 0,698	C = 66 R = 0,73	C = 70 R = 0,75	C = 74 R = 0,767	C = 78 R = 0,778	C = 82 R = 0,788	C = 86 R = 0,795	C = 90 R = 0,8
Module 2	C = 22 R = 0,51	C = 24 R = 0,52	C = 26 R = 0,53	C = 28 R = 0,54	C = 30 R = 0,55	C = 32 R = 0,56	C = 34 R = 0,57	C = 36 R = 0,58	C = 38 R = 0,59	C = 40 R = 0,6
Module 3	C = 85 R = 0,6	C = 90 R = 0,61	C = 95 R = 0,625	C = 100 R = 0,65	C = 105 R = 0,68	C = 110 R = 0,74	C = 115 R = 0,81	C = 120 R = 0,865	C = 125 R = 0,89	C = 130 R = 0,9
Module 4	C = 31 R = 0,5	C = 32 R = 0,52	C = 33 R = 0,54	C = 34 R = 0,56	C = 35 R = 0,58	C = 36 R = 0,585	C = 37 R = 0,59	C = 38 R = 0,595	C = 39 R = 0,6	C = 40 R = 0,605
Module 5	C = 52 R = 0,5	C = 54 R = 0,52	C = 56 R = 0,54	C = 58 R = 0,56	C = 60 R = 0,58	C = 62 R = 0,61	C = 64 R = 0,64	C = 66 R = 0,67	C = 68 R = 0,7	C = 70 R = 0,73
Module 6	C = 35 R = 0,6	C = 40 R = 0,64	C = 45 R = 0,68	C = 50 R = 0,7	C = 55 R = 0,72	C = 60 R = 0,74	C = 5 R = 0,76	C = 70 R = 0,79	C = 75 R = 0,82	C = 80 R = 0,85
Module 7	C = 33 R = 0,6	C = 36 R = 0,63	C = 39 R = 0,65	C = 42 R = 0,66	C = 45 R = 0,665	C = 48 R = 0,67	C = 51 R = 0,69	C = 54 R = 0,71	C = 57 R = 0,75	C = 60 R = 0,82
Module 8	C = 72 R = 0,4	C = 74 R = 0,47	C = 76 R = 0,52	C = 78 R = 0,56	C = 80 R = 0,595	C = 82 R = 0,625	C = 84 R = 0,645	C = 86 R = 0,66	C = 88 R = 0,67	C = 90 R = 0,68
Module 9	C = 41 R = 0,5	C = 42 R = 0,51	C = 43 R = 0,53	C = 44 R = 0,57	C = 45 R = 0,62	C = 46 R = 0,69	C = 47 R = 0,75	C = 48 R = 0,77	C = 49 R = 0,79	C = 50 R = 0,8
Module 10	C = 20 R = 0,5	C = 25 R = 0,52	C = 30 R = 0,54	C = 35 R = 0,56	C = 40 R = 0,57	C = 45 R = 0,58	C = 50 R = 0,59	C = 55 R = 0,62	C = 60 R = 0,65	C = 65 R = 0,68

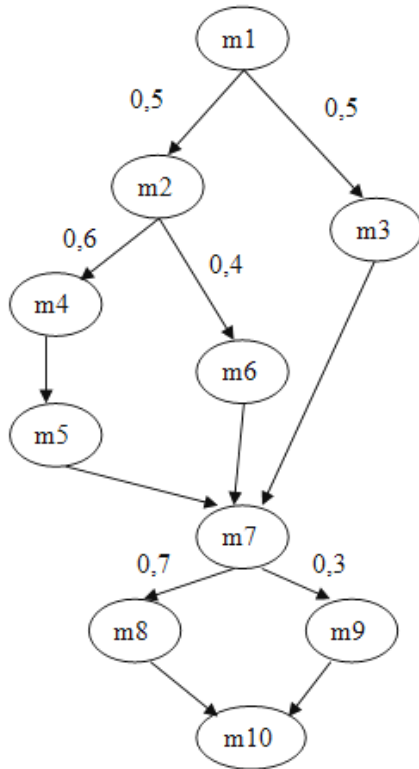


Схема тестового ПО

Для проведения исследования была выполнена программная реализация алгоритма MMAS, которая выглядит следующим образом:

1. Создаем муравьев. Количество муравьев равно количеству модулей ($N = 10$).
2. Для каждой версии выставляется максимальное значение феромона.
3. Создаем минимальное решение. Необходимо, чтобы был задействован каждый модуль. Вероятность выбора версии вычислялась по следующей формуле:

$$p_i = \frac{\tau_i \left[\frac{P_i}{C_i} \right]^\beta}{\sum_{\text{each version in module}} \tau_i \left[\frac{P_i}{C_i} \right]^\beta}$$

4. Вычисляем параметры получившихся решений (P – надежность и C – стоимость). Проверяем, превышены ли ограничения. Если да, то агент считается не удовлетворяющим необходимым условиям, в дальнейшем поиске он не участвует.
5. Пытаемся добавить версию модуля с учетом ограничений. Если ограничения превышены, то агент закончил свой поиск.
6. Проверяем, есть ли еще агенты, не закончившие поиск. Если да, то идем к шагу 5.
7. Сравниваем агентов, которые закончили поиск и удовлетворяют ограничениям с глобальным лучшим решением. В случае нахождения лучшего решения, оно заменяет собой глобальное лучшее решение.

8. Обновляем показатели феромона на версиях. Сбрасываем показатели агентов.

9. Проверяем, превышено ли максимальное количество итераций поиска. Если нет, то идем к пункту 3.

Таблица 2

Результаты эксперимента

Итерация	Параметры
1	Цена: 1609 Надежность: 0,952 Всего версии: 33
198	Цена: 1353 Надежность: 0,954 Всего версии: 25

Была проведена серия экспериментов со следующими параметрами: $P_{\min} = 0,95$, $C \rightarrow \min$. Лучший и самый быстрый результат представлен в табл. 2. Затем была проведена серия экспериментов со следующими параметрами $C_{\max} = 1500$, $P \rightarrow \max$. Лучший и самый быстрый результат приведен в табл. 3.

Таблица 3

Результаты эксперимента

Итерация	Параметры
1	Цена: 1499 Надежность: 0,938 Всего версии: 25
43	Цена: 1455 Надежность: 0,939 Всего версии: 29
100	Цена: 1463 Надежность: 0,946 Всего версии: 26
181	Цена: 1486 Надежность: 0,961 Всего версии: 29

Как видно из стандартной формулы расчета вероятности выбора версии, там не учитывается вероятность использования модуля, а также количество уже выбранных версий в данном модуле. Были внесены изменения в формулу расчета на 5 шаге, после чего она приобрела следующий вид:

$$p_i = \frac{K_i \tau_i \left[\frac{P_i}{C_i} \right]^\beta}{\sum_{\text{not used version}} K_i \tau_i \left[\frac{P_i}{C_i} \right]^\beta},$$

$$K_i = G_i \frac{1}{n_i},$$

где G_i – вероятность использования модуля i ; n_i – количество уже выбранных версий в модуле i .

Была проведена серия экспериментов со следующими параметрами: $P_{\min} = 0,95$, $C \rightarrow \min$. Быстрый результат представлен в табл. 4.

Таблица 4

Результаты эксперимента

Итерация	Параметры
2	Цена: 1830 Надежность: 0,951 Всего версий: 36
3	Цена: 1601 Надежность: 0,959 Всего версий: 31
5	Цена: 1459 Надежность: 0,953 Всего версий: 27
43	Цена: 1344 Надежность: 0,950 Всего версий: 27
80	Цена: 1340 Надежность: 0,953 Всего версий: 26
536	Цена: 1302 Надежность: 0,952 Всего версий: 25

Как видно из данных, уже на 80-й итерации был достигнут результат, лучший по сравнению со стандартным алгоритмом. Лучший достигнутый результат показан в табл. 5.

Таблица 5

Результаты эксперимента

Шаг	Параметры
1	Цена: 1776 Надежность: 0,954 Всего версий: 34
2	Цена: 1683 Надежность: 0,965 Всего версий: 31
4	Цена: 1521 Надежность: 0,950 Всего версий: 29
8	Цена: 1499 Надежность: 0,951 Всего версий: 28
9	Цена: 1446 Надежность: 0,952 Всего версий: 29
48	Цена: 1438 Надежность: 0,950 Всего версий: 28
166	Цена: 1427 Надежность: 0,953 Всего версий: 27
232	Цена: 1415 Надежность: 0,952 Всего версий: 26
272	Цена: 1396 Надежность: 0,955 Всего версий: 27
287	Цена: 1364 Надежность: 0,950 Всего версий: 26
429	Цена: 1317 Надежность: 0,951 Всего версий: 24
1884	Цена: 1268 Надежность: 0,950 Всего версий: 25

Стоит отметить, что даже самый плохой результат, полученный с помощью модифицированного алгоритма, превосходит самый лучший результат, полученный обычным алгоритмом. Затем была проведена серия экспериментов со следующими параметрами: $C_{\max} = 1500, P \rightarrow \max$. Результат, достигнутый максимально быстро, представлен в табл. 6.

Таблица 6

Результаты эксперимента

Итерация	Параметры
1	Цена: 1465 Надежность: 0,946 Всего версий: 26
32	Цена: 1490 Надежность: 0,948 Всего версий: 27
35	Цена: 1440 Надежность: 0,951 Всего версий: 24
85	Цена: 1487 Надежность: 0,954 Всего версий: 28
112	Цена: 1480 Надежность: 0,957 Всего версий: 27
118	Цена: 1487 Надежность: 0,961 Всего версий: 27
364	Цена: 1469 Надежность: 0,962 Всего версий: 27
1142	Цена: 1469 Надежность: 0,963 Всего версий: 30
1552	Цена: 1488 Надежность: 0,964 Всего версий: 27
1651	Цена: 1488 Надежность: 0,964 Всего версий: 27

Как видно, уже на 118-й итерации показатель надежности превышает показатель надежности в аналогичном эксперименте без модификаций. Лучший достигнутый результат показан в табл. 7.

Таблица 7

Результаты эксперимента

Шаг	Параметры
1	Цена: 1435 Надежность: 0,944 Всего версий: 27
20	Цена: 1493 Надежность: 0,948 Всего версий: 26
34	Цена: 1494 Надежность: 0,950 Всего версий: 27
70	Цена: 1494 Надежность: 0,954 Всего версий: 27
80	Цена: 1468 Надежность: 0,955 Всего версий: 27

Окончание табл. 7

Шаг	Параметры
361	Цена: 1496 Надежность: 0,959 Всего версии: 29
406	Цена: 1497 Надежность: 0,963 Всего версии: 29
1278	Цена: 1500 Надежность: 0,964 Всего версии: 28

Итак, внесенные модификации улучшают исходный (базовый) алгоритм муравьиной колонии, что демонстрируют результаты тестовой задачи. Хотя вследствие внесенных изменений скорость расчета на одной итерации несколько замедляется, увеличение скорости нахождения оптимального решения (время схождения на тестовой задаче при использовании модификации до уровня надежности 0,95 было меньше на 79 %) компенсирует данный недостаток.

Библиографические ссылки

1. Dorigo M., Stützle T. Ant colony optimization / The MIT Press. Cambridge, 2004.
2. Ковалев И. В. [и др.] Использование метода роя частиц для формирования состава мультиверсионного программного обеспечения // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 3. С. 1–6.
3. Ковалев И. В., Царев Р. Ю., Прокопенко А. В., Соловьев Е. В. К вопросу реализации муравьиного алгоритма при выборе состава мультиверсионного программного обеспечения информационно-управляющих систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 2. С. 1–4.

4. Ковалев К. В., Слободин М. Ю., Ступина А. А. Математическая постановка задачи проектирования N-версионных программных систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2005. № 3. С. 16–23.
5. Ковалев И. В., Новой А. В. Расчет надежности отказоустойчивых архитектур программного обеспечения // Вестник СибГАУ. 2007. № 4. С. 14–17.
6. Lessing L., Dumitrescu I., Stützle T. A Comparison between ACO Algorithms for the Set Covering Problem / Canada Research Chair in Distribution Management. HEC Montreal, 2012.

References

1. Dorigo Marco, Thomas Stützle. Ant colony optimization The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004.
2. Kovalev I. V., Solovyev E. V., Kovalev D. I., Bakhmareva K. K., Demish A. V. *Pribori i sistemy. Upravlenie, control i diagnostika*. 2013, no 3, p. 1–6.
3. Kovalev I. V., Tzarev R. Yu., Prokopenko A. V., Solovyev E. V. *Pribori i sistemy. Upravlenie, control i diagnostika*. 2012, no 2, p. 1–4.
4. Kovalev I. V., Slobodin M. Yu., Stupina A. A. *Problemi mashinostroeniya i avtomatizatsii*. 2005, no. 3, p. 16–23.
5. Kovalev I. V., Novoi A. V. *Vestnik SibGAU*. 2007, no. 4, p. 14–17.
6. Lucas Lessing, Irina Dumitrescu, Thomas Stützle. A Comparison between ACO Algorithms for the Set Covering Problem, Canada Research Chair in Distribution Managment, HEC Montreal, 2012.

© Ковалев И. В., Карасева М. В.,
Соловьев Е. В., 2014

УДК 62-506.1

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Н. В. Коплярова¹, В. И. Орлов²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: aaa@mail.sibsau.ru

²ОАО «Испытательно-технический центр – НПО ПМ»
Российская Федерация, 662970, г. Железногорск Красноярского края, ул. Молодежная, 20
E-mail: itcnpom@atomlink.ru

Предлагается алгоритм оценивания качества классификации в случае отсутствия информации о реальном расположении классов (отсутствие обучающей выборки). Алгоритм основан на том, что моделируется выборка, максимально подобная реальным данным. Таким образом, решается актуальная задача оценки качества классификации данных на основе адекватных моделей. Классификация проводилась на данных, представляющих собой показатели качества транзисторов. Рассматривается алгоритм группировки (оценки качества) электрорадиоизделий (ЭРИ) по данным испытаний. Формулируется также принцип исследования ЭРИ средствами компьютерного моделирования. При этом моделирование процесса кластеризации осуществляется в условиях, максимально приближенных к реальности. Приводятся результаты численных исследований.

Полученные результаты позволяют надеяться на успешное применение алгоритмов автоматической классификации в компьютерных системах технической диагностики электрорадиоизделий.

Ключевые слова: диагностика, электрорадиоизделие, классификация, генерация данных.

ABOUT RESEARCH OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT DIAGNOSTICS COMPUTER SYSTEM ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA

N. V. Kopyarova¹, V. I. Orlov²

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: aaa@sibsau.ru

²JSC "TTC-NPO PM"
20, Molodezhnaya str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662970, Russian Federation
E-mail: itcnpopm@atomlink.ru

An algorithm for estimating the quality of classification is proposed. The task is considered in case of absence of the information about the classes in reality (no training sample). The algorithm is based on modeling of the sample that will be the most similar to the real data. Thus, the actual problem of classification quality evaluation is solved on the basis of the adequate models. Classification was carried out on the data of transistors quality. The task of diagnostics (estimation of quality) of various electronic, electromechanical and electromagnetic components (EEE components) is considered. The principle of EEE research with modeling method is formulated. The modeling of classification process is performed under the conditions which are close to real. The results of numerical researches are in the article. The results allow to hope that application of the proposed algorithm to automatic classification of EEE will be effective.

Keywords: diagnostics, radio-electronic equipment, classification, data generating.

Рассматривается задача автоматической классификации изделий по реальным данным в случае, когда число классов неизвестно. Основной проблемой при решении задачи классификации является то, как оценивать результаты группировки данных. Результат разделения на классы представляется в виде набора элементов выборки (изделий) с указанием того, к какому классу принадлежит каждый элемент, количества элементов в каждом классе и списка центров классов. При этом результат считается хорошим, когда для полученных классов выполняется гипотеза компактности. То есть расстояние между классами должно быть достаточно большое и центры классов выделяются явно. Однако в данном случае все зависит от качества выборки и природы данных. Часто значения переменных в выборке не могут быть явно разделены на группы по некоторым параметрам. Кроме того, существует множество алгоритмов классификации. Используя их, получаются разные классы. Тогда нужно оценивать качество группировки данных.

Задача классификации. Пусть имеется совокупность некоторых объектов $O_1, O_2, \dots, O_s$, свойства которых определены в пространстве признаков. Требуется разбить их на группы объектов, в некотором смысле близких между собой. Информация об объектах задана в виде матрицы $m \times n$ (m – количество входных параметров (признаков), s – объем выборки изделий). Таким образом, задача классификации заключается в разбиении пространства признаков на непересекающиеся области.

Каждый элемент выборки (объект) характеризуется определенными значениями вектора параметров

$v = (v_1, \dots, v_m)$, на основании которых осуществляется диагностика (объект может быть отнесен к одному из классов V_1 или V_2). Типичным для задач диагностики является наличие облачной структуры в пространстве признаков, определяющих тот или иной класс (например, удовлетворительный, среднего качества и высокого качества). Задача диагностики рассматривается как задача распознавания образов и сводится к построению решающего правила на основе имеющейся обучающей выборки $\{\bar{v}_s = (v_1, \dots, v_s), \bar{U}_s\}$, где $\bar{U}_s$ – указания учителя о принадлежности к V_1 или V_2 ; s – объем выборки. На рис. 1 это иллюстрируется для трехмерного вектора v , $m = 3$.

При этом количество классов качества может быть различным, но независимо от их числа обязательно присутствуют области перемешивания представителей соседних классов (V_3), что приводит к необходимости решения задачи распознавания образов в вероятностной постановке (рис. 1). Это порождает трехальтернативную задачу диагностики изделий [1]. Третий класс определяет некоторую пограничную область между классами, т. е. подобласть, в которой имеет место перемешивание изделий различных классов.

Распознавание образов без учителя (самообучение) – это обучение без каких-либо указаний учителя о правильности или неправильности реакции системы в различных условиях [2]. Предположим, что множество объектов X состоит из нескольких непересекающихся подмножеств X_k ($k = \overline{1, l}$), соответствующих

различным классам объектов, характеризуемых векторами $\bar{x} \in X$. Поскольку объект $\bar{x} \in X$ появляется в том или ином множестве X_k ($k = \overline{1, l}$) случайно, то естественно рассматривать вероятность появления объекта $\bar{x}$ в классе X_k (обозначим ее P_k) и условную плотность вероятности вектора $\bar{x}$ внутри соответствующего класса X_k , $p_k(x) = P(x/k)$, $k = \overline{1, l}$.

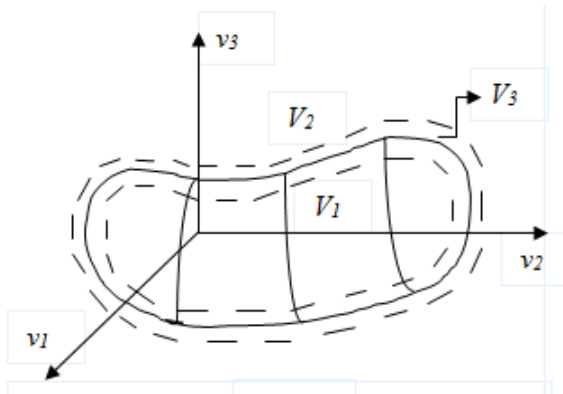


Рис. 1. Иллюстрация задачи распознавания образов

В этом случае максимумы плотностей вероятностей $P_k(x)$ находятся над «центрами» классов, соответствующих подмножествам X_k . Однако когда неизвестно, к какому классу принадлежит объект $\bar{x}$, эти условные плотности вероятности определить невозможно. Совместная плотность вероятности $P(x) = \sum_{k=1}^l P_k p_k(x)$ содержит довольно полную информацию о множествах. В частности, максимумы (моды) функции $P(x)$ будут соответствовать «центрам» классов. Поэтому задача самообучения часто сводится к задаче восстановления совместной плотности вероятности $P(x)$ и определению по ней «центров», а затем и границ классов [1]. Так, для случая $\bar{x} = (x_1, x_2)$ на рис. 2 представлен возможный вид плотности вероятности $P(x)$.

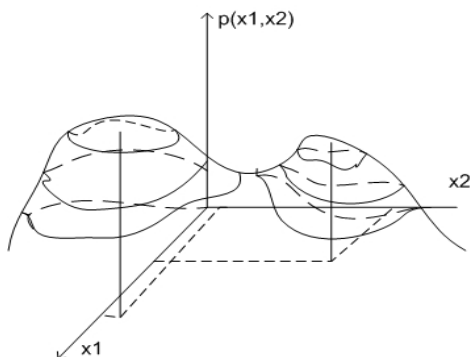


Рис. 2. Плотность распределения вероятности

На рис. 2 показана плотность вероятности $P(x)$, имеющая два максимума, а следовательно, и два класса. Центрами классов естественно считать координаты

максимумов (моды) распределения $(x_1(k), x_2(k))$, $k = 1, 2$.

Далее рассматривается алгоритм, предлагаемый для группировки данных в случае, когда исходное число классов неизвестно.

Алгоритм группировки данных. Пусть дана выборка наблюдений $\{x_i, i = \overline{1, s}\}$ многомерной переменной $\bar{x} \in R^m$ (m – размерность x), соответствующая характеристикам некоторых реальных объектов. Необходимо разделить имеющуюся выборку наблюдений на группы изделий (классы), в некотором смысле близких между собой по характеристикам. Количество таких классов неизвестно. Далее описывается предлагаемый алгоритм классификации, включающий следующие шаги:

1. Находятся расстояния между всеми точками выборки наблюдений. Расстояние $r(x_i, x_j)$ между двумя многомерными точками $\bar{x}_i$ и $\bar{x}_j$ вычисляется следующим образом:

$$r(\bar{x}_i, \bar{x}_j) = \sum_{q=1}^m |x_i^q - x_j^q|. \quad (1)$$

2. Находятся точки, находящиеся на относительно большом расстоянии друг от друга. Здесь в качестве радиуса, определяющего «дальность», принимается среднее значение расстояния между всеми точками:

$$r_{mean} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m r(\bar{x}_i, \bar{x}_j).$$

3. Из имеющейся таблицы расстояний выбирается массив, состоящий из n элементов $g = \{r[i] / r_{i,j} < r_{mean}\}$, $i = 1, n$ таким образом, чтобы этот массив содержал пары точек, расстояние между которыми наибольшее. Далее предполагается, что выбранные элементы принадлежат различным классам.

4. На основании анализа массива g определяется число классов и центры масс (x^j) выделенных классов. Массив разделяется в соответствии с анализом значений расстояний между его элементами.

5. Находятся все точки, удовлетворяющие условию $r(x^*, x) < \delta_1$, где δ_1 – задаваемый параметр. Предполагается, что такие точки лежат в одном классе с начальной точкой x^* .

6. Выделенные точки объявляются классом и исключаются из выборки наблюдений.

Ниже будут рассмотрены результаты группировки реальных данных, которая была проведена с применением вышеописанного алгоритма.

Методика оценки результатов классификации.

Как уже говорилось, главная проблема при проведении классификации заключается в том, что информации о реальных данных недостаточно для того, чтобы сделать однозначные выводы о существовании групп в исследуемом наборе объектов. В связи с этим требуется оценить правильность и точность проведенной классификации. Для этого существует несколько способов.

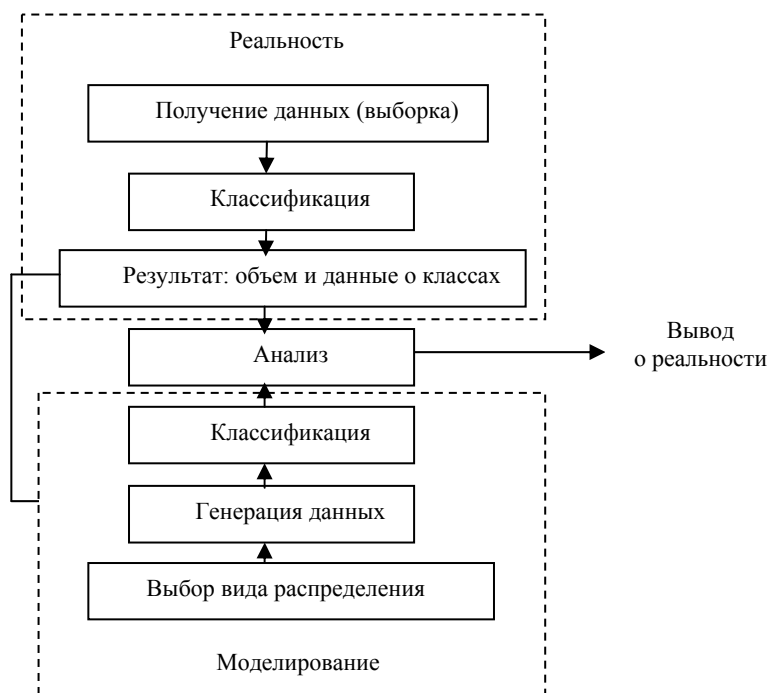


Рис. 3. Схема проведения классификации и последующего анализа данных

Кросс-проверка – это процедура оценки точности классификации на данных из тестового множества. Сравнивается точность классификации тестового и обучающего множеств. Если классификация тестового множества – результаты, по точности совпадающие с классификацией обучающего множества, считается, что данная модель прошла кросс-проверку. Разделение на обучающее и тестовое множества осуществляется путем деления выборки в определенной пропорции, например, обучающее множество – две трети данных и тестовое – одна треть данных. Кроме того, возможно оценивать эффективность классификации по расстоянию между классами или анализировать результаты классификации, проведенной различными методами [3; 4].

Может быть предложена также методика, основанная на моделировании данных, имитирующих реальные. Общая схема предлагаемого алгоритма представлена на рис. 3.

Предлагается методом статистического моделирования сгенерировать выборку, которая была бы максимально приближена к реальным данным $\{\bar{x}_i, i = \overline{1, s}\}$, т. е. имела те же объемы выборки, размерности и параметры классов. В соответствии со схемой, по результатам классификации можно задать центры и объем классов, сгенерировать выборку с некоторым законом распределения и вновь провести классификацию сгенерированных данных.

Методика основана на том, чтобы подходить к истинному разделению имеющихся данных двумя способами. С одной стороны, часть информации может быть получена в результате классификации данных одним из известных методов. Таким образом получа-

ем представление о расположении и объеме классов, а также значения центров классов. Результатом классификации обычно являются следующие знания:

1. Исходный массив данных разделен на N классов, причем в каждом j -м классе ($j = \overline{1, n}$) содержится s_j

объектов выборки: $\sum_{j=1}^n s_j = s$.

2. Каждый элемент x_i первоначальной выборки относится к одному из классов: $x_i \in X_j, i = \overline{1, s_j}, j = \overline{1, N}$.

3. Определяются центры классов $\bar{x}_j^C, j = \overline{1, n}$.

Таким образом, в результате классификации множество данных разделяется на N различных подмножеств. Тогда исходной информацией для применения алгоритма являются следующие параметры: $N, s_j, \bar{x}_j^C$. Их можно использовать для генерации модельной выборки $\{\bar{y}_i, i = \overline{1, s}\}$, распределение и вид которой должны совпадать с аналогичными параметрами реальных данных. Генерация может проводиться следующим образом:

$$y_i^j = f^j(\bar{x}_j^C, s_j), j = \overline{1, N}$$

где y_i^j – множество элементов j -го класса, сгенерированных таким образом, что центр этого класса находится в точке $\bar{x}_j^C, j = \overline{1, N}$; $f()$ – неизвестный закон распределения, описывающий расположение точек в пространстве.

Необходимо в ходе моделирования каким-то образом подобрать такой вид распределения данных, чтобы при классификации модельных и реальных данных результаты совпадали. В этом случае можно говорить

о том, что сгенерированные данные «имитируют» реальность. Такой алгоритм может быть достаточно хорошим для предварительного исследования реальных данных в случае необходимости их классификации. И в связи с этим вопрос об оценке результатов классификации решается на основании сравнения результатов, полученных в ходе группировки как реальных, так и модельных (сгенерированных) данных.

Обработка данных испытаний ЭРИ. В качестве примера рассматривается классификация электро-радиоизделий. Космические аппараты (КА) представляют собой сложные технические системы. Бортовая аппаратура в космическом пространстве не подлежит ремонту, поэтому для эффективного функционирования необходимо, чтобы ее надежность была максимальной. Требуемый уровень надежности обеспечивается за счет различных факторов, главным из которых является использование высоконадежных электронных компонентов. Космический аппарат содержит от 100 до 200 тыс. элементов электронно-компонентной базы (ЭКБ). К ним относятся микросхемы, транзисторы, диоды, конденсаторы, реле, резисторы и т. д.

Таким образом, одной из основных задач современной космической отрасли является комплектация бортовой аппаратуры КА высоконадежной ЭКБ. В первую очередь, следует предотвратить попадание в аппаратуру продукции, которая не удовлетворяет требованиям надежности. В рамках решения этой проблемы необходимо обеспечить закупку ЭКБ у проверенных поставщиков, а также проведение входного контроля, дополнительных отбраковочных испытаний и разрушающего физического анализа ЭКБ [5].

Далее представлены результаты численных расчетов по диагностике ЭРИ по реальным данным, полу-

ченным при измерении параметров транзисторов в ОАО «ИТЦ НПО ПМ». Рассматривались данные тестов проверки качества транзисторов Т866А аА0.339.431 ТУ от 2000 г. Переменными, определяющими качество изделий в данном случае, являются следующие (табл. 1).

В табл. 1 $I_{кбо}$ – обратный ток коллектора, $I_э$ – ток эмиттера, $I_б$ – ток базы, $I_к$ – ток коллектора, $U_к$ – напряжение коллектора, $U_{эб}$ – напряжение «эмиттер–база», $U_{бн}$ – напряжение базы насыщения, $U_{кн}$ – напряжение коллектора насыщения, $h_{21э}$ – статический коэффициент передачи тока. Таким образом, дана выборка из 78 элементов, каждый из которых описывает определенный транзистор, качество которого определяется путем измерения 16 параметров.

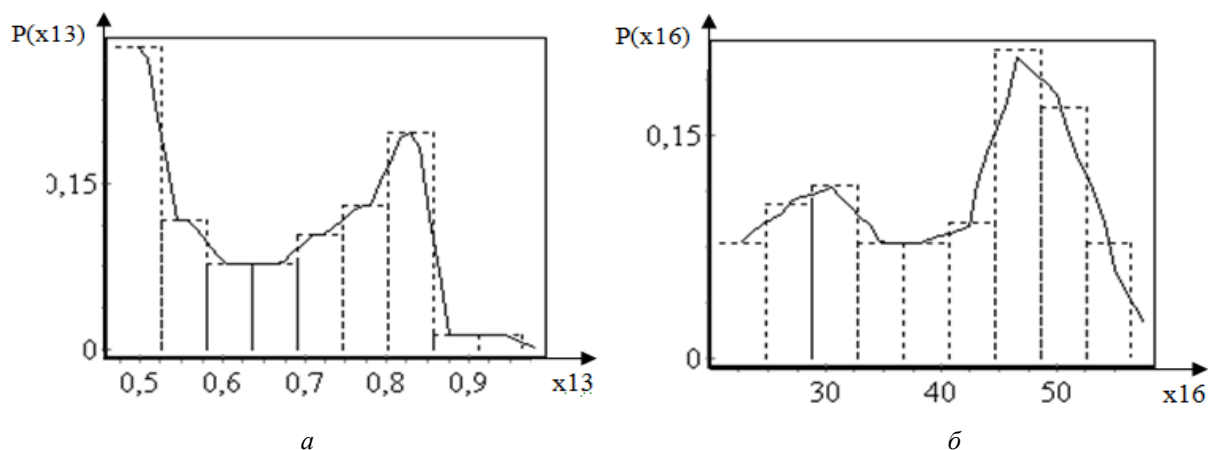
Пусть $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – n -мерный вектор параметров, определяющий качество того или иного изделия. Тогда имеется выборка $(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{n,j})$ (где s – объем выборки), состоящая из измерений тестовых параметров группы s изделий. Требуется на основании имеющейся информации провести предварительный анализ данных, в ходе которого исследовать все возможные зависимости между переменными, и оценить необходимость проведения распознавания образов.

В ходе предварительного анализа данных были построены оценки плотности распределения вероятности для каждой переменной. Ниже в качестве примера приведены графики оценок плотностей распределения по данным диагностических испытаний уже-сточенного контроля показателя напряжения насыщения «коллектор–эмиттер» x_{13} (рис. 4, а) и статического коэффициента передачи тока x_{16} (рис. 4, б).

Таблица 1

Виды измерений транзистора

Обозначение переменной	Пояснение – вид испытания
x1	Обратный ток коллектора при $U_к = 40$ В $I_{кбо}$ не более 2 мА
x2	Обратный ток коллектора при $U_к = 100$ В $I_{кбо}$ не более 3 мА
x3	Обратный ток эмиттера при $U_{эб} = 4$ В $I_{кбо}$ не более 4 мА
x4	Напряжение насыщения «база–эмиттер» при $I_б = 100$ мА $U_{бн}$ не менее 0,05 В и не более 0,999 В
x5	Напряжение насыщения «база–эмиттер» при $I_б = 316$ мА $U_{бн}$ не менее 0,05 В и не более 0,999 В
x6	Напряжение насыщения «база–эмиттер» при $I_б = 999$ мА $U_{бн}$ не менее 0,7 В и не более 1 В
x7	Напряжение насыщения «база–эмиттер» при $I_б = 100$ мА, $I_к = 1$ А $U_{бн}$ не менее 0,2 В и не более 0,98 В
x8	Напряжение насыщения «база–эмиттер» при $I_б = 316$ мА, $I_к = 3,16$ А $U_{бн}$ не менее 0,3 В и не более 1 В
x9	Напряжение насыщения «база–эмиттер» при $I_б = 999$ мА, $I_к = 9,99$ А $U_{бн}$ не менее 1 В и не более 1,6 В
x10	Напряжение насыщения «коллектор–эмиттер» при $I_б = 10$ мА, $I_к = 100$ мА $U_{кн}$ более 0,2 В
x11	Напряжение насыщения «коллектор–эмиттер» при $I_б = 100$ мА, $I_к = 1$ А $U_{кн}$ не менее 0,01 В и более 0,9 В
x12	Напряжение насыщения «коллектор–эмиттер» при $I_б = 316$ мА, $I_к = 3,16$ А $U_{кн}$ не менее 0,01 В и более 0,9 В
x13	Напряжение насыщения «коллектор–эмиттер» при $I_б = 999$ мА, $I_к = 9,99$ А $U_{кн}$ не менее 0,3 В и более 1,19 В
x14	Статический коэффициент передачи тока при $U_к = 1$ В, $I_э = 10$ мА $h_{21э}$ не менее 8
x15	Статический коэффициент передачи тока при $U_к = 1$ В, $I_э = 3,16$ А $h_{21э}$ не менее 20 и не более 165
x16	Статический коэффициент передачи тока при $U_к = 1$ В, $I_э = 9,99$ А $h_{21э}$ не менее 12 и не более 90

Рис. 4. Гистограммы и оценки плотности распределения вероятности переменных x_{13} и x_{16}

Анализ построенных распределений частот и оценки плотностей показывает смещенность основных числовых характеристик, отсутствие унимодальности распределений. Наличие многомодальности плотностей указывает на то, что имеет смысл разделение исходной выборки на группы объектов, сходные по некоторым свойствам.

Результаты классификации реальных данных. Для диагностики транзисторов проведем классификацию всех имеющихся наблюдений с целью выявления групп транзисторов в пространстве диагностических показателей. Требуется собрать заданные 78 корпусов транзисторов в кластеры по 16 параметрам, характеризующим их качество.

Приведены результаты классификации методом кристаллизации, приведенным ранее. Согласно результатам таблицы, полученной в результате классификации, можно сказать, что для данных, включающих 78 наблюдений, оптимальным является решение, где вся выборка делится на 2 класса, соответствующих транзисторам различного качества. Получим также таблицу принадлежности каждого элемента к конкретным кластерам, в которой можно увидеть, что к первому кластеру принадлежат 35 транзисторов, а ко второму – 43. Ниже приведены средние значения переменных для каждого кластера (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что при классификации наибольшее различие наблюдается по значениям признаков x_2 , x_3 , x_{10} – x_{14} .

В результате можно сказать, что в наибольшей степени данное разделение по кластерам проявляется в различиях значений статического коэффициента передачи тока. При этом чем больше коэффициент $h_{21э}$ (переменные x_{14} – x_{16}), тем, естественно, больше усиление входного сигнала. Таким образом, транзисторы разделены на группы, где в первую группу попали более качественные транзисторы (с меньшим значением $I_{кбо}$ (что говорит об устойчивости транзистора в работе) и большими усилительными свойствами).

Таким образом, выборки данных измерений качества транзисторов были разделены на классы, которые отличаются различными значениями большинства па-

раметров, что может соответствовать различным уровням качества рассматриваемых изделий (транзисторов).

Таблица 2

Средние значения центров классов

Признак	Класс	
	1	2
x_1	0,0040	0,0040
x_2	0,0404	0,0603
x_3	0,0008	0,0007
x_4	0,7065	0,7063
x_5	0,7568	0,7576
x_6	0,8322	0,8346
x_7	0,7560	0,7613
x_8	0,8837	0,8940
x_9	1,2403	1,2615
x_{10}	0,0359	0,0520
x_{11}	0,1056	0,1082
x_{12}	0,2571	0,2531
x_{13}	0,6890	0,6858
x_{14}	45,9140	26,1286
x_{15}	72,4023	41,4343
x_{16}	50,0600	32,2189

При анализе различных реальных данных часто возникает необходимость в задаче группировки данных, что приводит к появлению кластеров в пространстве параметров, характеризующих качество изделия. В данном примере в классе годных изделий в результате диагностических испытаний транзисторов явно выделяются две группы, которые условно можно назвать «хорошими» и «очень хорошими». Исходя из этого, появляется возможность изготавливать ЭРИ того или иного заданного качества. Предложен алгоритм решения задачи кластеризации, который не требует знания количества классов. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы для создания моделей «реальности», т. е. генерации данных, которые должны быть максимально подобными исследуемой выборке. На основании анализа результатов модельных и реальных данных могут быть сделаны выводы об обоснованности и качестве проведенной классификации.

Библиографические ссылки

1. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (29). С. 4–9.
2. Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем. М. : Наука, 1970. 252 с.
3. Орлов А. И. Нечисловая статистика. М. : МЗ-Пресс, 2004.
4. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск : Изд-во Ин-та математики, 1999. 270 с.
5. Данилин Н. С. Диагностика и контроль качества изделий цифровой микроэлектроники. М. : Изд-во стандартов. 1991. 176 с.

References

1. Medvedev A. V. [Theory of nonparametric system. Processes]. *Vestnik SibGAU*. 2010, no. 3 (29), p. 4–9.
2. Cypkin Ja. Z. *Osnovy teorii obuchajushhihsja system* (Fundamentals of the theory of learning systems). Moscow, Nauka, 1970, 252 p.
3. Orlov A. I. *Nechislovaja statistika* (Non-numeric statistics). Moscow, M3-Press, 2004.
4. Zagoruiko N. G. *Prikladnye metody analiza dannyh i znaniy* (Applied methods of data analysis and knowledge). Novosibirsk, Publish Mathematics Institute, 1999, 270 p.
5. Danilin N. S. *Diagnostica i control kachestva izdelii cifrovoj mikroelektroniki* (Diagnostics and quality control of digital microelectronics products). Moscow, Standards Publisher, 1991.

© Коплярова Н. В., Орлов В. И., 2014

УДК 621.396.6

СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАТОРОВ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

С. С. Красненко¹, А. В. Пичкалев¹, Д. А. Недорезов¹, А. Ю. Лапин¹, О. В. Непомнящий²

¹ ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: t_150@list.ru

² Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: 2955005@gmail.com

Изложены результаты анализа основных проблем создания имитаторов навигационных сигналов. Рассмотрены принципы организации испытательных комплексов для тестирования и наземных испытаний навигационных приемников космических аппаратов. Исследованы используемые и перспективные методы формирования навигационного сигнала в действующих имитаторах. Предложен подход к реализации многоканальных имитаторов на основе ПЛИС и магистрально-модульного построения отладочного комплекса. Представлен способ реализации навигационного процессора на кристалле ПЛИС. Предложено перспективное решение для создания совмещенной схемы имитатора орбитальных навигационных приемников.

Ключевые слова: навигационный приемник, имитатор радионавигационного сигнала, принципы синтеза сигнала, цифровой синтез, модульные приборы.

METHODS OF REALIZATIONS OF SATELLITE RADIONAVIGATION SYSTEM SIMULATORS

S. S. Krasnenko¹, A. V. Pichkalev¹, D. A. Nedorezov¹, A. U. Lapin¹, O. V. Nepomnyashchy²

¹JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation
E-mail: t_150@list.ru

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: 2955005@gmail.com

The results of the analysis of creation simulators of navigation signals are presented. The principles of the design of systems for testing and ground debug of spacecraft's navigational receivers are discussed. Present and promising methods of a navigation signal forming in existing simulators are considered. The approach for multi-channel

simulators development based on FPGA and bus-modular systems debug is presented. The way of implementation of the navigational processor on-FPGA chip is suggested. A promising solution for the combined circuit simulator of orbital navigation receivers is proposed.

Keywords: navigation receiver, simulator of a radio navigation signal, principles of signal synthesis, digital synthesis, modular devices.

На сегодняшний день уровень развития спутниковых радионавигационных систем (СРНС) позволяет обеспечить координатно-временными параметрами космические аппараты (КА), находящиеся на геостационарных (ГСО) и высокоэллиптических орбитах. Для этого в ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева на основе соответствующих методов позиционирования был разработан специализированный радионавигационный приемник [1]. Его установка на КА, находящихся на ГСО, обеспечила контроль полета в автоматическом режиме, а точность позиционирования увеличилась до нескольких сотен метров, заменив дорогостоящую астрономическую обсервацию с точностью позиционирования несколько километров.

Для проверки, отладки и метрологической сертификации навигационных приемников (НП) [2], в том числе специализированных (орбитальных), необходима сертифицированная контрольно-испытательная аппаратура, в состав которой в обязательном порядке должен входить имитатор радионавигационных сигналов (ИРНС), эмулирующий реальное функционирование НП. ИРНС для проверки функционирования приемников формирует как единичные навигационные сигналы (НС) с известными параметрами для проверки каналов приема, так и сигналы от навигационных космических аппаратов (НКА) СРНС ГЛОНАСС и GPS для проверки НП на выполнение своей целевой задачи. Также при помощи ИРНС производится измерение погрешности определения навигационных параметров. Принципам построения ИРНС и способом формирования НС и посвящена данная статья.

Самый очевидный способ реализации ИРНС – раздельный поканальный синтез НС, когда навигационные сигналы формируются специальными цифровыми синтезаторами (ЦС) или некими их аналогами, сглаживаются фильтрами нижних частот (ФНЧ), переносятся в высокочастотную (ВЧ) область раздельно для каждого канала и затем суммируются в сигнал, имитирующий требуемую навигационную обстановку (рис. 1). Данный способ позволяет калибровать и настраивать каждый канал синтеза сигнала, а также раздельно управлять тактовыми частотами синтезаторов сигнала для имитации эффекта Доплера. Это позволяет весьма качественно генерировать единичные навигационные сигналы. Однако в этом способе реализации имеется один существенный минус – «рассогласованность» (метрологическая неидентичность) каналов и, как следствие, различное время прохождения сигналов в каналах. Стоит отметить, что разность прохождения сигналов в каждом радиотракте (межканальное расхождение) в 10 нс дает погрешность определения координат около трех метров. Данный недостаток можно частично устранить при помощи введения обратных связей, схем управления и синхронизации, тем самым уменьшив межканальное расхождение сигнала до 1 нс, а погрешность до 30 см, но это значительно усложняет конструкцию имитатора и, следовательно,

удорожает его производство. Самотестирование и самокалибровка таких приборов после включения займет порядка 30–40 мин. А стоимость (например, имитаторов Spirent Communications GSS8000, GSS7790, GSS7600, где применяется раздельный поканальный синтез НС) доходит до 900 млн руб.

Реализация полного цифрового синтеза НС с суммированием сигнала от каждого синтезатора на промежуточной частоте (ПЧ) и последующим переносом группы сигналов в ВЧ-область практически устраняет метрологическую неидентичность каналов, присущую раздельному поканальному синтезу. В этом способе дискретные синтезаторы тактируются одной частотой F_t , из-за чего перестройка частоты при имитации эффекта Доплера идет с дискретизацией, определяющейся F_t и характеристиками самих синтезаторов (рис. 2). Данный способ довольно прост в реализации и является относительно недорогим, но возникает сложность обеспечения согласованной работы каналов цифрового синтеза на ПЧ. Если при разработке топологии печатной платы и конструкции прибора учесть все разности прохождения тактового и навигационного сигналов от каждого синтезатора до сумматора, а также встроить схемы фазовой автоподстройки частоты, то можно уменьшить погрешность позиционирования от межканального расхождения сигналов до 1–2 м без сложных схем синхронизации и калибровки и при условии не более шести каналов имитации. Так разрабатывались первые серийные ИРНС, такие как, например, 6-канальный МРК-40 ОАО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск) или 4-канальный СН-3802 ЗАО «КБ «Навис» (г. Москва). Однако так как все современные НП имеют 12 и более каналов приема НС, такие ИРНС уже не обеспечивают всей полноты проверки навигационных приемников.

Проблему увеличения числа каналов имитации НС без использования сложных схем синхронизации и калибровки может решить интегрирование синтезаторов и сумматора в единую цифровую схему, что обеспечивает согласованную работу всех каналов синтеза НС (рис. 3) [3].

Современные технологии позволяют организовать прямой полный цифровой синтез и суммирование НС в цифровом виде с достаточно большим частотным разрешением. Это позволяет избежать рассогласованной работы каналов синтеза НС. В качестве носителя единой цифровой схемы можно использовать кристалл программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Современные быстродействующие ПЛИС позволяют интегрировать большое число синтезаторов, организовывать генерацию и суммирование НС в режиме реального времени. Суммарный НС в цифровой форме можно подавать на вход быстродействующего цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и переносить в ВЧ-область обычным преобразователем частоты вверх.

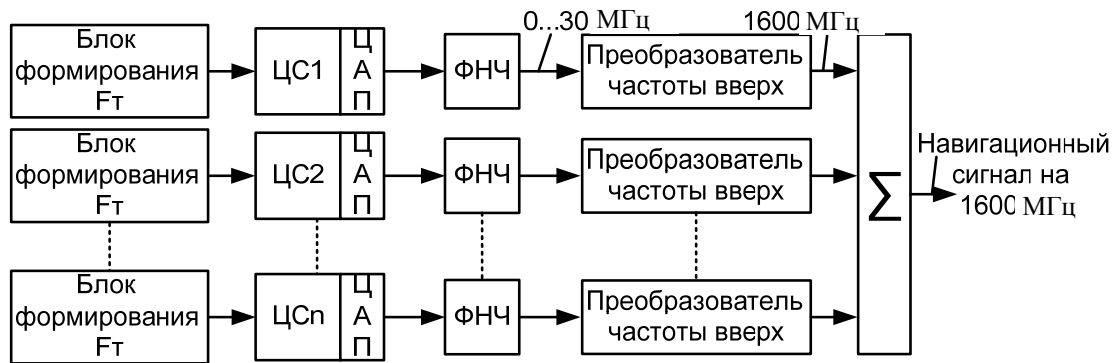


Рис. 1. Формирование НС с разделным поканальным синтезом

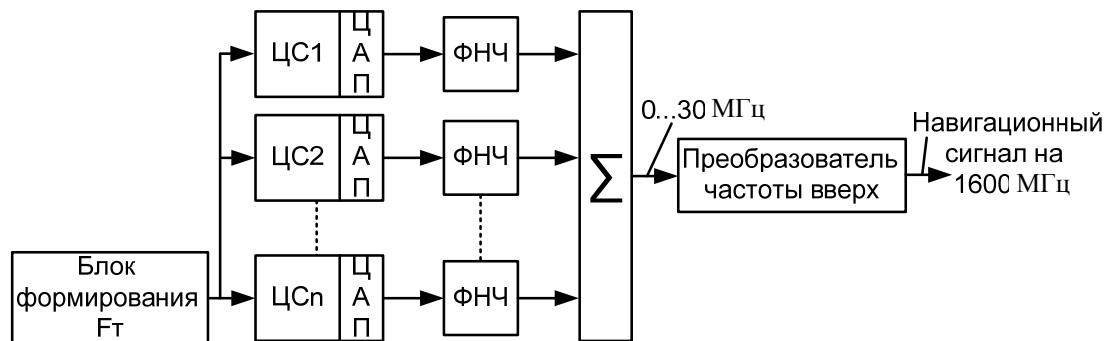


Рис. 2. Формирование НС дискретными синтезаторами на ПЧ

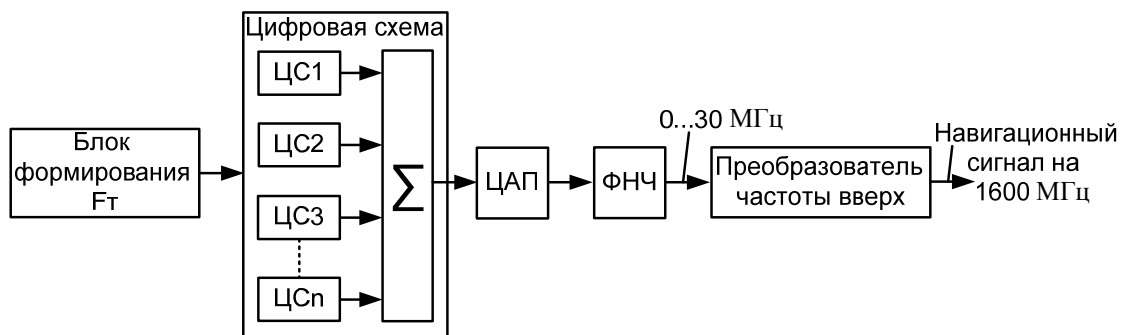


Рис. 3. Формирование НС интегрированными синтезаторами

Единственным недостатком данного способа является наличие существенной погрешности перестройки частоты при имитации эффекта Доплера (впрочем, не превышающей аналогичную погрешность предыдущего способа). Перестройка осуществляется с дискретным шагом, определяющимся частотой тактирования и характеристиками интегрированных синтезаторов, т. е. дальность между НП и НКА по средством НС описывается с помощью специальной кусочно-линейной аппроксимации. Так как распознавание НС в НП осуществляется путем определения максимума корреляционной функции, то этот недостаток можно частично компенсировать путем применения усредняющей аппроксимации.

Можно сразу учесть все погрешности дискретизации, если заранее синтезировать весь спектр НС в цифровом виде, а затем перевести его в аналоговый

вид сверхбыстродействующим ЦАП с последующим переносом его в ВЧ-область. Для получения полного НС в цифровом виде можно использовать вычислительные машины различного назначения, а в качестве сверхбыстродействующего ЦАП с преобразователем частоты вверх – программируемый векторный генератор (рис. 4).

Единственным условием успешного формирования НС программным синтезом является обеспечение своевременной подачи рассчитанных значений в ЦАП. Значит, необходимо обеспечить быстрый расчет параметров НС и их непрерывную передачу с соответствующей скоростью, либо (если расчёт с передачей в реальном времени организовать не удастся) полученные значения сигнала необходимо записывать на носитель больших цифровых массивов, после чего по скоростному каналу связи непрерывно передавать данные с носителя на ЦАП.

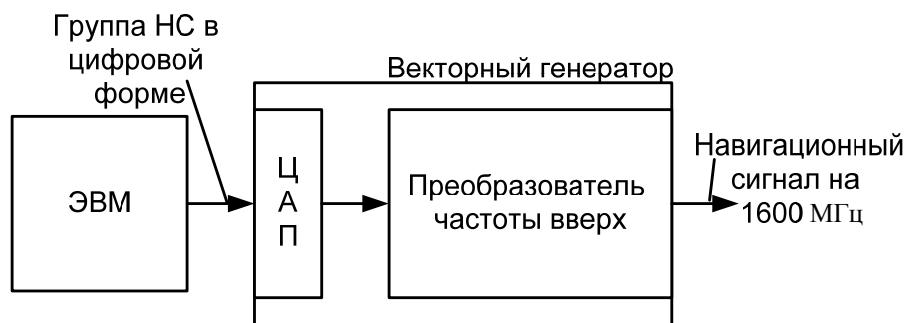


Рис. 4. Формирование НС программным синтезом на векторном генераторе

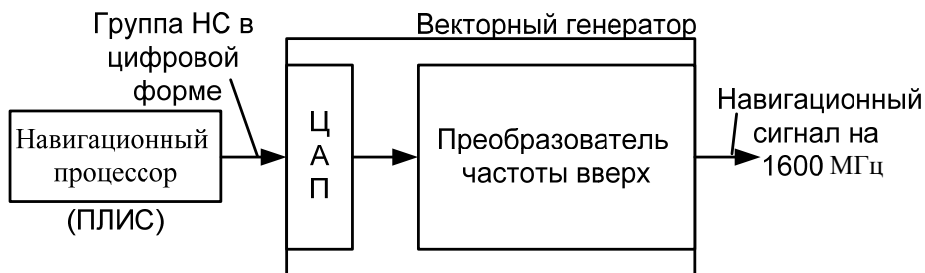


Рис. 5. Формирование НС на векторном генераторе навигационным процессором

Проблему быстрого расчёта и передачи в реальном времени параметров НС может решить специальный навигационный процессор, который выполнит все необходимые действия и обеспечит всеми данными векторный генератор (рис. 5). Серийных микросхем таких специализированных процессоров для формирования радиосигналов пока немного, но можно реализовать его на ПЛИС. Данный способ позволяет создать весьма гибкую схему имитации НС, а современные быстродействующие ПЛИС позволят организовывать воспроизведение широкого спектра радиосигналов (и, соответственно, большого числа каналов имитации НС) в режиме реального времени. Данная схема считается наиболее перспективной при реализации ИРНС ГЛОНАСС/GPS для всех видов НП [4].

Для сокращения времени и стоимости разработки ИРНС целесообразно использовать их возможные модульные реализации [5]. Например, модуль PXIe-5641R производства National Instruments (NI), имеющий ПЛИС и по два независимых канала ЦАП и АЦП, хорошо подходит для разработки на его базе имитатора на интегрированных синтезаторах. Реализовав на ПЛИС модуля цифровое формирование НС и пропустив его через встроенные ЦАП, можно получить до 32 НС на ПЧ. Далее полученная группа сигналов переносится в необходимый ВЧ-диапазон модулем преобразователя частоты вверх NI PXI-5610. Управление и программирование производится в разработанной той же NI среде графического программирования LabVIEW, которая 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 [6].

Для способа программного синтеза НС прекрасно подходит векторный генератор сигналов NI PXI-5672. Данные модули устанавливаются в шасси (например NI PXIe-1075 с системным контроллером NI PXIe-8130). На системном контроллере – встроенном компьютере – производится расчет НС в цифровой форме. Далее по системной шине шасси сигнал передается на модуль ЦАП NI PXIe-5442 (из состава векторного генератора) для перевода в аналоговую форму, и далее через ВЧ-кабель сигнал поступает на преобразователь частоты вверх PXI-5610. Данный способ позволяет генерировать программно до 9 каналов НС в режиме реального времени. При необходимости большего числа каналов используется RAID-накопитель HDD-8264 с модулем NI 8262.

В настоящее время в ОАО «ИСС» используются для отладки и испытаний орбитальных НП оба ИРНС в модульном исполнении.

Использование современных технологий при создании имитаторов радионавигационных сигналов описанными выше способами позволит решить проблему испытаний специализированных НП, а при модульной реализации с гибким программным обеспечением можно в кратчайшие сроки производить доработку ИРНС для новых видов навигационной аппаратуры.

Библиографические ссылки

1. Двухсистемный навигационный приемник космического аппарата : пат. 112401: МПК G01C21/24 / Зубавичус В. А., Балабанов А. З., Комаров В. А. и др.
2. Непомнящий О. В., Шайдунов В. В., Вейсов Е. А. Проблемы и решения проектирования микропроцессорных модулей навигационной аппаратуры пользователей ГЛОНАСС // Вестник СибГАУ. 2009. № 4 (25). С. 14–18.

3. Красненко, С. С. Многоканальный цифровой синтез в имитаторах радионавигационных сигналов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». 2013. Т. 6, № 5. С. 521–526.

4. Красненко С. С., Пичкалев А. В. Способы формирования сигналов в радионавигационных имитаторах // Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека: Тезисы доклада 2-й 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. С. 75–77.

5. Красненко С. С., Пичкалев А. В. Имитатор радионавигационных сигналов в модульном исполнении // Решетневские чтения : матер. XIV Междунар. науч. конф. Красноярск, 2010. Ч. 1. С. 154–155.

6. 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. С. 43–44.

References

1. Zubavichus V. A., Balabanov A. Z., Komarov V. A., Marareskul D. I., Furmanov V. V., Cvetkova O. I., Udin V. A., Ankudinov A. V. *Dvukhsistemnyy navigatsionnyy priyemnik kosmicheskogo apparata* [Two-system navigation receiver spacecraft]. Patent RF no. 112401, MPK G01C21/24.

2. Nepomnyashchy O. V., Shaidurov V. V., Veisov E. A. *Vestnik SibGAU*. 2013, № 2 (48), p. 133–136.

3. Krasnenko S. S., Nedorezov D. A., Kashkin V. B., Hazagarov U. G., Pichkalev A. V. *Zurnal Sibirskogo Federalnogo Universiteta, seria "Tehnika I Tehnologiya"* (Siberian Federal University. Engineering & Technologies). 2013, vol. 6, no. 5, p. 521–526.

4. Krasnenko S. S., Pichkalev A. V. [Ways of signal formation in radionavigating simulators]. *Tezisu doklada II Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoi konferentsii posvachennoi 30-letiu zapuska na orbity pervogo navigacionnogo kosmicheskogo apparata "Glonass"; "Navigacionnue sputnikovue sistemu, ih rol i znachenie v zhizni sovremennogo cheloveka"* [Theses of the report 2nd International Scientific and Technical Conference devoted to the 30th anniversary of launching the into orbit of the first navigation of the spacecraft "Glonass"; "Navigation satellite systems, their role and importance in the life of modern man"]. Krasnoyarsk, 2012, 75 p. (In Russian).

5. Krasnenko S. S., Pichkalev A. V. *Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials of the XIV Intern. scientific. conf. "Reshetnev reading"], Krasnoyarsk, 2010, 154 p. (In Russian).

6. Krasnenko S. S., Nedorezov D. A. *Trydy XII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Intelekt i nauka"* [Proceedings of the XII Intern. scientific. conf. "Intelligence and science"], Zheleznogorsk 2012, 43 p. (In Russian).

© Красненко С. С., Пичкалев А. В., Недорезов Д. А., Лапин А. Ю., Непомнящий О. В., 2014

УДК 519.6

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАФОВ КЭЛИ ГРУПП ПОДСТАНОВОК*

А. А. Кузнецов, А. С. Кузнецова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kuznetsov@sibsau.ru

Представлен алгоритм для вычисления диаметра, среднего диаметра и функции роста графа Кэли конечной группы, заданной фиксированным множеством порождающих элементов. Доказана его корректность. На основе данного алгоритма предложена его параллельная версия для исследования графов Кэли групп подстановок. Созданный алгоритм может быть полезен при проектировании топологии многопроцессорной вычислительной системы (МВС). В этом случае модель МВС будет представлена в виде графа Кэли, в котором процессоры являются вершинами графа, а ребра соответствуют физическим соединениям между процессорами. Применение указанного алгоритма позволяет изучить характеристики рассматриваемого графа, что, в свою очередь, дает возможность оценить производительность МВС.

Ключевые слова: граф Кэли, многопроцессорная вычислительная система.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект Б 112/14).

A PARALLEL ALGORITHM FOR STUDY OF THE CAYLEY GRAPHS OF PERMUTATION GROUPS

A. A. Kuznetsov, A. S. Kuznetsova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: kuznetsov@sibsau.ru

An algorithm for computing the diameter, the average diameter and the growth function of the Cayley graph of a finite group given a fixed set of generators is presented. The correctness of the algorithm is proved. After that a parallel version of the algorithm for study of the Cayley graphs of permutation groups is presented. This algorithm can be useful in the design of the topology of a multiprocessor computing system (MCS). In this case the model of MCS will be presented as the Cayley graph in which the processors are the vertices of the graph and the edges correspond to physical connections between processors. Using of this algorithm allows us to study the characteristics of the Cayley graph to evaluate the performance of MCS.

Keywords: the Cayley graph, a multiprocessor computing system.

Определение графа Кэли было дано известным английским математиком Артуром Кэли в 1878 г. для представления алгебраической группы, заданной фиксированным множеством порождающих элементов.

В последние десятилетия теория графов Кэли развивается как отдельная большая ветвь теории графов. Графы Кэли находят применение как в математике, так и за ее пределами. Заметим, что известная задача по определению так называемого числа Бога кубика Рубика $3 \times 3 \times 3$, т. е. минимального количества поворотов граней кубика, за которое его можно собрать из любого начального положения, сводится к исследованию соответствующего графа Кэли [1].

Неожиданное применение графы Кэли нашли в информационных технологиях после пионерской работы 1986 г. С. Эйкерса и Б. Кришнамурти [2], которые впервые предложили применять указанные графы для представления компьютерных сетей, в том числе для моделирования топологий многопроцессорных вычислительных систем (МВС) – суперкомпьютеров. С тех пор данное направление активно развивается. Это связано с тем, что графы Кэли имеют много привлекательных свойств, из которых выделим их регулярность, вершинно-транзитивность, малые диаметр и степень при достаточно большом количестве вершин в графе. Кстати, такие базовые топологии сети, как «кольцо» и «гиперкуб», являются графами Кэли. Среди множества работ отдельно стоит отметить статью С. Шайбелла и Р. Стаффорда 1992 г. [3], в которой показано, что наряду с диаметром графа Кэли очень важное значение для производительности МВС имеет также средний диаметр графа.

Для вычисления диаметра графа требуется решить ряд задач дискретной оптимизации. В первую очередь необходимо найти кратчайшие пути, связывающие все пары вершин в графе. Затем из всех кратчайших путей выбрать наибольший путь, длина которого и будет являться диаметром графа. Соответственно, средний диаметр графа будет равен среднему арифметическому всех длин кратчайших путей.

Как известно, если граф задан в виде матрицы длин ребер, то задача по вычислению диаметра графа решается алгоритмом полиномиальной сложности. Специфика же графов Кэли такова, что в исходной ситуации известны только порождающие элементы и определяющие соотношения группы.

Чтобы вычислить диаметр графа Кэли, необходимо решить следующие задачи дискретной оптимизации. Сначала требуется найти для каждого элемента группы минимальное слово, т. е. представить элемент в виде комбинации из образующих наименьшей длины, после чего вычислить максимальную длину минимальных слов, которая и будет являться диаметром графа Кэли.

Поиск минимального слова в большой конечной группе является хотя и разрешимой, но достаточно сложной проблемой. Это связано с тем, что в общем случае задача по определению минимального слова в группе, а следовательно, и диаметра графа Кэли, как показали С. Ивен и О. Голдрейх в 1981 г., является NP-трудной [4]. Поэтому для эффективного решения задач оптимизации на графах Кэли, имеющих большое количество вершин, необходимо применять МВС. В связи с этим представляется актуальной проблема разработки параллельных алгоритмов для исследования графов Кэли частных классов групп.

Основные определения и понятия

Определение 1. Положим G – конечная группа и $X \subset G$. Множество $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ называют *порождающим множеством группы*, а его элементы – *порождающими* и записывают $G = \langle X \rangle$, если любой элемент из G можно представить в виде конечного произведения из порождающих:

$$G = \langle X \rangle \Rightarrow \forall g \in G \Rightarrow g = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \alpha_s, \text{ где } \alpha_i \in X.$$

Порождающее множество X называют также *алфавитом*, а порождающие элементы x_i – *буквами*.

Определение 2. Пусть g элемент из G и $g = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \alpha_s$, где $\alpha_i \in X$. Правую часть данного выражения мы будем называть *словом* и записывать $\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_s$. Множество всех слов над алфавитом X будем обозначать X^* .

Если необходимо подчеркнуть, что слово $v \in X^*$ соответствует элементу $g \in G$, то следует писать: v_g . Очевидно, что фиксированное слово v соответствует только лишь одному элементу группы.

Определение 3. Если два различных слова $v = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_r$ и $w = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_s$ представляют один элемент g группы G , т. е. $g = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_r$ и $g = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_s$, то выражение $\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_r = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_s$ (или $v_g = w_g$) называют *соотношением в G* .

Определение 4. Положим v произвольное слово из X^* . Количество букв, входящее в v , будем называть *длиной слова v* и обозначать $\text{length}(v)$.

Единица группы e будет представлена пустым словом, которое мы также обозначим e . По определению $\text{length}(e) = 0$.

На множестве порождающих введем отношение порядка « $\prec$ »:

$$\{x_1 \prec x_2 \prec \dots \prec x_m\}.$$

Определение 5. Пусть v и w произвольные слова из X^* . Будем говорить, что слово $v = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_r$ *меньше слова $w = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_s$* и записывать $v \prec w$, если имеет место одно из следующих утверждений:

- 1) $r < s$;
- 2) если $r = s$, тогда $\alpha_1 = \beta_1$, $\alpha_2 = \beta_2$, ..., $\alpha_{k-1} = \beta_{k-1}$, $\alpha_k \prec \beta_k$ для некоторого $1 \leq k \leq s$.

Данный способ упорядочивания элементов называют также *лексикографическим*.

Определение 6. Слово v будем называть *минимальным в G относительно введенного порядка*, если для любого другого слова w , удовлетворяющего условию $v_g = w_g$, будет выполняться $v \prec w$.

Определение 7. *Длиной $\text{length}(g, X)$ элемента g в алфавите X* будем называть длину минимального слова $v_g \in X^*$, представляющего данный элемент, т. е.

$$\text{length}(g, X) = \min\{\text{length}(v_g) \mid v_g \in X^*\}.$$

Определение 8. *Диаметром $\text{diam}(G, X)$ группы G относительно порождающего множества X* будем называть максимальную длину элементов данной группы. Другими словами:

$$\text{diam}(G, X) = \max\{\text{length}(g, X) \mid g \in G\},$$

или

$$\text{diam}(G, X) = \max\{\min\{\text{length}(v_g) \mid v_g \in X^*\} \mid g \in G\}.$$

Определение 9. Пусть $G = \langle X \rangle$. *Шаром $K_r(G, X)$ радиуса r группы G относительно X* будем называть множество

$$K_r(G, X) = \{g \in G \mid \text{length}(g, X) \leq r\}.$$

Таким образом, шар $K_r(G, X)$ радиуса r представляет собой все элементы группы G , длины которых относительно порождающего множества X не превышают r .

Определение 10. *Функция роста $\text{growth}(G, X, r)$ группы $G = \langle X \rangle$ от аргумента $r \in \{0\} \cup \mathbb{N}$* задается соотношением $\text{growth}(G, X, 0) = 1$ и $\text{growth}(G, X, r) = |K_r(G, X)| - |K_{r-1}(G, X)|$ при $r \in \mathbb{N}$.

Это означает, что каждое значение функции роста $\text{growth}(G, X, r)$ равно числу элементов группы $G = \langle X \rangle$ фиксированной длины r .

Определение 11. *Средним диаметром $\overline{\text{diam}}(G, X)$ конечной группы G* будем называть среднюю длину ее элементов в алфавите X . Другими словами:

$$\begin{aligned} \overline{\text{diam}}(G, X) &= \frac{\sum_{g \in G} \text{length}(g, X)}{|G|} = \\ &= \frac{\sum_{r=0}^{\text{diam}(G, X)} \text{growth}(G, X, r) \cdot r}{|G|}. \end{aligned}$$

Определение 12. *Графом $\Gamma = (V, E)$ называют совокупность двух множеств – множества вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ и множества ребер $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, где каждое ребро из E определяется неупорядоченной парой вершин $\{v_i, v_j\}$.*

Отметим, что приведенная выше формулировка определяет *неориентированный* граф. Если же каждое ребро графа задается упорядоченной парой (v_i, v_j) вершин, то такой граф называют *ориентированным*.

Далее под графом будем понимать неориентированный граф. Пусть v_1 и v_2 – вершины графа, e_1 – соединяющее их ребро. Тогда вершина v_1 и ребро e_1 *инцидентны*, ребро e_1 и вершина v_2 также инцидентны. Два ребра, инцидентные одной вершине, называются *смежными*; две вершины, инцидентные одному ребру, также называются *смежными*.

Степенью вершины называют число инцидентных ей ребер. Граф называют *регулярным степени k* , если каждая его вершина имеет степень k .

Порядок графа определяется числом его вершин $|V|$.

Определение 13. *Аutomорфизмом графа $\Gamma = (V, E)$ называется отображение ϕ множества вершин на себя, сохраняющее смежность, т. е. если $\{u, v\} \in E$, то будет верно $\{\phi(u), \phi(v)\} \in E$.*

Определение 14. Граф $\Gamma = (V, E)$ называют *вершинно-транзитивным*, если для любых двух вершин $u, v \in V$ существует автоморфизм ϕ , при котором $\phi(u) = v$.

Определение 15. *Маршрутом в графе $\Gamma = (V, E)$* называют последовательность вершин и ребер из Γ

$$v_{i_1}, e_{i_1}, v_{i_2}, e_{i_2}, \dots, e_{i_p}, v_{i_{p+1}},$$

в которой любые два соседних элемента инцидентны, причем однородные элементы (вершины, ребра) через один смежны или совпадают. Число ребер маршрута p называют его *длиной*. Если все ребра различны, то маршрут называют *цепью*.

Граф является *связным*, если между любыми его двумя вершинами существует маршрут.

Определение 16. Расстоянием $d(u, v)$ между вершинами u и v в графе Γ будем называть длину кратчайшей цепи, связывающей эти две вершины.

Определение 17. Диаметром $\text{diam}(\Gamma)$ графа Γ называется расстояние между двумя наиболее удаленными вершинами в графе, т. е.

$$\text{diam}(\Gamma) = \max\{d(u, v) \mid u, v \in V\}. \quad (1)$$

Определение 18. Средним диаметром $\overline{\text{diam}}(\Gamma)$ конечного непустого графа $\Gamma = (V, E)$ будем называть среднее расстояние между его вершинами. Другими словами:

$$\overline{\text{diam}}(\Gamma) = \frac{\sum_{u, v \in V} d(u, v)}{|V|^2}. \quad (2)$$

Определение 19. Пусть X – порождающее множество группы G , т. е. $G = \langle X \rangle$. Графом Кэли $\Gamma = \text{Cay}(G, X) = (V, E)$ называют ориентированный граф, обладающий следующими свойствами:

1) множество вершин $V(\Gamma)$ соответствуют элементам группы G ;

2) множество ребер $E(\Gamma)$ состоит из всех упорядоченных пар (g, xg) , где $g \in G$ и $x \in X$.

В дальнейшем будем считать порождающее множество X симметричным и свободным от единичного элемента группы, т. е. $x \in X \Rightarrow x^{-1} \in X$ и $e \notin X$. Поскольку X является свободным от единичного элемента, то граф Γ не содержит петель. Симметричность порождающего множества означает, что граф будет неориентированным и без кратных ребер, т. е. если в графе имеется ребро из g в xg , то оно совпадает с ребром из xg в $x^{-1}(xg) = g$.

Таким образом,

$$\Gamma = \text{Cay}(G, X) = (V, E), \text{ где } V = G \text{ и}$$

$$E = \{(g, xg) \mid g \in G, x \in X\}.$$

Последовательный алгоритм А-I

В настоящем разделе будет представлен базовый алгоритм А-I для вычисления характеристик графа Кэли конечной группы, заданной фиксированным порождающим множеством.

Для обоснования корректности алгоритма А-I докажем сначала вспомогательные утверждения.

Лемма 1. Пусть $G = \langle X \rangle$ и $\Gamma = \text{Cay}(G, X)$ – граф Кэли группы G относительно X . Тогда

- (i) Γ является связным $|X|$ -регулярным графом;
- (ii) Γ является вершинно-транзитивным графом;
- (iii) $\forall g, h \in G \quad d(g, h) = \text{length}(hg^{-1}, X)$;

$$(iv) \text{diam}(\Gamma) = \text{diam}(G, X);$$

$$(v) \overline{\text{diam}}(\Gamma) = \overline{\text{diam}}(G, X).$$

Доказательство. (i) Так как X является порождающим множеством группы G , то граф Γ является связным, а в связи с тем, что X – симметричное порождающее множество, то каждая вершина в Γ имеет степень, равную $|X|$. Поэтому Γ является связным $|X|$ -регулярным графом.

(ii) Если u и v две произвольные смежные вершины в Γ , то $v = xu$ для некоторого $x \in X$. Отсюда следует, что для смежных вершин всегда найдется такой элемент $x \in X$, что $vu^{-1} = x$. Обратно, если u и v не являются смежными, то $vu^{-1} \notin X$.

На множестве вершин из Γ рассмотрим отображение ϕ_h такое, что $\phi_h(g) = gh$. Докажем, что ϕ_h сохраняет смежность, т. е. если u и v две смежные вершины, то $\phi_h(u)$ и $\phi_h(v)$ также будут являться смежными. Действительно,

$$\phi_h(v)\phi_h(u)^{-1} = vh(uh)^{-1} = vhh^{-1}u^{-1} = vu^{-1} \in X.$$

Если же u и v не являются смежными, то будет выполняться $\phi_h(v)\phi_h(u)^{-1} \notin X$, поэтому вершины $\phi_h(u)$ и $\phi_h(v)$ также не будут являться смежными. Так как отображение ϕ_h сохраняет смежность, то оно будет являться автоморфизмом графа Γ .

Положим $h = u^{-1}v$. Тогда $\phi_h(u) = \phi_{u^{-1}v}(u) = uu^{-1}v = v$. Следовательно, Γ является вершинно-транзитивным графом.

(iii) Пусть g и h – произвольные вершины в Γ . Согласно (i) данный граф является связным, а значит, существует путь, связывающий эти вершины. Предположим, что кратчайший путь имеет следующий вид: $g, \alpha_1 g, \alpha_2 \alpha_1 g, \dots, \alpha_s \dots \alpha_2 \alpha_1 g$ ($\alpha_i \in X$), т. е. $d(g, h) = s$. С другой стороны, $\alpha_s \dots \alpha_2 \alpha_1 = hg^{-1}$, следовательно, $\text{length}(hg^{-1}, X) = s$. Таким образом, между длинами элементов группы G и кратчайшими цепями в графе Γ имеется взаимно однозначное соответствие, в частности, имеет место равенство

$$\forall g, h \in G \Rightarrow d(g, h) = \text{length}(hg^{-1}, X). \quad (3)$$

(iv) Запишем формулу (1) с учетом (3):

$$\begin{aligned} \text{diam}(\Gamma) &= \max\{d(g, h) \mid g, h \in G\} = \\ &= \max\{\text{length}(hg^{-1}, X) \mid hg^{-1} \in G\} = \text{diam}(G, X). \end{aligned}$$

(v) Согласно (ii) граф Кэли является вершинно-транзитивным, и для любых двух его вершин u и v будет выполняться

$$\sum_{v \in V} d(u, v) = \sum_{u \in V} d(u, v). \quad (4)$$

С учетом (4) перепишем формулу (2):

$$\overline{\text{diam}}(\Gamma) = \frac{\sum_{u, v \in V} d(u, v)}{|V|^2} = \frac{|V| \sum_{v \in V} d(u, v)}{|V|^2} = \frac{\sum_{v \in V} d(u, v)}{|V|}.$$

Пусть $u = e$ – единица G . Поскольку $V = G$, а также в силу (3), получим

$$\overline{\text{diam}}(\Gamma) = \frac{\sum_{v \in V} d(e, v)}{|V|} = \frac{\sum_{g \in G} \text{length}(g, X)}{|G|} = \overline{\text{diam}}(G, X).$$

Беря во внимание свойства (ii) и (iii) вышеприведенной леммы, мы можем определить функцию роста графа Кэли $\text{growth}(\Gamma, r) = \text{growth}(G, X, r)$, которая задает количество вершин в графе, удаленных от любой заданной вершины на расстояние r .

Ниже представлен последовательный алгоритм для исследования графов Кэли конечных групп. Данный алгоритм можно распараллелить для эффективной реализации на МВС.

Вход: $G = (G, \cdot)$ – конечная группа и $X = \{x_1 < x_2 < \dots < x_m\}$ – упорядоченное порождающее множество G .

Выход: диаметр $\text{diam}(\Gamma)$, средний диаметр $\overline{\text{diam}}(\Gamma)$ графа Кэли $\Gamma = \text{Cay}(G, X)$, а также функция роста графа $\text{growth}(r) = \text{growth}(\Gamma, r)$, $0 \leq r \leq \text{diam}(\Gamma)$.

1. $s = 0$, $K_s = K_s(G, X) = \{e\}$ – шар группы G , $T = K_s$.
2. $s = s + 1$, $K_s = K_{s-1}$, $U = x_1 \cdot T \cup x_2 \cdot T \dots \cup x_m \cdot T$ – лексикографически упорядоченное множество.
3. $T = \emptyset$, $i = 1$.
4. Если $u_i \notin K_s$, то $K_s = K_s \cup u_i$, $T = T \cup u_i$.
5. Если $\begin{cases} i < |V|, & \text{то } i = i + 1, \text{ переход в пункт 4;} \\ i = |V|, & \text{то переход в пункт 6.} \end{cases}$
6. Если $\begin{cases} T \neq \emptyset, & \text{то переход в пункт 2;} \\ T = \emptyset, & \text{то переход в пункт 7.} \end{cases}$
7. $\text{diam}(\Gamma) = s - 1$, $\text{growth}(r) = |K_r| - |K_{r-1}|$ для $1 \leq r \leq s - 1$ и $\text{growth}(0) = 1$, $\overline{\text{diam}}(\Gamma) = \frac{\sum_{r=0}^{s-1} \text{growth}(r) \cdot r}{|K_{s-1}|}$.

Возврат полученных значений.

Теорема. Алгоритм А-I корректен, т. е. для любой конечной группы он за конечное число шагов находит характеристики соответствующего графа Кэли.

Доказательство. По построению А-I выражает каждый элемент группы G в виде уникального минимального слова. После каждого прохода от пункта 2 до пункта 6 множество K_s будет представлять собой шар радиуса s группы G в алфавите X . Поскольку количество элементов группы конечно, то через конечное число шагов все $g \in G$ будут записаны в формате минимальных слов, длины которых меньше s :

$$\forall g \in G \Rightarrow \exists! u_g \in K_{s-1} \Rightarrow \forall v_g \notin K_{s-1} \Rightarrow u_g < v_g.$$

Это означает, что $\text{diam}(G, X) = s - 1$ и K_{s-1} однозначно определяет функцию роста группы G в алфавите X . Как было сказано, $\text{growth}(\Gamma, r) = \text{growth}(G, X, r)$. По лемме 1 диаметр и средний диаметр графа Кэли Γ группы $G = \langle X \rangle$ равны соответствующим характеристикам G . Теорема доказана.

Параллельная версия алгоритма А-I для графов групп подстановок

Для увеличения скорости вычислений алгоритм А-I можно распараллелить следующим образом. Множество $K_s(S_n, X_n)$ разбивается на $m = n(n-1)(n-2) \dots (n-k+1)$ непересекающихся классов элементов (подстановок):

$$K_s = \bigcup_{i=1}^m K_i, K_i \cap K_j = \emptyset \text{ при } i \neq j.$$

Каждый класс K_i будет однозначно определяться фиксированным набором значений $(i_1, i_2, \dots, i_k)$, т. е.

$$\forall g \in K_i \Rightarrow g = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & k & \dots & n \\ i_1 & i_2 & \dots & i_k & \dots & i_n \end{pmatrix}.$$

Аналогичным образом массив U при каждом s также делится на m непересекающихся классов элементов:

$$U = \bigcup_{i=1}^m U_i, U_i \cap U_j = \emptyset \text{ при } i \neq j,$$

и дальнейшая обработка данных для каждой пары множеств U_i и K_i (пункты 4–5 алгоритма А-I) производится независимо.

Нетрудно заметить, что рассмотренное разделение массивов не влияет на корректность работы алгоритма.

Параметр k определяется экспериментально и зависит от строения группы, а также от характеристик МВС.

Таким образом, представленный выше параллельный алгоритм, как показали вычисления на МВС [5], дает существенный прирост скорости вычислений.

В будущем на основе данного алгоритма планируется провести серию экспериментов по исследованию графов Кэли различных классов групп с целью поиска перспективных топологий для МВС.

Библиографические ссылки

1. Holt D., Eick B., O'Brien E. Handbook of computational group theory. Boca Raton : Chapman & Hall/CRC Press, 2005. 514 p.
2. Akers S., Krishnamurthy B. A group theoretic model for symmetric interconnection networks // Proceedings of the International Conference on Parallel Processing, 1986. P. 216–223.
3. Schibell S., Stafford R. Processor interconnection networks and Cayley graphs // Discrete Applied Mathematics. 1992. Vol. 40. P. 337–357.
4. Even S., Goldreich O. The Minimum Length Generator Sequence is NP-Hard // J. of Algorithms. 1981. Vol. 2. P. 11–313.
5. Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. О взаимосвязи функций роста в симметрических группах с задачами комбинаторной оптимизации // Вестник СибГАУ. 2012. № 6 (46). С. 93–97.

References

1. Holt D., Eick B., O'Brien E. Handbook of computational group theory. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press, 2005. 514 p.

2. Akers S., Krishnamurthy B. A group theoretic model for symmetric interconnection networks. Proceedings of the International Conference on Parallel Processing, 1986. P. 216–223.

3. Schibell S., Stafford R. Processor interconnection networks and Cayley graphs. Discrete Applied Mathematics. 1992. Vol. 40. P. 337–357.

4. Even S., Goldreich O. The Minimum Length Generator Sequence is NP-Hard. Journal of Algorithms. 1981. Vol. 2. P. 311–313.

5. Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. [Relation between growth functions in symmetric groups and tasks of combinatorial optimization]. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 6 (46), p. 93–97.

© Кузнецов А. А., Кузнецова А. С., 2014

УДК 519.7

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КРИВОЙ РЕГРЕССИИ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ВЫБОРОК*

А. В. Лапко^{1,2}, В. А. Лапко^{1,2}, Д. В. Борисов¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: valapko@yandex.ru

²Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44. E-mail: lapko@icm.krasn.ru

Предлагается методика построения непараметрической регрессии в условиях обучающих выборок большого объема. Синтез модели основывается на декомпозиции исходных статистических данных и анализе вероятностных характеристик получаемых множеств случайных величин. Исследуются асимптотические свойства непараметрической регрессии и рассматриваются результаты вычислительного эксперимента. Устанавливается зависимость свойств непараметрической регрессии от количества интервалов дискретизации значений случайной величины и объема исходных данных. Проводится сравнение аппроксимационных свойств предлагаемой модели и традиционной непараметрической регрессии. Результаты исследований имеют важное значение при решении задач доверительного оценивания плотности вероятности и кривой регрессии.

Ключевые слова: непараметрическая регрессия, плотность вероятности, регрессионная оценка, аппроксимационные свойства, методы дискретизации.

NONPARAMETRIC ESTIMATION OF REGRESSION CURVES IN THE CONDITIONS OF LARGE SAMPLES*

A. V. Lapko^{1,2}, V. A. Lapko^{1,2}, D. V. Borisov¹

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: valapko@yandex.ru

²Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: lapko@icm.krasn.ru

The technique of construction of a nonparametric regression in the conditions of training samples of large volume is offered. Model synthesis is based on decomposition of initial statistical data and the analysis of probabilistic characteristics of received random variables sets. Asymptotic properties of a nonparametric regression are investigated and results of computing experiment are considered. Association of nonparametric regression properties on an amount of sampling intervals of values of a random variable and volume of input datas is established. Comparison of approximating properties of offered model and a traditional nonparametric regression is spent. The results of researches are important to the solution of problems of a confidential estimation of a probability density and a regression curves.

Keywords: nonparametric regression, probability density, regression estimations, approximating properties, sampling methods.

* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ (СибГАУ № Б121/14).

Вычислительная эффективность непараметрических алгоритмов обработки информации во многом определяется объемом статистических данных и снижается по мере его увеличения, что затрудняет построение систем принятия решений в условиях больших выборок [1; 2].

В подобной ситуации используются принципы декомпозиции исходных статистических данных по их объему и технологии параллельных вычислений. К этому направлению относится смесь непараметрических оценок плотностей вероятности для одномерных и многомерных случайных величин [3–7]. При этом сокращение времени вычислений сопоставимо с количеством составляющих смеси.

Полученные результаты обобщены при оценивании решающей функции в задаче распознавания образов для условий больших выборок. Разработаны двухуровневые непараметрические системы классификации [8; 9]. Установлены асимптотические свойства непараметрических оценок их уравнений разделяющих поверхностей для одномерного и многомерного случаев [10; 11]. Данный подход при восстановлении стохастических зависимостей предполагает разбиение обучающей выборки по её объёму. На этой основе осуществляется синтез семейства частных непараметрических регрессий с последующей их интеграцией в обобщённой модели [12; 13].

Перспективное направление «обхода» проблем больших выборок связано с использованием регрессионной оценки плотности вероятности. Её синтез основан на декомпозиции исходных статистических данных и последующем анализе количественных характеристик получаемого множества случайных величин [14–17].

Цель настоящего исследования состоит в разработке методики синтеза и анализа непараметрических моделей стохастических зависимостей в условиях больших выборок, которая основана на использовании регрессионной оценки плотности вероятности.

Синтез регрессионной оценки плотности вероятности

Пусть имеется выборка $V = (x^i, i = \overline{1, n})$ из n независимых значений одномерной случайной величины x с неизвестной плотностью вероятности $p(x)$.

Разобьем область определения $p(x)$ на N непересекающихся интервалов длиной 2β и сформируем множества случайных величин $X^j, j = \overline{1, N}$. В качестве характеристик X^j примем частоту $\bar{P}^j$ попадания случайной величины x в j -й интервал и его центр z^j . На основе полученной информации определим элементы выборки $V_1 = (z^j, y^j = \bar{P}^j / (2\beta), j = \overline{1, N})$, где z^j центры введенных интервалов и соответствующих им значений оценок y^j плотности вероятности. Границы области Δ изменения случайной величины x априори неизвестны и определяются минимальным и максимальными значениями исходных статистических

данных $V = (x^i, i = \overline{1, n})$. Поэтому центры интервалов $z^j, j = \overline{1, N}$ являются случайными величинами и имеют равномерный закон распределения $p_1(z) = (2\beta N)^{-1}$. Объем N полученной выборки V_1 значительно меньше объема n исходных статистических данных V . Выборка V_1 позволяет оценивание плотности вероятности $p(x)$ свести к задаче восстановления стохастической зависимости.

В качестве приближения по эмпирическим данным V_1 искомой плотности вероятности $p(x)$ примем статистику [14]

$$\bar{p}(x) = c^{-1} \sum_{j=1}^N \bar{P}^j \Phi\left(\frac{x - z^j}{c}\right), \quad (1)$$

которая является непараметрической оценкой условного математического ожидания

$$2\beta N \int y p(x, y) dy. \quad (2)$$

Здесь и далее бесконечные пределы интегрирования опускаются.

В регрессионной оценке плотности вероятности (1) ядерные функции $\Phi(u)$ удовлетворяют условиям H :

$$\Phi(u) = \Phi(-u), \quad 0 \leq \Phi(u) < \infty,$$

$$\int \Phi(u) du = 1, \quad \int u^2 \Phi(u) du = 1.$$

Коэффициенты размытости $c = c(N)$ ядерных функций характеризуют область их определения.

При синтезе $\bar{p}(x)$ в выражение (2) подставляется непараметрическая оценка

$$\bar{p}(x, y) = \frac{1}{n c c_1} \sum_{j=1}^N \Phi\left(\frac{x - z^j}{c}\right) \Phi\left(\frac{y - y^j}{c_1}\right) \quad (3)$$

совместной плотности вероятности $p(x, y)$.

Интегрируя выражение (2) при

$$\frac{1}{c_1} \int y \Phi\left(\frac{y - y^j}{c_1}\right) dy = y^j \text{ и } y^j = \frac{\bar{P}^j}{2\beta},$$

получим регрессионную оценку плотности вероятности (1).

В многомерном случае $x = (x_v, v = \overline{1, k})$ статистика (1) имеет вид

$$\bar{p}(x) = \frac{1}{c^k} \sum_{j=1}^{N^k} \bar{P}^j \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - z_v^j}{c}\right). \quad (4)$$

Регрессионные оценки плотности вероятности (1), (4) обладают свойствами асимптотической несмещённости и состоятельности [14]. Из условия минимума асимптотического выражения среднеквадратического отклонения $\bar{p}(x)$ от $p(x)$ определена процедура оптимального выбора количества интервалов дискретизации [18; 19]

$$\bar{N} = \sqrt{\Delta n \int p^2(x) dx}. \quad (5)$$

Количество интервалов дискретизации зависит от вида восстанавливаемой плотности вероятности, длины Δ интервала значений случайной величины и объёма n исходных статистических данных.

Непараметрическая оценка кривой регрессии

Пусть $V = (x^i, y^i, i = \overline{1, n})$ статистическая выборка независимых наблюдений одномерных случайных величин (x, y) , распределенных с неизвестной плотностью вероятности $p(x, y)$ и $p(x) > 0 \forall x \in \Omega(x)$. Априори вид однозначной стохастической зависимости $y = F(x)$ не задан.

В качестве её модели будем использовать условное математическое ожидание

$$\bar{y} = \phi(x) = \frac{1}{p(x)} \int y p(x, y) dy. \quad (6)$$

Решающая функция (6) является оптимальной в смысле минимума квадратического критерия [20].

При оценивании $p(x, y)$ используем технологию синтеза регрессионной оценки плотности вероятности типа (1). Для упрощения преобразований будем считать, что интервалы значений (x, y) одинаковы.

Тогда

$$\bar{p}(x, y) = c^{-2} \sum_{j=1}^{N^2} P^j \Phi\left(\frac{x-x^j}{c}\right) \Phi\left(\frac{y-y^j}{c}\right), \quad (7)$$

где N^2 – объем массива данных $(x^j, y^j, \bar{P}^j, j = \overline{1, N^2})$, формируемых на основе исходной статистической выборки $V = (x^i, y^i, i = \overline{1, n})$.

Значение $\bar{P}^j$ определяет частоту встречаемости наблюдений из V в элементе $(x^j \pm \beta, y^j \pm \beta)$ равномерной сетки в пространстве (x, y) .

Тогда с учетом

$$p\left(\frac{y}{x}\right) = \frac{p(x, y)}{p_1(x)} = 2 N \beta p(x, y)$$

непараметрическую оценку (6) представим в виде

$$\bar{y} = \bar{\phi}(x) = \frac{2 N \beta}{c} \sum_{i=1}^{N^2} y^i \bar{P}^i \Phi\left(\frac{x-x^i}{c}\right). \quad (8)$$

Исследуем свойство асимптотической несмещённости статистики (8). Пусть функции $\phi(x)$, $p(x, y)$ ограничены и непрерывны со всеми своими производными до 2-го порядка включительно. Ядерные функции $\Phi(u)$ удовлетворяют условиям H .

Определим частоту появления случайных величин в виде

$$\bar{P}^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h\left(\frac{x^j - x^i}{\beta}\right) h\left(\frac{y^j - y^i}{\beta}\right),$$

где

$$h(u) = \begin{cases} 1 & \forall |u| \leq 1, \\ 0 & \forall |u| > 1. \end{cases}$$

Наблюдения из выборки (x^i, y^i) , $i = \overline{1, n}$ имеют один и тот же закон распределения $p(z_1, z_2)$. Элементы массива данных (x^j, y^j) $j = \overline{1, N^2}$ характеризуются плотностью вероятности $p(t_1, t_2)$.

Тогда

$$M(\bar{\phi}(x)) = \frac{2 N^3 \beta}{c} \int \dots \int z_1 \Phi\left(\frac{x-z_2}{c}\right) h\left(\frac{z_2-t_2}{\beta}\right) \times \\ \times h\left(\frac{z_1-t_1}{\beta}\right) p(t_1, t_2) p(z_1, z_2) dt_1 \dots dz_2,$$

где M – знак математического ожидания.

Осуществим замену переменных $(z_1-t_1)/\beta = u_1$, $(z_2-t_2)/\beta = u_2$. С учетом $p(z_1, z_2) = (2\beta N)^2$ получим

$$M(\bar{\phi}(x)) = \frac{N \beta}{2c} \int \dots \int (\beta u_1 + t_1) \Phi\left(\frac{x-\beta u_2-t_2}{c}\right) \times \\ \times h(u_2) h(u_1) p(t_1, t_2) du_1 \dots dt_2 = \\ = \frac{N \beta}{2c} \iiint t_1 \Phi\left(\frac{x-\beta u_2-t_2}{c}\right) \times \\ \times h(u_2) p(t_1, t_2) du_2 dt_1 dt_2. \quad (9)$$

Обозначим $\phi(t_2) = M(t_1/t_2)$. Проведём замену $(x-\beta u_2-t_2)/c = u$. На этой основе преобразуем (9) к виду

$$M(\bar{\phi}(x)) = N \beta \iint \phi(x-\beta u_2-cu) \times \\ \times \Phi(u) h(u_2) p(x-\beta u_2-cu) du du_2.$$

Разложим функции $\phi(x-\beta u_2-cu)$, $p(x-\beta u_2-cu)$ в ряд Тейлора в точке x . Тогда при достаточно больших n приходим к утверждению

$$M(\bar{\phi}(x)) \sim \phi(x) \frac{p(x)}{p_1(x)} + \left(\frac{\beta^2}{3} + c^2 \right) \times \\ \times \left(\frac{\phi(x) p^{(2)}(x)}{2 p_1(x)} + \frac{\phi^{(1)}(x) p^{(1)}(x)}{p_1(x)} + \phi^{(2)}(x) p(x) \right) + \\ + \frac{\phi^{(2)}(x) p^{(2)}(x)}{6} \beta^2 + O(c^4, \beta^4, c^2 \beta^2). \quad (10)$$

Статистика (8) обладает свойством асимптотической несмещённости по отношению к оптимальному решающему правилу (6), если закон распределения исходной выборки наблюдений x равномерный, т. е. $p(x) = p_1(x)$. Это возможно при проведении активного эксперимента при исследовании зависимости $y = F(x)$.

Для устранения смещения необходимо умножить статистику (8) на отношение $p_1(x) / \bar{p}(x)$. В результате получим

$$\bar{\bar{\phi}}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N^2} y^i \alpha^i(x)}{\sum_{i=1}^{N^2} \alpha^i(x)}, \quad \alpha_i(x) = \bar{P}^i \Phi\left(\frac{x-x^i}{c}\right). \quad (11)$$

В многомерном случае при $x = (x_1, \dots, x_k)$ непараметрическая регрессия имеет вид

$$\bar{\bar{\phi}}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{N^{k+1}} y^i \alpha^i(x)}{\sum_{i=1}^{N^{k+1}} \alpha^i(x)}, \quad \alpha^i(x) = \bar{P}^i \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v}\right).$$

Анализ результатов вычислительных экспериментов

Исследовались свойства непараметрических моделей типа (8), (10) и традиционной непараметрической регрессии [20] методом вычислительного эксперимента. Исходные данные $(x^i, y^i, i = \overline{1, n})$ формировались в соответствии с примером работы [21]

$$y = F(x) = 1 - x + \exp(-200(x-0,5)^2). \quad (12)$$

Значения y^i вычислялись по формуле

$$y^i = F(x^i) + 2(0,5 - \varepsilon^i) F(x^i) r, \quad i = \overline{1, n}.$$

Случайная величина $\varepsilon \in [0; 1]$ имеет равномерный закон распределения, а r – уровень помех.

Оценка эффективности изучаемых моделей определялась критерием

$$\tilde{W} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left| \frac{F(x^j) - \bar{\Phi}(x^j)}{F(x^j)} \right|,$$

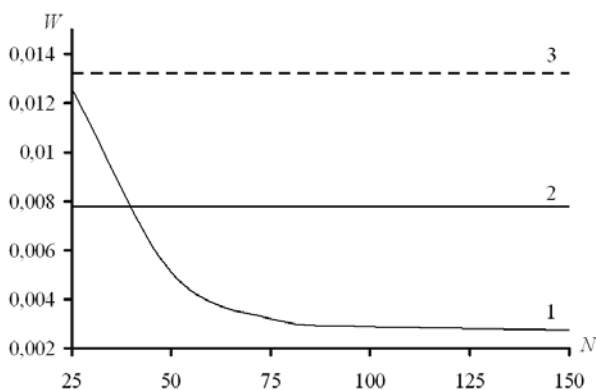
где m – объём контрольной выборки.

При построении непараметрических моделей в качестве ядерных функций использовалось ядро В. А. Епанечникова [22].

$$\Phi(u) = \begin{cases} \frac{3}{4\sqrt{5}} - \frac{3u^2}{20\sqrt{5}} & \forall |u| < \sqrt{5} \\ 0 & \forall |u| \geq \sqrt{5}. \end{cases}$$

Вычислительные эксперименты при фиксированных условиях исследования повторяются 20 раз. По полученным результатам вычислялись ошибки аппроксимации $\tilde{W}^t, t = \overline{1, 20}$ и среднее $\bar{W}$ их значение.

Установлено, что объём исходной выборки n может быть сокращён на порядок и выше. На такую же величину повышается вычислительная эффективность непараметрической регрессии. Обнаружена линейная зависимость между значениями уровня помех r и количеством N интервалов дискретизации.



Зависимость средней относительной ошибки аппроксимации $\bar{W}$ от количества интервалов дискретизации N при $n = 10000, r = 0,05$: кривая 1 соответствует модели $\bar{\Phi}(x)$ (11); прямые 2 и 3 характеризуют традиционную непараметрическую регрессию при объёме обучающей выборки $n = 500$ и $n = 200$

Точность аппроксимации непараметрической регрессии $\bar{\Phi}(x)$ (11) выше в два и более раза, чем со смещением (8). Традиционная непараметрическая регрессия менее устойчива к уровню помех.

С ростом количества N интервалов дискретизации аппроксимационные свойства статистики (11) улучшаются, что согласуется с результатами аналитических исследований (см. рисунок). Данный факт особенно проявляется при высоком уровне помех.

Непараметрическая модель стохастической зависимости (11) является эффективным средством обработки данных большого объема. Ее синтез осуществляется путем декомпозиции исходной статистической информации и анализа количественных характеристик, получаемых множеств случайных величин. На этой основе осуществляется «сжатие» исходных данных. Предлагаемая статистика обладает свойством асимптотической несмещенности.

По своим аппроксимационным свойствам и устойчивости к помехам она значительно превосходит традиционную непараметрическую регрессию. Особенности структуры разработанной непараметрической модели стохастической зависимости позволяет решить проблему её доверительного оценивания.

Библиографические ссылки

1. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические системы обработки неоднородной информации. Новосибирск : Наука, 2007. 174 с.
2. Лапко В. А., Капустин А. Н. Синтез нелинейных непараметрических коллективов решающих правил в задачах распознавания образов // Автометрия. 2006. Т. 42, № 6. С. 26–33.
3. Лапко А. В., Лапко В. А., Егорочкин И. А. Непараметрические оценки смеси плотностей вероятности и их применение в задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 1 (35). С. 60–64.
4. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ свойств смеси непараметрических оценок плотности вероятности многомерной случайной величины // Вестник СибГАУ. 2010. № 2 (28). С. 32–35.
5. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ свойств непараметрических оценок смеси плотностей вероятности при различных условиях распределения статистических данных // Информатика и системы управления. 2013. № 1 (35). С. 119–126.
6. Лапко А. В., Лапко В. А. Свойства непараметрической оценки плотности вероятности многомерных случайных величин в условиях больших выборок // Информатика и системы управления. 2012. № 2. С. 121–126.
7. Лапко А. В., Лапко В. А. Синтез структуры смеси непараметрических оценок плотности вероятности многомерной случайной величины // Системы управления и информационные технологии. 2011. Т. 43, № 1. С. 12–15.
8. Лапко А. В., Лапко В. А. Разработка и исследование двухуровневых непараметрических систем классификации // Автометрия. 2010. Т. 46, № 1. С. 70–78.

9. Лапко А. В., Лапко В. А. Коллектив непараметрических решающих функций в двальтернативной задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2009. № 3.1 (37). С. 156–160.

10. Лапко А. В., Лапко В. А. Асимптотические свойства многомерной непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности в двальтернативной задаче распознавания образов // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 1 (39). С. 16–19.

11. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрическая оценка уравнения разделяющей поверхности в условиях больших выборок и её свойства // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 1.2 (39). С. 300–304.

12. Лапко А. В., Лапко В. А., Варочкин С. С. Коллектив непараметрических регрессий, основанный на принципе декомпозиции обучающей выборки // Вестник СибГАУ. 2009. № 1 (22). Ч. 2. С. 38–40.

13. Лапко А. В., Лапко В. А. Коллектив многомерных непараметрических регрессий, основанный на декомпозиции обучающей выборки по её объёму // Вестник СибГАУ. 2012. № 3 (43). С. 42–46.

14. Лапко А. В., Лапко В. А. Регрессионная оценка плотности вероятности и её свойства // Системы управления и информационные технологии. 2012. Т. 49, № 3. С. 152–156.

15. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические методики анализа множеств случайных величин // Автометрия. 2003. Т. 39, № 1. С. 54–61.

16. Лапко А. В., Лапко В. А. Дискретизация интервала изменения значений случайной величины на основе результатов оптимизации непараметрической оценки плотности вероятности // Информатика и системы управления. 2013. 4 (38). С. 63–69.

17. Лапко А. В., Лапко В. А. Построение доверительных границ для плотности вероятности на основе её регрессионной оценки // Метрология. 2013. № 12. С. 3–9.

18. Лапко А. В., Лапко В. А. Оптимальный выбор количества интервалов дискретизации области изменения одномерной случайной величины при оценивании плотности вероятности // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 24–27.

19. Lapko A. V., Lapko V. A. Optimal selection of the number of sampling intervals in domain of variation of a one-dimensional random variable in estimation of the probability density // Measurement Techniques. 2013. Vol. 56, no. 7. P. 24–27 (DOI: 10.1007/s11018-013-0279-x).

20. Надарая Э. А. Замечания о непараметрических оценках плотности вероятности и кривой регрессии // Теория вероятности и её применения. 1970. Т. 15, № 1. С. 139–142.

21. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М.: Мир, 1993. 300 с.

22. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и её применения. 1969. Т. 14, вып. 1. С. 156–161.

References

1. Lapko A. V., Lapko V. A. *Neparametricheskie sistemy obrabotki neodnorodnoj informacii* (Nonparametric heterogeneous information processing system). Novosibirsk, Nauka, 2007. 174 p.

2. Lapko V. A., Kapustin A. N. *Avtometrija*. 2006, vol. 42, no. 6, p. 26–33.

3. Lapko A. V., Lapko V. A., Egorochkin I. A. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2009, no. 1 (35), p. 60–64.

4. Lapko A. V., Lapko V. A. *Vestnik SibGAU*. 2010, no. 2 (28), p. 32–35.

5. Lapko A. V., Lapko V. A. *Informatika i sistemy upravlenija*. 2013, no. 1 (35), p. 119–126.

6. Lapko A. V., Lapko V. A. *Informatika i sistemy upravlenija*. 2012, no. 2, p. 121–126.

7. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2011, vol. 43, no. 1, p. 12–15.

8. Lapko A. V., Lapko V. A. *Avtometrija*. 2010, vol. 46, no. 1, p. 70–78.

9. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2009, no. 3.1 (37), p. 156–160.

10. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2010, no. 1 (39), p. 16–19.

11. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2010, no. 1.2 (39), p. 300–304.

12. Lapko A. V., Lapko V. A., Varochkin S. S. *Vestnik SibGAU*. 2009, no. 1 (22), part 2, p. 38–40.

13. Lapko A. V., Lapko V. A. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 3 (43), p. 42–46.

14. Lapko A. V., Lapko V. A. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2012, vol. 49, no. 3, p. 152–156.

15. Lapko A. V., Lapko V. A. *Avtometrija*. 2003, vol. 39, no. 1, p. 54–61.

16. Lapko A. V., Lapko V. A. *Informatika i sistemy upravlenija*. 2013, no. 4 (38), p. 63–69.

17. Lapko A. V., Lapko V. A. *Metrologija*. 2013, no. 12, p. 3–9.

18. Lapko A. V., Lapko V. A. *Izmeritel'naja tehnika*. 2013, no. 7, p. 24–27.

19. Lapko A. V., Lapko V. A. Optimal selection of the number of sampling intervals in domain of variation of a one-dimensional random variable in estimation of the probability density. *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 7, p. 24 – 27. doi: 10.1007/s11018-013-0279-x.

20. Nadaraja Je. A. *Teorija verojatnosti i ejo primenenija*. 1970, vol. 15, no. 1, p. 139–142.

21. Hardle V. *Prikladnaja neparametricheskaja regressija* (Applied nonparametric regression). Moscow, Mir, 1993. 300 p.

22. Epanechnikov V. A. *Teorija verojatnosti i ee primenenija*. 1969, vol. 14, no. 1, p. 156–161.

О ФУНКЦИИ ПЛАНОВЫХ ЯЗЫКОВ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ И ИХ ПРИМЕНЕНИИ В КАЧЕСТВЕ ЯЗЫКОВ НЕТЕРМИНАЛЬНЫХ СИМВОЛОВ ПОРОЖДАЮЩИХ ГРАММАТИК

Д. В. Личаргин¹, К. В. Сафонов², А. В. Ладе¹, Д. Д. Мищенко¹, А. Т. Гордеева¹

¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 28

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: lichdv@hotmail.ru

Рассмотрен вопрос о перспективах использования плановых языков в различных целях в качестве языка-посредника между различными народами и, в первую очередь, в качестве языка моделирования естественных языков. Описывается эксперимент по использованию конлангов как языка нетерминальных символов порождающих грамматик Хомского. Приведен анализ плановых языков на основе интерлингвистического подхода, связанного с изучением международных искусственных языков как средства преодоления языкового барьера. Делается вывод о том, что плановые языки межнационального общения могут найти свое применение не только в искусстве в качестве хобби, средства моделирования и анализа естественных языков, но и, в частности, для генерации осмысленной речи, осуществления языковых трансформаций и как языка нетерминальных символов порождающих грамматик.

Ключевые слова: интерлингвистика, плановые языки, философские языки, моделирование естественных языков.

ABOUT THE FUNCTION OF PLANNED LANGUAGES AT THE PRESENT TIME AND THEIR APPLICATION AS THE LANGUAGES OF NON-TERMINAL SYMBOLS OF GENERATIVE GRAMMARS

D. V. Lichargin¹, K. V. Safonov², A. V. Lade¹, D. D. Mishchenko¹, A. T. Gordeyeva¹

¹Siberian Federal University

28, Kirenskiy str., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

²Siberian State Airspace University named after academician M. F. Reshetnev

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

E-mail: lichdv@hotmail.ru

In the article the task is set to consider the issue of the prospects of using planned languages for different purposes as interlinguas between different nationalities and, first of all, as the natural language modeling languages. An experiment about the usage of conlangs as languages of non-terminal symbols of Chomsky's generative grammars is described. The analysis is offered on the topic of planned languages based on interlinguistic approach, referred to studying international artificial languages as means of overcoming language barrier. A conclusion is made that the international communication with the help of planned languages can be applied not only as an art form, hobby and tools for modeling and analyzing natural languages, but also particularly for natural language generation, executing linguistic transformations and as a generative grammar non-terminal symbols language.

Keywords: interlinguistics, planned languages, philosophical languages, natural languages modeling.

В работе рассматривается проблема создания и применения различных конлангов, в частности, в целях обеспечения генерации естественных языков, их моделирования и анализа. На сегодняшний день широко распространены и разрабатываются разнообразные системы, в частности, программы-переводчики, экспертные системы, системы поддержки диалога с пользователем, системы автоматического реферирования текстов и извлечения информации из текстов на

естественном языке. Проблема выбора и создания искусственного языка описания естественных языков является актуальной в связи с необходимостью развития машинного перевода, взаимодействия с компьютерными системами на основе естественно-языкового интерфейса.

Проблема построения и применения конлангов решается на стыке таких наук, как лингвистика, интерлингвистика, компьютерная лингвистика, логика,

философия и психология [1–5]. Проблема построения и применения конлангов давно и широко исследуется различными авторами. Однако вопрос о применении более эффективных плановых языков, в частности для моделирования естественных языков, требует дополнительных исследований в рамках теории классификаций, векторизации классов классификации и применения закона исключенного третьего при построении семантической классификации.

Цель данной работы состоит в сравнительном описании некоторых плановых языков, описании преимуществ и сфер применения некоторых языков, их применимости для решения проблемы порождения осмысленных подмножеств естественного языка.

Основная идея работы состоит в рассмотрении некоторых классов плановых языков и построении модели их применения в качестве инструмента генерации осмысленных подмножеств естественных языков, английского, русского и др. Новизна работы состоит в использовании модели, представленной в работе [1] в качестве принципа построения конланга, однозначно задающего семантическую классификацию слов, с возможностью их успешного применения в качестве нетерминальных символов порождающей грамматики Хомского.

О проблеме создания и применения конлангов.

Конланги первоначально имели цель упрощения общения между людьми на планете, преодоления различных межнациональных барьеров (языковых, культурных и т. п.). На сегодняшний день широко распространены и разрабатываются разнообразные модели языков. Огромное множество конлангеров (создателей искусственных языков) работают над самыми разнообразными проектами плановых языков. Конлангеры отражают в своих языках особенную индивидуальную философию, взгляды, идеи, логику или эстетику. В работе учитываются, возможно, самые известные и значимые из плановых (искусственных) языков, таких как Эсперанто, Токи Пона, Пандуния, Интерлингва и Ложбан. Процесс создания искусственных языков исследуется различными авторами, в частности, Жеффом Бурке, Салли Кавесом, Джоном Е. Клиффордом и А. Вежбицкой, а также Д. Тарту.

В последнее время в области систем машинного перевода господствует идея о необходимости создания систем Интерлингва – промежуточных языков машинного перевода. То есть существующие естественные языки должны переводиться на Интерлингва и обратно с Интерлингва. Таким образом, можно получать перевод с любого языка *A* на язык *B*, применяя цепочку *A–I–B*, где *I* – это язык Интерлингва. Наиболее известная *interlingua*-система разрабатывалась в Голландии под названием *Distributed Language Translation* (с 1979 по 1992 гг.). Вскоре после этого запустился интерлингва-проект UNL (*Universal Network Language*). Возникновение этого проекта японских разработчиков определялось потребностью перевода документов в Интернете. Этот проект состоит в идее сопоставления слов и неких атрибутов,

отличающих их различные лексико-семантические варианты.

Часто ставится вопрос о применении какого-либо простого и ясного по структуре искусственного языка в качестве языка моделирования естественных языков: английского, немецкого, французского, русского, китайского и др. Эта идея всегда привлекала лингвистов, специализирующихся на формальных моделях естественных языков.

Вопрос о международном искусственном языке без полисемии и конфигуральных условностей особенно активно разрабатывался в конце XIX в. Всего в мире насчитывается более 1000 проектов таких языков. Единственный язык такого рода, получивший относительно широкое распространение среди энтузиастов, – язык Эсперанто. Он на сегодняшний день содержит около 1900 корней (в основном романского происхождения). Эсперанто был основан на схожести многих европейских языков и содержит, таким образом, много схожих с другими языками слов. Грамматика Эсперанто отличается логичностью и простотой. В языке Эсперанто широко представлено словообразование. Существуют другие искусственные языки, такие как *Basic English*, содержащий 1000 слов (изначально в нем было 850 слов) и описывающий весь вокабуляр словосочетаниями видоизмененного английского языка. Сегодня на нем написана одна из Википедий.

О. Н. Селиверстова, говоря о языке в широком смысле, пишет следующее: «Словарь семантического языка в идеале, который пока никем не был достигнут, должен удовлетворять следующему условию: каждое его слово должно выражать ровно одно, по возможности, элементарное значение, а все элементарные значения должны выражаться ровно одним словом семантического языка, совершенно независимо от того, в составе какого толкования оно встречается», т. е. такой язык должен удовлетворять требованиям детерминированности и однозначности.

Языки описания естественных языков. В таблице в качестве иллюстрации приведен пример базовых компонентов сем-морфем – основных языковых единиц на одном из искусственных философских языков, в целях пояснения принципа описания естественного языка на основе конлангов. Так, слово *Gi* означает передачу идеи кем-то кому-то; *Di* – создание идеи; *PiL* – позитивное свойство идеи; *GiL* – передачу позитивной идеи; *GiLuuu* – передачу позитивной идеи о реципиенте. Таким образом, кодируются слова «сообщать», «думать», «разумный», «восхищаться» и «хвалить». Таким образом, слова некоторых конлангов являются полным или кратким определением слова, составленным из первоэлементов – сем («атомов смысла»).

Некоторые конланги могут быть использованы в качестве средства моделирования естественных языков, с их помощью может осуществляться успешную работу язык генерации абстрактных текстов к урокам иностранного языка, решая таким образом проблему построения программ генераторов учебных заданий.

Эксперимент. Трансформируя данный подход в терминах порождающих грамматик, семантический конланг можно использовать для обозначения нетерминальных символов порождающей грамматики, в частности, авторская программа «Генератор классификаций» показывает принцип такого порождения (рис. 1).

Как известно, стандартные порождающие грамматики над строками имеют вид четверки: $G < S, T, N, R >$, где S – начальный символ порождающей грамматики, T – множество терминальных символов, N – множество нетерминальных символов и R – множество правил трансформации одной строки в другую [3].

Таким образом, множество нетерминальных символов языка $\{c_n\} \subset T$, тогда как множество терминальных символов $\{w_m\} \subset N$.

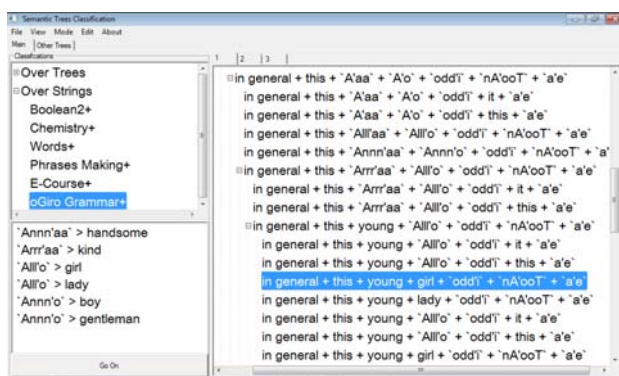


Рис. 1. Работа порождающей грамматики на основе промежуточного языка – конланга oGir'o

Общеизвестно, что порождающие грамматики, они же формальные грамматики, находят самое широкое применение при создании лингвистического программного обеспечения, в частности, программ-переводчиков, экспертных систем, систем поддержки диалога с пользователем, систем автоматического реферирования текстов.

Ниже приведен фрагмент порождающей грамматики с использованием языка oGir'o в качестве нетерминальных символов:

```
"Start" > 'a'ee' + 'a'ooD' + 'a'i' + 'a'ooT' + 'a'e'
'a'ee' > in principle
'a'ee' > as far as I know
'a'ooD' > I
'a'ooD' > you
'a'ooD' > 'y'a' + 'A'aa' + 'A'o'
'a'i' + 'a'ooT' > 'E'i' + 'nA'ooT'
'a'i' + 'a'ooT' > 'odd'i' + 'nA'ooT'
'a'i' + 'a'ooT' > 'E'i' + 'y'a' + 'E'aa' + 'E'o'
'a'i' + 'a'ooT' > 'odd'i' + 'y'a' + 'odd'aa' + 'odd'o'
'nA'ooT' > it
'nA'ooT' > this
'a'ooT' > 'y'a' + 'A'aa' + 'A'o'
'y'a' > the
'y'a' > this
'A'aa' + 'A'o' > 'Alll'aa' + 'Alll'o'
```

```
'A'aa' + 'A'o' > 'Annn'aa' + 'Annn'o'
'A'aa' + 'A'o' > 'Arrr'aa' + 'Alll'o'
'A'aa' + 'A'o' > 'Arrr'aa' + 'Annn'o'
'Arrr'aa' > young
'Alll'aa' > beautiful
'Annn'aa' > handsome
'Arrr'aa' > kind
'Alll'o' > girl
'Alll'o' > lady
'Annn'o' > boy
'Annn'o' > gentleman
'E'i' > 'E'ittaaa'
'E'ittaaa' > reads
'E'ittaaa' > writes
'E'ittaaa' > copies
'E'ittaaa' > scans
'E'aa' > interesting
'E'aa' > published
'Elill'o' > file
'Elill'o' > image
'Elill'o' > icon
'Emmmm'o' > magazine
'Emmmm'o' > document
'odd'aa' > tasty
'odd'aa' > appetizing
'odd'o' > food
'odd'o' > cutlet
```

В скобках вида '...' приведены термины семантического языка oGir'o, возможно применение в этой связи и других конлангов, однако конланг oGir'o специально разрабатывался для применения в сфере генерации, анализа и синтеза естественных языков и был создан с учетом критериев осмысленности и анализа порождающих особенностей естественных языков и их моделей.

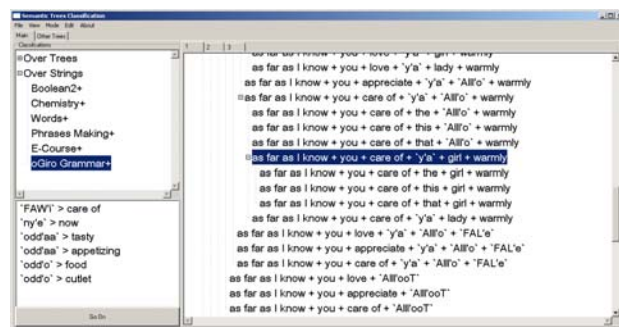


Рис. 2. Дополнительный пример работы порождающей грамматики на основе конланга

Так, на рис. 1 показан процесс порождения фраз вида «in general this young girl eats it with pleasure», «in general this young girl cooks this thoughtfully», «in general this young girl chews it emotionally» и т. д. С другой стороны, на рис. 2 показан процесс генерации фраз вида «as far as I know you love the beautiful girl very much», «as far as I know you appreciate the beautiful girl emotionally», «as far as I know you adore the beautiful girl sincerely» и др.

Семы одного из конлангов (oGir'o)

“ – использовать	f = импликация, причина	ee = появление	C = сущность	i = идея	bb = тело	w = все	ВТОРАЯ ОСНОВА	i = глагол	I = предикат	(i)z = настоящее
- делать	s = и, конъюнкция	aa = продолжать	J = аспект	e = место	pp = часть	l = много		ii = глагол требующий инфинитива / герундия	II = модальность, комплимент	(i)v = будущее
iii = делатель	x = посылка, результат	oo = исчезать	P = свойство	o = объект	dd = еда	r = достаточно		e = наречие	E = обстоятельство	(i)q = прошлое
eee = реципиент	c = процесс	ii = существовать	F = связь	a = абстракция	tt = начинка	m = мало		ee = вводное слово	EE = вводная фраза	(i)f = совершен- ное
aaa = объект	v = будущее	uu = не сущест- вовать	D = действие	u = отноше- ние, действие	gg = одежда	n = минимум, несколько		o = существительное	U = место пред- лога, связь	(i)c = длительное
ooo = инструмент	z = настоящее	yy = избегать	T = получение, принятие	O = сознание	kk = покрытие, крышка	W = отличный		oo = местоимение	OD = субъект	(i)h = неопределенное
uuu = себя	q = прошлое	EE = возможно	Z = соединение	A = существо	vv = группа существ, организация	L = хороший		a = притяжательное местоимение, порядко- вое числительное	OT = объект	(i)p = длительное совершенное
uyu = процесс	j = время	OO = необходимо	G = переда- ча кому-либо	E = информация	ff = кипа, куча, коллекция	R = нормальный		oa = количественное существительное	O = именная группа	(i)j = инфинитив
III – управление	b = часть, включаться в	II = не возможно	K = получе- ние от кого- либо	I = интеллект	zz = здание, дом, помещение	M = плохой		aa = прилагательное	AA = атрибут, определение	(i)vf = будущее совершенное
EEE – цепочка	d = быть, тождество	UU = без необ- ходимости, произвольно	X = обмен	U = непонятное	ss = контейнер, тара	N = ужасный		u – союз, предлог меж- ду частями речи	A = определитель	(o)t = единствен- ное
AAA – взаимно	g = целое, включать	YY = отложить	Q = запрос	Y = иррацио- нальное	qq = сидение	ww = твердый, жесткий		uu – союз, предлог между предложениями		(o)h = множественное
OOO – параллельно	dj = объединение, сложение	AA = возобновить		y = конкретное, данное, понятное	xx = опора	ll = мягкий		yy – слово предложе- ние, междометие, слова вежливости		(o)tc = парное
UUU – цикл	p = меньше				jj = устройство	гг = жидкий		? – частица		(aa)r = просто
YYY – иерархия	t = равно				djj = устройство	mm = газообразный		?? – наречие степени		(aa)l = более
??? – одиночное	k = больше				cc = инструмент	пп = огонь, плазма		y – вопросительное слово		(aa)w = самый
	tc = отлично от				tcc = инструмент	WW = совершенный		io - отглагольное существительное		(aa)m = менее

Использование планового языка в качестве промежуточного языка машинного перевода, языка векторного компонентного представления значения слов, языка описания валентностей слов, языка семантической классификации, языка нетерминальных символов порождающих грамматик можно считать перспективной и актуальной задачей. Она связана с решением проблемы моделирования, анализа, синтеза и потенциальной генерации естественного языка. Вероятно, будущее межнационального общения связано с работой эффективных систем машинного перевода с поддержкой голоса, а не с внедрением конлангов в качестве основных языков. При этом, по сравнению с изучением и исследованием конлангов в их применении в искусстве и в качестве хобби, использование конструируемых языков как средства моделирования и анализа естественных языков, использование языка описания нетерминальных символов порождающих грамматик является научной и технической задачей, требующей дальнейшего исследования.

Библиографические ссылки

1. Личаргин Д. В. Методы и средства порождения семантических конструкций естественно языкового интерфейса программных систем: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.17. Красноярск, 2004. 154 с.
2. Сафонов К. В., Личаргин Д. В. Разработка векторизованной семантической классификации над словами и понятиями естественного языка // Вестник СибГАУ. 2010. № 4 (30). С. 33–37.

3. Сафонов К. В. О возможности вычислительного распознавания контекстно-свободных грамматик // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10, № 4. С. 91–98.

4. Тарту Д. Общая интерлингвистика и плановые языки. М. : Русский язык, 1989.

5. Исаев М. И. Проблемы международного вспомогательного языка. М. : Наука, 1991.

References

1. Lichargin D. V. *Metody i sredstva porozhdeniya semanticheskikh konstruktsey yestestvenno yazykovogo interfeysa programmnykh sistem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods and Means of Semantic Constructions Generation for Software Natural Language Interface. Diss. PhD of Technical Sciences]. Krasnoyarsk, 2004. 154 p.
2. Safonov K. V., Lichargin D. V. *Vestnik SibGAU*, 2010, № 4 (30), p. 33–37.
3. Safonov K. V. *Vychislitelnye Tekhnologii*, 2005, vol. 10, № 4, p. 91–98.
4. Tartu D. *Obshchaya interlingvistika i planovyye yazyki* (General Interlinguistics and Planned Languages). Moscow, Russkii yazyk, 1989.
5. Isaev M. I. *Problemy mezhdunarodnogo vspomogatel'nogo yazyka* (Problems of the International Auxiliary Language). Moscow, Nauka, 1991.

© Личаргин Д. В., Сафонов К. В., Ладе А. В., Мищенко Д. Д., Гордеева А. Т., 2014

УДК 629.195.2, 65.011.56

МЕТОДЫ УНИФИКАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЦЕНТРАХ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

М. В. Некрасов¹, Д. Н. Пакман¹, А. Н. Антамошкин²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: diamond@iss-reshetnev.ru; packman@iss-reshetnev.ru

³Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: oleslav@mail.ru

Рассматривается циркуляция потоков телеметрической информации в структуре автоматизированной системы управления космическим аппаратом. Исторически сложившееся разнообразие программных средств обработки телеметрии, решающих схожие задачи, затрудняет дальнейшее их развитие, что приводит к неспособности удовлетворить возрастающие требования к скорости и качеству обработки информации современных космических аппаратов. Решением описанной проблемы может являться применение методов системного анализа для определения общих принципов идеологии построения унифицированных средств обработки телеметрической информации. Предлагаются пути развития методов обработки телеметрии и создания унифицированной системы обработки телеметрической информации для центра управления полётом космических аппаратов. Рассматриваются результаты практической реализации принципов унификации средств обработки телеметрии на примере системы ГЛОНАСС.

Ключевые слова: космический аппарат, центр управления, телеметрия.

UNIFICATION METHODS OF PRESENT TELEMETRY PROCESSING SYSTEMS IN SATELLITE CONTROL CENTERS

M. V. Nekrasov¹, D. N. Packman¹, A. N. Antamoshkin²

¹ JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation
E-mail: diamond@iss-reshetnev.ru; packman @iss-reshetnev.ru

² Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: oleslav@sibsau.ru

The article describes circulation of telemetry flows in an automated spacecraft control circuit. For historical reasons the variety of telemetry software solving similar tasks is hard to be evolved thus resulting in an inability to satisfy increasing speed and quality requirements of the present satellites. One solution of this problem may be applying methods of system analysis to determine general principles of ideology of unified telemetry system design. The article also offers the ways of evolution of telemetry processing methods and creating a unified telemetry processing system for the spacecraft mission control centers. A unified telemetry system design was applied in practice for the GLONASS system. The results of practical application are also described.

Keywords: spacecraft, mission control center, telemetry.

Назначение автоматизированной системы управления космическим аппаратом. Современная автоматизированная система управления космическими аппаратами (АСУ КА), рассматриваемая в [1; 2], предназначена для обеспечения работы бортовых систем КА в течение всего времени его активного существования и представляет собой совокупность бортовых и наземных средств управления с необходимым математическим обеспечением.

В такой системе существует критическая необходимость в скорейшем обнаружении неисправностей, от простого перегорания предохранителя до выявления предотказных состояний бортовой аппаратуры, посредством анализа телеметрической информации (ТМИ). Человек зачастую не может эффективно справиться с большим объемом поступающей информации, поэтому перспективным по части повышения безопасности технических средств является создание многофункциональных автоматизированных вычислительных комплексов. Высокий уровень автоматизации и интеллектуализации системы позволит уменьшить время сбора необходимой информации и повысить эффективность действий операторов анализа для поддержания стабильного функционирования КА.

Телеметрическая информация в контуре автоматизированной системы управления космическим аппаратом. Решение задач управления КА осуществляется с помощью аппаратно-программных средств наземного комплекса управления (НКУ) КА. В структуре НКУ циркулирует информация различных видов, основными из которых являются: разовые и программные команды, командно-программная информация, информация функционального контроля, баллистическая информация и ТМИ. В сложной автоматизированной системе управления, какой является АСУ КА, особую роль играет реакция управляемого КА на управляющие воздействия, а именно,

формируемая ТМИ, поступающая с передающих устройств КА по радиолинии и содержащая сведения о состоянии и режимах функционирования его бортовой аппаратуры, выполнении лётных программ и реакции аппарата на управляющие воздействия [1–3].

Процесс сбора ТМИ о состоянии КА, её передачи и предоставления конечному пользователю (оператору управления, системному специалисту) представляет собой многоступенчатую процедуру, включающую в себя ряд этапов.

Этап *сбора и передачи телеметрической информации* [3] реализуется бортовой аппаратурой телесигнализации (БАТС), установленной на средствах бортового комплекса управления (БКУ). На этом этапе обеспечивается решение следующих задач: сбор и обработка информации от датчиков аппаратными средствами БАТС; аналогово-цифровое преобразование данных и их размещение в оперативной памяти БАТС; взаимодействие с бортовым цифровым вычислительным комплексом (БЦВК); формирование и выдача в бортовую командно-измерительную систему (КИС) телеметрического сообщения в виде псевдокадров.

Этап *предварительной обработки телеметрической информации* реализуется средствами наземной командно-измерительной системы в составе НКУ. На указанном этапе решаются следующие задачи: приём ТМИ средствами наземной КИС; идентификация телеметрического сигнала, его нормализация и усиление; аналогово-цифровое преобразование информации средствами наземной КИС; выделение синхропосылки, анализ служебной части кадра, нарезка потока ТМИ на псевдокадры, привязка псевдокадров к московскому декретному времени; формирование блоков информации для передачи в каналы связи; передача сформированных блоков ТМИ в систему автоматизированной обработки данных пункта (САО-П).

Этап *первичной обработки телеметрической информации* реализуется САО-П и обеспечивает пере-

дачу ТМИ средствами системы сбора и передачи данных (ССПД) по соответствующему протоколу информационного взаимодействия в систему автоматизированной обработки данных центра (САО-Ц).

Этап *вторичной обработки информации, её анализа и представления* реализуется аппаратно-программными средствами центра управления полётом (ЦУП), входящего в состав НКУ, по результатам первичной обработки данных и позволяет путём расчётов определять необходимые характеристики работы бортовых систем. На этом этапе обеспечивается решение следующих задач: приём информационных потоков от САО-Ц; распределение потоков ТМИ по рабочим станциям ЦУП; расчёт первичных и вторичных параметров, а также параметров алгоритма обобщённого контроля состояния КА и систем; анализ результатов обработки ТМИ; представление данных операторам управления и системным специалистам.

Современные ЦУП КА организуются на базе аппаратно-программного комплекса и, как правило, состоят из нескольких функциональных секторов, представленных на рис. 1.

Основными задачами сектора обработки ТМИ являются:

- управление станциями приёма ТМИ;

- получение и обработка ТМИ в режиме непосредственного приёма;
- приём и обработка отчётов бортовым цифровым вычислительным комплексом;
- автоматизированный обобщённый контроль и диагностика состояния КА по ТМИ в течение всего срока его активного существования;
- представление результатов обработки ТМИ системным специалистам и операторам управления;
- обмен различными видами информации с элементами наземного комплекса управления, внешними системами и организациями.

Для решения общей целевой задачи управления КА и поддержания его активного существования между секторами ЦУП осуществляется информационно-логическое взаимодействие. Частью такого взаимодействия является обмен ТМИ по соответствующей схеме (рис. 1). Информационное взаимодействие между секторами осуществляется на программном уровне с использованием локально-вычислительной сети ЦУП.

Основными потребителями ТМИ в ЦУП КА являются операторы управления (анализаторы) и системные специалисты. В их задачи, в частности, входит анализ состояния всех КА орбитальной группировки (ОГ) и определение рекомендаций по управлению КА.

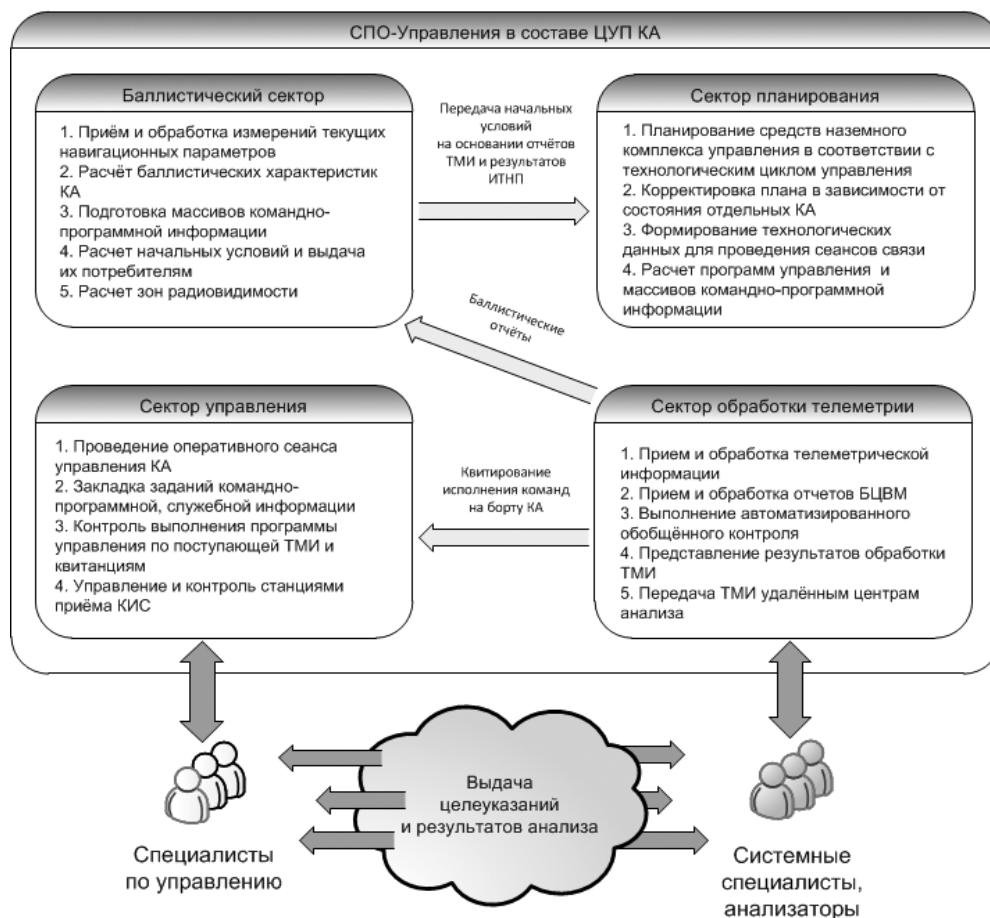


Рис. 1. Циркуляция телеметрии внутри СПО ЦУП КА:
СПО – специальное программное обеспечение; ИТНП – измерение текущих навигационных параметров

Направления создания унифицированной системы обработки телеметрической информации в ЦУП КА. До настоящего времени подход к разработке специального программного обеспечения обработки ТМИ (СПО ОТИ) и его функциональному структурированию определялся требованиями, предъявляемыми специалистами по управлению конкретным КА и заложенными аппаратными характеристиками ЦУП, что привело к наличию большого числа различных версий программного обеспечения для каждого из аппаратов или их ОГ. Сложившаяся ситуация препятствовала эффективному техническому сопровождению программного обеспечения, включая его наращивание и модернизацию. Увеличение числа и типов КА, разрабатываемых в ОАО «Информационные спутниковые системы» имени М. Ф. Решетнёва», ещё больше обострило данную проблему.

Таким образом, актуальной стала задача унификации СПО ОТИ, т. е. создания единой системы обработки ТМИ. Решение обозначенной проблемы позволит обеспечить гибкость функциональной архитектуры программного обеспечения, а также его независимость от обслуживаемого КА.

В результате проведения тщательного системного анализа существующих комплексов обработки ТМИ, а также используя результаты работы [4], была разработана идеология построения СПО ОТИ, на базе которой был спроектирован унифицированный программный комплекс. Данная идеология, прежде всего, сформирована на основе опыта создания подобных программных продуктов и требований к телеметрическому обеспечению ЦУП и общих принципов построения АСУ [5], из которых можно выделить следующие:

1) системность:

- наличие функциональных и информационных связей в системе;

- разделение функциональных задач системы между отдельными модулями на основе методов системного анализа;

2) гибкость программного обеспечения и совместимость его функциональных характеристик:

- модульность программного обеспечения, возможность его расширения и изменения в соответствии с решаемыми задачами;

- определение ключевых задач протоколов информационного взаимодействия с сопрягаемыми элементами системы;

3) автоматизация работы модулей системы:

- определение минимально необходимой входной информации;

- минимизация степени участия человека в управлении системой;

- обеспечение заданной степени обобщения выходной информации для передачи в смежные модули управления;

4) способность к взаимодействию:

- обеспечение совместной работы компонентов программных средств и баз данных с другими прикладными системами и компонентами на различных вычислительных платформах;

- взаимодействие с пользователями в стиле, удобном для перехода от одной вычислительной системы к другой с подобными функциями;

5) защищенность программных средств:

- использование методов и средств защиты программного обеспечения от потенциальных угроз с целью обеспечения безопасности функционирования информационной системы;

6) обеспечение надежности:

- устойчивость к аппаратным и программным дефектам;

- способность к восстанавливаемости;

7) сопровождаемость:

- полнота и достоверность документации о состояниях программного средства и его компонентов;

- документирование всех предполагаемых и выполненных изменений, позволяющее установить текущее состояние версий программ в любой момент времени и историю их развития;

8) мобильность:

- адаптируемость и простота установки на новые аппаратно-программные средства, новые операционные системы;

- совместимость и замещаемость программного обеспечения;

9) заданный уровень функциональности системы:

- получение, обработка и хранение телеметрической информации различных типов;

- автоматизированный контроль и диагностика состояния КА по ТМИ;

- эффективное представление результатов обработки ТМИ.

Состав подсистем обработки телеметрической информации. Используя описанные принципы и исходя из функциональных требований к системе обработки телеметрии, можно выделить следующие взаимодействующие между собой подсистемы:

1. Обслуживающая подсистема (комплекс программ сервера обработки телеметрии – КП СОТМ), предназначенная для одновременного проведения сеансов приёма ТМИ от различных КА при использовании различных наземных измерительных пунктов. Дополнительные задачи, решаемые подсистемой: предварительная обработка и оценка достоверности телеметрических кадров, санкционированный доступ к телеметрии для подсистем мониторинга, рассылка ТМИ подсистемам мониторинга по согласованному протоколу, сохранение архивов телеметрии в центральной базе данных ЦУП.

2. Подсистема сеансного (онлайн) мониторинга, взаимодействующая с обслуживающей подсистемой в части запроса на получение ТМИ о состоянии КА. Дополнительные задачи, решаемые подсистемой: первичная и вторичная обработка данных, формирование параметров обобщённого контроля, построение отвечающих им зависимостей, обработка отчётов бортового вычислительного комплекса, построение графиков поведения ТМ-параметров, оценка состояния КА в виде мнемонических схем. Следуя прин-

ципу разделения функциональных задач системы, из общего множества задач подсистемы сеансного мониторинга можно выделить следующие модули: модуль рабочего места обработки телеметрии (РМТМ) для отображения и анализа примитивных объектов (параметры, формуляры, графики) и мнемонического представления телеметрической модели (МПТМ) для анализа комплексных объектов – мнемонических диаграмм.

3. Подсистема внесансного (офлайн) мониторинга, взаимодействующая с базой данных ЦУП с целью извлечения и детального анализа архивов ТМИ после сеанса. Набор функциональных возможностей подсистемы должен совпадать с возможностями подсистемы онлайн-мониторинга и расширять их методами статистического анализа и прогнозирования временных рядов значений телеметрических параметров.

4. Вспомогательные подсистемы, к которым относятся:

- подсистема подготовки исходных данных (комплекс программ подготовки исходных данных – КП ПИД). Исходя из логики обработки ТМИ и в соответствии со структурами, формируемыми посредством БЦВК, данная подсистема обеспечивает формирование унифицированных структур для обработки ТМИ, поступающей в ЦУП КА. Помимо логики обработки параметров, генерируемых на борту, названная подсистема позволяет формировать группу параметров обобщенного контроля состояния КА, которые, в свою очередь, могут быть выстроены в многоуровневую иерархию параметров, начиная от первичных параметров (формируемых на основе бортовых датчиков) и заканчивая параметрами, описывающими систему КА и аппарат в целом. Совокупность сформированных унифицированных структур выступает в качестве исходных данных на обработку телеметрии для обслуживающей подсистемы и подсистем мониторинга;

- подсистема защищенного внешнего взаимодействия (комплекс программ обмена файлами ТМИ – ОФТМ), предназначенная для передачи данных по защищенным каналам и обеспечивающая сеансовую передачу ТМИ на средства потребителя через глобальные каналы связи.

Унифицированные структуры описания исходных данных. Для использования во всех подсистемах СПО ОТИ единых методов обработки ТМИ сформированы унифицированные структуры описания исходных данных на обработку телеметрии. Общее множество полученных структур классифицируется на следующие типы:

1) описание телеметрического параметра:

- первичные и вторичные параметры, содержащие такие характеристики, как наименование параметра, типы значений входной и выходной величины, размерность параметра, алгоритмы сглаживания, описание списка границ и др.;

- параметры автоматизированного обобщенного контроля, содержащие описание режимов функционирования подсистем, устройств, блоков;

- 2) описание формуляра, содержащее наименование формуляра, наименование подсистемы КА и список параметров;

- 3) описание подсистемы КА, содержащее список формуляров; обеспечивает системное иерархическое представление состояния КА;

- 4) описание отчёта бортового компьютера, содержащее следующие характеристики: идентификатор отчёта, номера алгоритма обработки, перечень участков двоичного массива с указанием наименований и адресов расположения телеметрических параметров внутри участка.

Разработанная концепция унификации базовых структур упрощает тестирование подсистем СПО ОТИ и повышает надёжность системы ОТИ в целом.

Практическая реализация принципов унификации на примере системы ГЛОНАСС. Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) предназначена для оперативного навигационно-временного обеспечения неограниченного числа пользователей наземного, морского, воздушного и космического базирования. Обеспечение целевой задачи – создание глобального навигационного поля – достигается наличием в ОГ 24 КА. Общее количество сеансов связи в сутки достигает 100, при этом одновременные сеансы связи проводятся с 3–5 КА. Количество телеметрических параметров для КА типа «Глонасс-М» составляет около 12 000, а для КА типа «Глонасс-К» – около 14 000 телеметрических параметров [6].

Во исполнение опытно-конструкторской работы по модернизации технических и программных средств на 2002–2011 годы производилось переоснащение наземного сегмента системы ГЛОНАСС. Для удовлетворения тактико-технических требований в части обработки полных потоков ТМИ ОГ ГЛОНАСС была спроектирована новая система обработки ТМИ в ЦУП КА, учитывающая описываемые в настоящей статье принципы унификации методов.

Схема разработанной системы обработки ТМИ (специального программного обеспечения обработки ТМИ) представлена на рис. 2.

На схеме видно, что в секторе анализа ТМИ центральным элементом является СОТМ, который принимает потоки ТМ-информации от САО, организует долговременный архив в базу данных ЦУП и рассылает принимаемую информацию потребителям.

КП РМТМ принимает информацию от СОТМ и выполняет задачи сеансного анализа телеметрии, основными из которых являются: первичная и вторичная обработка ТМИ, обработка отчётов БЦВК, построение графиков поведения параметров, сохранение и печать результатов обработки.

КП МПТМ также принимает информацию от СОТМ и обеспечивает построение модели функционирования спутника в виде мнемосхем.

Накопленная в базе данных ЦУП ТМИ оценивается КП ПВРТМ, основными задачами которого являются: чтение архивов телеметрии и отображение в заданном виде, построение графиков параметров на

любом интервале времени, обработка отчётов БЦВК, сохранение и печать результатов обработки.



Рис. 2. Схема взаимодействия СПО ОТИ

Все рассмотренные комплексы анализа во время своего функционирования используют исходные данные на обработку ТМИ, расположенные в базе данных ЦУП и формируемые КП ПИД.

Предлагаемые принципы проектирования систем приёма и обработки ТМИ позволили определить состав подсистем обработки телеметрии, а также ключевые задачи каждой подсистемы. Дополнительно определено, что функционирование и взаимодействие подсистем должно производиться с использованием унифицированных структур описания исходных данных.

Описанные методы унификации средств обработки ТМИ позволят удовлетворить требования различных эксплуатирующих организаций в плане обработки ТМИ и обеспечат эффективную техническую поддержку АСУ КА.

Библиографические ссылки

1. Спутниковые системы связи и вещания 2007 : науч.-техн., справоч.-аналит. изд. Вып. 2. с прил. на СД. М. : Радиотехника, 2008. 441 с.
2. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. М. : Эко-Трендз, 2000. 270 с.
3. Эскизный проект. Построение основного и резервного центров управления полетом орбитальной группировкой космических аппаратов гражданских спутниковых систем связи и вещания государствен-

ного назначения. Кн. 1. Организационно-техническое построение ЦУП и РЦУП. Железногорск, 2002. 109 с.

4. Некрасов М. В., Пакман Д. Н., Вершинин А. Б. Разработка концепций создания многопоточной системы обработки телеметрической информации в центрах управления полетом военного назначения // Материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов. Железногорск, 2008. С. 19-24.

5. Переверткин С. М., Кантов А. В., Бородин Н. Ф., Щербакова Т. С. Бортовая телеметрическая аппаратура космических летательных аппаратов. М. : Машиностроение, 1977. 208 с.

6. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 3-е изд., перераб. М. : Радиотехника, 2005. 688 с.

References

1. *Sputnikovie sistemi svyazi i veshania 2007* (Satellite communication and broadcasting systems). Moscow, Radiotekhnika, 2008, 441 p.
2. Solov'jov Yu. A. *Sistemi sputnikovoy navigacii* (Satellite navigation systems). 2000, 270 p.
3. *Eskiznyy project. Postroenie osnovnogo i rezervnogo centrov upravleniya poletom orbitalnoy gruppировки kosmicheskikh apparatov grazhdanskikh sputnikovih sistem svyazi i veshaniya gosudarstvennogo naznacheniya. Kniga 1. Organizacionno-tehnicheskoe postroenie CUP i RCUP. Zheleznogorsk* [Conceptual design. Design of master and slave satellite control centers for orbital group of satellites of civil communication and broadcasting systems for the interest of the state. Vol 1. Main SCC and slave SCC organizational and technical design]. 2002, 109 p.
4. Nekrasov M. V., Packman D. N., Vershinin A. B. Conceptual design of multithreaded telemetry processing system for satellite control centers of military purpose [Razrabotka koncepciy sozdaniya mnogopotchnoy systemi obrabotki telemetricheskoy informacii v centrakh upravleniya poletom voennogo naznacheniya]. *Materialy nauchno-technicheskoy konferencii molodih specialistov* (Scientific-technical conference of young specialists). Zheleznogorsk, 2008, pp. 19-24
5. Perevertkin S. M., Kantov A. V., Borodin N. F., Sherbakova T.S. *Bortovaya telemetricheskaya apparatura kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* (On-board telemetry system of aircrafts). Moscow, Mashinostroenie, 1977, 208 p.
6. *GLONASS: principy postroenia i funkcionirovaniya* (GLONASS: design and functioning principles). Moscow, Radiotekhnika, 2005, 688 p.

© Некрасов М. В., Пакман Д. Н.,
Антамошкин А. Н., 2014

УДК 519.62

РАСЧЕТ ЗАЩЕМЛЕННОЙ БАЛКИ, ПОДАТЛИВОЙ ПРИ ТРАНСВЕРСАЛЬНОМ СДВИГЕ, МЕТОДОМ РИТЦА

В. А. Нестеров

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: misternester@gmail.com

Рассматриваются задачи об изгибе, устойчивости и собственных колебаниях защемленной с обоих концов балки, податливой при трансверсальном сдвиге. Решения выполняются с помощью метода Ритца. Для кинематических параметров в качестве базисных используются балочные функции. Результаты решений, выполненных для сплошной композитной и трехслойной балки, сравниваются с результатами оригинального конечно-элементного расчета, в котором угол сдвига учитывается в качестве независимого узлового параметра. Показана допустимость приближенного решения методом Ритца для сплошных композитных балок и трехслойных балок с относительно высокой жесткостью материала заполнителя.

Ключевые слова: балка, трансверсальный сдвиг, метод Ритца, метод конечных элементов.

ANALYSIS OF SHEAR FLEXIBLE BEAM WITH BOTH CLAMPED ENDS BY RITZ METHOD

V. A. Nesterov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: misternester@gmail.com

Deformation, buckling and modal analysis of shear flexible clamped beam are considered. Analysis is fulfilled by Ritz method. The bending deflection of a beam is approximated by the first beam function. The results of calculation are compared to the original finite element solution in which transverse shear strain is appointed as the basic cinematic variable. The admissibility of approximate solution by Ritz method for analysis of composite beams and sandwich beams with rather high stiffness of score is shown.

Keywords: clamped beam, finite element method, Ritz method, transverse shear strains.

В настоящее время для производства авиационной и ракетно-космической техники широко применяются композиционные материалы. Композиты обладают высокой удельной прочностью и жесткостью, поэтому позволяют изготавливать конструкции с высокими показателями весового совершенства. Для композитов характерна низкая сдвиговая жесткость по отношению к трансверсальным напряжениям. Учет этой особенности приводит к усложнению математической модели за счет повышения порядка разрешающих уравнений из-за введения в рассмотрение углов трансверсального сдвига.

Тотальное господство численных методов, и прежде всего метода конечных элементов (МКЭ), в расчетной и инженерной практике не уменьшает интереса исследователей к приближенным методам, которые в ряде случаев в силу более простого алгоритма реализации позволяют получить приемлемые решения.

В настоящей работе рассматривается расчетная модель балки, базирующаяся на математической теории пластин Рейснера–Мидлина. В расчете, выполняемом с помощью метода Ритца, учитывается трансверсальный сдвиг. Данный подход требует вариационной постановки задачи, при которой в качестве

исходного функционала фигурирует выражение потенциальной энергии деформации конструкции. Для сдвиговой модели балки это выражение имеет вид

$$E = \frac{1}{2} \int_0^l \left(N \frac{du}{dx} + M \frac{d\theta}{dx} + Q\psi \right) dx - \int_0^l q w dx, \quad (1)$$

где θ – угол наклона сечения, измеряемый в плоскости изгиба; u – перемещения точек начальной плоскости вдоль продольной оси балки; w – прогибы точек начальной плоскости; ψ – угол сдвига или осредненная по высоте сечения деформация трансверсального сдвига; q – погонная балочная нагрузка.

Угол наклона сечения θ складывается из угла сдвига ψ и угла изгиба dw/dx [1]:

$$\theta = \psi - \frac{dw}{dx}. \quad (2)$$

Для внутренних силовых факторов справедливы следующие физические соотношения:

$$N = B \frac{du}{dx} + C \frac{d\theta}{dx}, \quad M = C \frac{du}{dx} + D \frac{d\theta}{dx}, \quad Q = K\psi, \quad (3)$$

где B – жесткость балки при растяжении–сжатии вдоль продольной оси; C – смешанная жесткость; D – изгибная жесткость; K – жесткость балки при трансверсальном сдвиге.

Рассмотрим балку, закрепленную по обоим концам и нагруженную равномерно распределенной балочной нагрузкой. В случае симметрично армированного слоистого пакета смешанные жесткости C будут равны нулю. Принимая это обстоятельство во внимание, подставим физические соотношения (3) в функционал (1). В результате получим

$$E = \frac{1}{2} \int_0^l \left[B \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + D \left(\frac{d\psi}{dx} - \frac{d^2w}{dx^2} \right)^2 + K \psi^2 \right] \times \\ \times dx - \int_0^l q w dx. \quad (4)$$

Граничные условия на защемленных краях выражаются следующими соотношениями:

$$\text{при } x = 0 \text{ и } x = l: w = 0, \quad \frac{dw}{dx} = 0, \quad \psi = 0. \quad (5)$$

С учетом данных граничных условий примем следующие распределения для кинематических параметров:

$$w = W \left\{ \begin{aligned} &(\sinh(kl) - \sin(kl))(\cosh(kx) - \cos(kx)) - \\ &-(\cosh(kl) - \cos(kl))(\sinh(kx) - \sin(kx)) \end{aligned} \right\}, \\ \psi = F \sin\left(\frac{2\pi x}{l}\right), \quad u = U \sin\left(\frac{2\pi x}{l}\right). \quad (6)$$

Реализация процедуры метода Ритца сводит вариационную задачу к системе алгебраических уравнений вида

$$\mathbf{AX} = \mathbf{R}, \quad (7)$$

где $\mathbf{A}$ – матрица третьего порядка, компоненты которой вычисляются программно; $\mathbf{X}$ – вектор неизвестных, состоящий из амплитудных значений в разложениях (6); $\mathbf{R}$ – вектор нагрузки:

$$\mathbf{X} = \{U \ W \ F\}^T, \quad \mathbf{R} = \{0 \ r \ 0\}^T,$$

где

$$r = q \int_0^l \left\{ \begin{aligned} &(\sinh(kl) - \sin(kl))(\cosh(kx) - \cos(kx)) - \\ &-(\cosh(kl) - \cos(kl))(\sinh(kx) - \sin(kx)) \end{aligned} \right\} dx.$$

Решая систему уравнений (7), определим компоненты вектора $\mathbf{X}$, а следовательно, и распределения кинематических параметров (6).

Решения, полученные с помощью приближенного метода Ритца, будем сравнивать с результатами численных расчетов, выполняемых методом конечных элементов. Основными узловыми неизвестными являются: прогиб w , изгибной угол наклона сечения, угол трансверсального сдвига и продольное перемещение u .

Таким образом, вектор узловых параметров в двух-узловом элементе имеет вид

$$\delta_e = \left\{ w_1 \quad \left(\frac{dw}{dx} \right)_1 \quad \psi_1 \quad u_1 \quad w_2 \quad \left(\frac{dw}{dx} \right)_2 \quad \psi_2 \quad u_2 \right\}^T.$$

Разрешающие уравнения теории МКЭ, соответствующие нашей задаче, представлены в [2], а вывод основополагающих матриц – в [3].

Предположим, что балка, изготовленная из однонаправленного углепластика, имеет квадратное сече-

ние размером 1×1 см. Модуль упругости материала $E = 180$ ГПа, модуль сдвига $G = 5$ ГПа. Коэффициенты жесткости вычисляются по формулам

$$B = \frac{Ebh}{1-\mu^2}, \quad D = \frac{Ebh^3}{12(1-\mu^2)}, \quad K = Gbh. \quad (8)$$

Зададим погонную балочную нагрузку $q = 100$ Н/м и выполним статический расчет двумя вышеописанными методами. Результаты решения задачи с помощью МКЭ и в балочных функциях (методом Ритца) имеют хорошее совпадение по прогибам. Расхождение по центральному прогибу не превышает 1 %.

Выполним серию расчетов для той же самой композитной балки, увеличивая высоту ее сечения (при сохранении неизменной ширины 1 см). Результаты расчетов представим таблично (табл. 1).

Таблица 1

Прогибы, вычисленные с помощью метода Ритца и МКЭ

Размеры сечения, $b \times h$, см $\times$ см	Центральный прогиб, мм		Разница, %	Нагрузка, q , Н/м
	МКЭ	Метод Ритца		
1 x 1	1,605	1,619	0,87	100
1 x 2	2,098	2,099	0,05	1000
1 x 3	1,336	1,318	1,41	2000
1 x 4	1,235	1,198	2,94	4000
1 x 5	1,406	1,340	4,73	8000

Как видно по этим данным, результаты решений двумя методами имеют хорошее совпадение по центральному прогибам. Тем не менее нельзя не заметить, что по мере увеличения высоты сечения балки имеет место тенденция к увеличению разницы прогибов, вычисленных разными методами. Этому обстоятельству можно дать следующее объяснение. При увеличении толщины (высоты сечения) балки возрастает роль сдвигового фактора. В решении, полученном методом Ритца, также учитывается трансверсальный сдвиг, но для точного представления функции прогибов в балке большой толщины одной базисной балочной функции оказывается недостаточно, что приводит к некоторому расхождению с более точным (МКЭ) вариантом расчета.

Рассмотрим теперь задачу об изгибе трехслойной балки. Будем полагать, что жесткость несущих слоев существенно выше жесткости промежуточного слоя. В этом случае можно допустить, что параметры жесткости балки B и D обеспечены несущими слоями:

$$B = \frac{2E_n b t}{1-\mu_n^2}, \quad D = \frac{E_n b (H^3 - h^3)}{12(1-\mu_n^2)}, \quad K = H^2 \left/ \frac{2t}{G_n} + \frac{h}{G_3} \right., \quad (9)$$

где H – полная толщина пакета; h – толщина слоя заполнителя; t – толщина каждого из несущих слоев; b – ширина сечения; E_n – приведенный модуль упругости материала несущих слоев; G_n и G_3 – модули сдвига материалов несущих слоев и заполнителя соответственно.

Выполним с помощью методов Ритца и конечных элементов расчет трехслойной балки, защемленной по

обоим краям и нагруженной равномерным погонным балочным усилием q . Несущие слои толщиной в 1 мм – композитные ($E_n = 180$ ГПа, $\mu_n = 0,3$). Материал заполнителя – изотропный с модулем упругости $E_3 = 5$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\mu_3 = 0,3$. Модули сдвига материалов несущих слоев и заполнителя определяются по классической формуле $G = E/(1+\mu)$.

Результаты расчетов для моделей с различной толщиной слоя заполнителя представлены в табл. 2. Они свидетельствуют о том, что приближенное решение методом Ритца с использованием в качестве базисной только одной балочной функции дает достаточно точные результаты по центральному прогибу для модели с относительно жестким слоем заполнителя. Причем на всем интервале изменения толщины слоя заполнителя (от 1 до 5 см) расхождение приближенного решения (методом Ритца) и численного (МКЭ) не превышает 1 %. Для расчета с помощью МКЭ задействована специально разработанная авторская программа [4].

Таблица 2

Прогибы трехслойной балки, вычисленные с помощью метода Ритца и МКЭ

Толщина слоя заполнителя h , см	Центральный прогиб, мм		Разница, %	Нагрузка, Н/м
	МКЭ	Метод Ритца		
1	2,215	2,233	0,81	100
2	3,110	3,127	0,55	500
3	2,928	2,925	0,10	1000
4	3,424	3,406	0,53	2000
5	4,525	4,483	0,93	4000

Еще один численный эксперимент проведен с целью определения точности приближенного решения методом Ритца при различных значениях жесткости заполнителя. Для этого проведена серия расчетов двумя методами (Ритца и МКЭ) той же самой трехслойной балки с композитными несущими слоями толщиной в 1 мм и слоем заполнителя толщиной 2,5 см. Анализ результатов (табл. 3) позволяет сделать вывод о том, что при малой жесткости слоя заполнителя приближенное решение методом Ритца (с одной базисной функцией для прогиба) дает значение центрального прогиба, существенно отличающееся от прогиба, рассчитанного с помощью МКЭ.

Таблица 3

Прогибы трехслойной балки при различной жесткости слоя заполнителя

E_3 , ГПа	Центральный прогиб, мм		Разница, %
	МКЭ	Метод Ритца	
5	4,119	4,120	0,007
1	5,003	4,826	3,54
0,5	6,109	5,696	6,76
0,1	14,983	12,143	18,96
0,05	26,150	19,107	26,93

Неточность приближенного решения методом Ритца в данном случае обусловлена неадекватностью

представления прогибов одной балочной функцией. Для получения более точного решения методом Ритца необходимо увеличить число базисных балочных функций в представлении прогиба. Однако при этом значительно возрастают вычислительные затраты и исчезает то преимущество приближенного решения (методом Ритца) перед численным (МКЭ), которое имело место при одночленной аппроксимации функции прогибов, а именно, простота реализации.

Рассмотрим теперь задачу об устойчивости защемленной балки при осевом сжатии. Функционал устойчивости для сдвиговой модели балки имеет вид

$$\Delta U = \frac{1}{2} \int_0^l \left\{ N_0 \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 + D \left(\frac{d\psi}{dx} - \frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 + K \psi^2 \right\} dx,$$

где N_0 – усилие осевого сжатия.

В функционале устойчивости отсутствует продольное перемещение u , поэтому из распределений (6) здесь актуальны выражения для прогиба w и угла трансверсального сдвига ψ . Реализация процедуры метода Ритца сводит вариационную задачу к обобщенной задаче на собственные значения

$$\mathbf{A}\mathbf{X} + N_0\mathbf{B}\mathbf{X} = \mathbf{0}, \quad (10)$$

где $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ – матрицы второго порядка, компоненты которых вычисляются программно; $\mathbf{X}$ – вектор неизвестных, состоящий из амплитудных значений в разложениях (6):

$$\mathbf{X} = \{WF\}^T.$$

Решая систему уравнений (10), определим критическое значение усилия N_0 . Форма потери устойчивости задается балочной функцией, фигурирующей в представлении прогиба (6).

Полученные с помощью приближенного метода Ритца критические величины будем сравнивать с результатами численных расчетов, выполняемых методом конечных элементов. Основными узловыми неизвестными являются: прогиб w , изгибной угол наклона сечения и угол трансверсального сдвига. Вектор узловых параметров элемента имеет вид

$$\delta_e = \left\{ w_1 \left(\frac{dw}{dx} \right)_1 \quad \psi_1 \quad w_2 \left(\frac{dw}{dx} \right)_2 \quad \psi_2 \right\}^T.$$

Вывод системы уравнений устойчивости произвольного балочного элемента выполняется программно [3], а соответствующие данной задаче матрицы жесткости представлены в [5].

Предположим, что балка, изготовленная из однонаправленного углепластика, имеет квадратное сечение размером 1×1 см. Модуль упругости материала $E = 180$ ГПа, модуль сдвига $G = 5$ ГПа. Коэффициенты изгибной и сдвиговой жесткости вычисляются по формулам (8). Критическое усилие сжатия, определенное при решении системы (10), соответствующей методу Ритца, оказалось равным 6623,83 Н. Конечно-элементный расчет для 50-узловой модели дал величину в 6444,44 Н. Относительная разница этих значений составляет 2,78 %, что свидетельствует о высокой

точности приближенного решения задачи устойчивости методом Ритца.

В табл. 4 представлены критические нагрузки, определенные в серии расчетов композитной защемленной балки при варьировании высотой сечения. Здесь кроме результатов численного (МКЭ) и приближенного (метод Ритца) решений приводится аналитическое решение, вычисленное по формуле

$$N_{кр} = 4\pi \frac{EJ}{l^2}$$

и не учитывающее трансверсальный сдвиг.

Таблица 4

Значения критических усилий для сплошной композитной балки

h , мм	МКЭ, Н	Метод Ритца, Н	Относительная разница, %	Аналитическое решение, Н
5	811,43	835,73	2,99	813,43
10	6444,44	6623,83	2,78	6507,43
20	50100,62	51099,08	1,99	52059,45
30	161479,00	162811,12	0,82	175700,65
40	360150,83	358043,35	0,59	416475,61
50	653690,92	640293,63	2,05	813428,93
60	$1,040 \cdot 10^6$	$1,004 \cdot 10^6$	3,46	$1,406 \cdot 10^6$
70	$1,509 \cdot 10^6$	$1,438 \cdot 10^6$	4,71	$2,599 \cdot 10^6$
80	$2,050 \cdot 10^6$	$1,932 \cdot 10^6$	5,76	$3,332 \cdot 10^6$
90	$2,648 \cdot 10^6$	$2,475 \cdot 10^6$	6,53	$4,744 \cdot 10^6$

Как видно по представленным результатам (табл. 4), на большей части диапазона изменения высоты сечения балки расхождения критических величин, найденных двумя методами (МКЭ и метод Ритца), не превышают 3 %, что подчеркивает точность метода Ритца при решении задачи устойчивости балок с относительно высоким значением трансверсальной сдвиговой жесткости. Вместе с тем оценивая результаты аналитического решения (четвертый столбец, табл. 4), можно заключить, что уже при данных значениях трансверсальной сдвиговой жесткости нельзя не учитывать в постановке трансверсальную податливость.

Рассмотрим теперь задачу об устойчивости трехслойной балки. Коэффициенты изгибной и сдвиговой жесткости вычисляются по формулам (9).

Определим с помощью методов Ритца и конечных элементов критическую осевую нагрузку для трехслойной балки, защемленной по обоим краям. Несущие слои толщиной в 1 мм – композитные ($E_n = 180$ ГПа, $\mu_n = 0,3$). Материал заполнителя – изотропный с модулем упругости $E_3 = 5$ ГПа и коэффициентом Пуассона $\mu_3 = 0,3$. Модули сдвига материалов несущих слоев и заполнителя определяются по классической формуле $G = E/(1+\mu)$. Ширина сечения балки 10 мм.

Результаты расчетов, выполненных с помощью оригинальной программы, для моделей с различной толщиной слоя заполнителя представлены в табл. 5. Они свидетельствуют о том, что приближенное решение методом Ритца с использованием в качестве базисной только одной балочной функции дает достаточно точные результаты по критическому усилию

для модели с относительно жестким слоем заполнителя. Причем на всем интервале изменения толщины слоя заполнителя (от 1 до 10 см) расхождение приближенного решения (методом Ритца) и численного (МКЭ) не превышает 3 %.

Таблица 5

Критические усилия для трехслойной балки с различной толщиной слоя заполнителя

h_3 , мм	Метод Ритца, Н	МКЭ, Н	Отн. разница, %
10	4803,09	4677,02	2,70
20	17147,78	16762,82	2,30
30	36667,77	35986,80	1,89
40	62974,52	62035,97	1,51
50	95708,23	94620,84	1,15
60	134535,24	133474,27	0,79
70	179145,68	178321,76	0,46
80	229251,44	228910,52	0,15
90	284584,22	285045,82	0,16
100	344893,93	346478,19	0,46

Таблица 6

Критические усилия для трехслойной балки с различной жесткостью заполнителя

E_3 , ГПа	Метод Ритца, Н	МКЭ, Н	Относительная разница, %
5	26035,86	25504,87	2,08
1	22223,03	22439,30	0,96
0,5	18830,16	19508,33	3,48
0,1	8833,13	9540,25	7,41
0,05	5613,39	5822,22	3,59
0,04	4829,16	4872,84	0,90
0,03	3985,85	3831,66	4,02
0,02	3076,50	2684,66	14,60
0,01	2093,06	1414,85	47,94

Еще один численный эксперимент проведен с целью определения точности приближенного решения задачи устойчивости с помощью метода Ритца при различных значениях жесткости заполнителя. Для этого проведена серия расчетов двумя методами (метод Ритца и МКЭ) той же самой трехслойной балки с композитными несущими слоями толщиной в 1 мм и слоем заполнителя толщиной 2,5 см. Анализ результатов (табл. 6) позволяет сделать вывод о том, что при малой жесткости слоя заполнителя приближенное решение методом Ритца (с одной базисной функцией для прогиба) дает значение критической нагрузки, существенно отличающееся от величины, рассчитанной с помощью МКЭ. Неточность приближенного решения методом Ритца в данном случае также обусловлена неадекватностью представления прогибов одной балочной функцией.

Для решения задачи о собственных колебаниях получен следующий функционал:

$$\frac{1}{2} \int_0^l \left(B \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + D \left(\frac{d\psi}{dx} - \frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 + K \psi^2 \right) dx - \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^l \left\{ B_p (u^2 + w^2) + D_p \left(\psi - \frac{dw}{dx} \right)^2 \right\} dx = 0,$$

где B_p , D_p – параметры, характеризующие инерционные свойства; ω – круговая частота колебаний.

Реализация процедуры метода Ритца при выбранной аппроксимации кинематических параметров (6) сводит вариационную задачу к обобщенной задаче на собственные значения

$$\mathbf{A}\mathbf{X} + \omega^2 \mathbf{B}\mathbf{X} = \mathbf{0}, \quad (11)$$

где $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ – матрицы третьего порядка, компоненты которых вычисляются программно; $\mathbf{X}$ – вектор неизвестных, такой же как в системе (7).

Решая систему уравнений (11), определим первую частоту собственных колебаний балки. Соответствующая форма колебаний задается балочной функцией, фигурирующей в представлении прогиба (6).

Полученные с помощью приближенного метода Ритца собственные значения будем сравнивать с результатами численных расчетов, выполняемых методом конечных элементов.

Вывод системы уравнений состояния произвольного балочного элемента представлен в [6]. При этом компоненты матриц жесткости и инерции вычисляются программно [3].

Предположим, что балка, изготовленная из однонаправленного углепластика, имеет квадратное сечение размером 1×1 см. Модуль упругости материала $E = 180$ ГПа, модуль сдвига $G = 5$ ГПа. Коэффициенты жесткости вычисляются по формулам (8).

Плотность материала $\rho = 1500$ кг/м³. Параметры инерции определяются как

$$B_p = \rho b h, \quad D_p = \frac{\rho b h^3}{12}. \quad (12)$$

Первая частота собственных колебаний, определенная при решении системы (11), соответствующей методу Ритца, оказалась равной 117,3 Гц. Конечно-элементный расчет для 50-узловой модели дал величину в 117,1 Гц. Относительная разница этих значений составляет 0,17 %, что свидетельствует о высокой точности приближенного решения задачи о собственных колебаниях балки методом Ритца. Напомним, что циклическая f и круговая ω частоты колебаний связаны формулой $\omega = 2\pi f$.

В табл. 7 представлены частоты, определенные в серии расчетов композитной защемленной балки при варьировании высотой сечения. Здесь кроме результатов численного (МКЭ) и приближенного (метод Ритца) решений приводится аналитическое решение, вычисляемое по формуле

$$f_i = \frac{k_i^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}}, \quad (13)$$

где i – номер моды; F – площадь сечения балки.

Фигурирующий в (13) параметр k – это корень частотного уравнения, которое для защемленной по краям балки имеет вид

$$\cosh(kl) \cos(kl) - 1 = 0.$$

Для первых четырех мод этот параметр имеет значения 4,730; 7,853; 10,966; 14,137. В расчетной программе в действительности эти корни определены

с точностью до 20 знака после запятой. Отметим, что аналитическое решение (13) не учитывает влияния трансверсального сдвига.

Таблица 7

Значения критических усилий для сплошной композитной балки

h , мм	Метод Ритца, Гц	МКЭ, Гц	Относительная разница, %	Аналитическое решение, Гц
10	117,30	117,10	0,17	118,04
20	230,35	228,83	0,66	236,08
30	335,66	330,93	1,43	354,114
40	430,99	420,97	2,38	472,15
50	515,42	498,17	3,46	590,19
60	589,07	563,14	8,47	708,23
70	652,76	617,09	5,78	826,27
80	707,66	661,70	6,94	944,30
90	755,05	698,49	8,10	1062,34
100	796,14	728,90	9,22	1180,38

Как видно по представленным результатам (табл. 7), на половине диапазона изменения высоты сечения балки (от 10 до 50 мм) расхождения в значениях первой частоты, найденных двумя методами (МКЭ и метод Ритца), не превышают 3,5 %, что подчеркивает точность метода Ритца при решении задачи о собственных колебаниях балок с относительно высоким значением трансверсальной сдвиговой жесткости. Однако нельзя не отметить тенденцию увеличения расхождения при дальнейшем увеличении высоты сечения.

Рассмотрим теперь модальный расчет трехслойной балки. Определим с помощью методов Ритца и конечных элементов критическую осевую нагрузку для трехслойной балки, защемленной по обоим краям. Несущие слои толщиной в 1 мм – композитные ($E_n = 180$ ГПа, $\mu_n = 0,3$, $\rho_n = 1500$ кг/м³). Материал заполнителя – изотропный с модулем упругости $E_z = 5$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\mu_z = 0,3$ и плотностью $\rho_z = 1000$ кг/м³. Модули сдвига материалов несущих слоев и заполнителя определяются по классической формуле $G = E/(1+\mu)$. Ширина сечения балки 10 мм.

Параметры инерции трехслойки определяются следующим образом:

$$B_p = 2\rho_n b t + \rho_z b h, \quad D_p = \frac{\rho_n b (H^3 - h^3)}{12} + \frac{\rho_z b h^3}{12}.$$

Результаты расчетов, выполненных с помощью оригинальной программы [4], для моделей с различной толщиной слоя заполнителя представлены в табл. 8. Они свидетельствуют о том, что приближенное решение методом Ритца с использованием в качестве базисной только одной балочной функции дает достаточно точные результаты по первой частоте для модели с относительно жестким слоем заполнителя. Причем на всем интервале изменения толщины слоя заполнителя (от 1 до 10 см) расхождение приближенного решения (методом Ритца) и численного (МКЭ) не превышает 2,5 %.

Еще один численный эксперимент проведен с целью определения точности приближенного решения

задачи о собственных колебаниях трехслойной балки с помощью метода Ритца при различных значениях жесткости заполнителя. Для этого проведена серия расчетов двумя методами (метод Ритца и МКЭ) той же самой трехслойной балки с композитными несущими слоями толщиной в 1 мм и слоем заполнителя толщиной 2,5 см. Анализ результатов (табл. 9) позволяет сделать вывод о том, что при малой жесткости слоя заполнителя приближенное решение методом Ритца (с одной базисной функцией для прогиба) дает значение первой частоты, существенно отличающееся от величины, рассчитанной с помощью МКЭ.

Таблица 8

Значения первой частоты собственных колебаний для трехслойной балки с различной толщиной слоя заполнителя

h , мм	Метод Ритца, Гц	МКЭ, Гц	Относительная разница, %
10	107,29	107,05	0,22
30	185,99	184,65	0,73
50	236,94	234,13	1,20
70	275,96	271,50	1,64
90	307,82	301,59	2,07
100	321,81	314,68	2,27

Таблица 9

Значения первой частоты собственных колебаний для трехслойной балки с различной жесткостью слоя заполнителя

E_z , ГПа	Метод Ритца, Гц	МКЭ, Гц	Относительная разница, %
5	383,83	381,55	0,60
1	354,68	345,54	2,65
0,5	326,53	312,07	4,63
0,1	223,70	197,93	13,02
0,05	178,34	149,65	19,17
0,01	108,90	71,15	53,06

Таким образом, мы видим, что метод Ритца обеспечивает приемлемые результаты решения задачи о собственных колебаниях податливых при трансверсальном сдвиге балок и для сплошных композитных и трехслойных балок с относительно высокими значениями трансверсальной сдвиговой жесткости.

На примере задач об изгибе, устойчивости и собственных колебаниях защемленной с двух сторон балки, податливой при трансверсальном сдвиге, исследована точность метода Ритца с удержанием одного члена базисных балочных функций при аппроксимации прогибов. Выявлены границы применимости этого способа решения для расчета сплошных композитных балок и трехслойных балок с податливым заполнителем.

Библиографические ссылки

1. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1988. 272 с.
2. Нестеров В. А. Конечно-элементный расчет трехслойной балки // Вестник СибГАУ. 2011. № 2 (35). С. 48–35.
3. Нестеров В. А. Комплекс программ для получения основных матриц и векторов теории МКЭ для конечных элементов балки, пластины и оболочки, податливых при трансверсальном сдвиге : свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2010611594 / 26.02.2010. 6 с.
4. А. с. о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010611781. Исследование НДС, устойчивости и собственных колебаний трехслойной балки с податливым заполнителем с помощью МКЭ при учете трансверсального сдвига в качестве узлового неизвестного / В. А. Нестеров ; дата рег. 09.03.2010. 8 с.
5. Нестеров В. А. Конечно-элементный анализ устойчивости балок, податливых при трансверсальном сдвиге // Вестник СибГАУ. 2012. № 3 (43). С. 56–62.
6. Нестеров В. А. Модальный конечно-элементный анализ балок, податливых при трансверсальном сдвиге // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 68–74.

References

1. Vasil'ev V. V. *Mekhanika konstruktivnykh iz kompozitsionnykh materialov* (Mechanics of composite structures). Moscow, Mashinostroyeniye, 1988. 272 p.
2. Nesterov V. A. *Vestnik SibGAU*. 2011, no. 2 (35), p. 48–35.
3. Nesterov V. A. *Kompleks programm dlya polucheniya osnovnykh matrits i vektorov teorii MKE dlya konechnykh elementov balki, plastiny i obolochki, podatlivykh pri transversal'nom sdvige: svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* (Complex programs for basic theory of matrices and vectors FEM for finite element beams, plates and shells, compliant with transverse shear: a certificate of state registration of computer programs), number 2010611594 / 26.02.2010. 6 p.
4. Nesterov V. A. *A. s. o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM № 2010611781. Issledovaniye NDS, ustoychivosti i sobstvennykh kolebaniy trekhslonoy balki s podatlivym zapolnitelem s pomoshch'yu MKE pri uchete transversal'nogo sdviga v kachestve uzlovogo neizvestnogo* (A. p. on state registration of computer programs number 2010611781. Study VAT, sustainability and natural oscillations sandwich beams with pliable filler using FEM for transverse shear registered as a node in the unknown), no. 2010611781. 09.03.2010. 8 p.
5. Nesterov V. A. *Vestnik SibGAU*. 2012. no. 3 (43), p. 56–62.
6. Nesterov V. A. *Vestnik SibGAU*. 2013. no. 1 (47), p. 68–74.

© Нестеров В. А., 2014

УДК 534.1: 539.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕБАНИЙ РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОМАШИН
С РАССТРОЙКОЙ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
УМЕНЬШЕННОГО ПОРЯДКА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

О. В. Репецкий¹, До Мань Тунг²

¹Восточно-Сибирский институт экономики и права
Российская Федерация, 664050, г. Иркутск, ул. Байкальская, 258а. E-mail: repetskiy@vsiep.ru

²Иркутская государственная сельскохозяйственная академия
Российская Федерация, 664038, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный
E-mail: manhtungcvp@yahoo.com

Представлен способ моделирования уменьшенного порядка (МУП) для исследования влияния расстройки жесткости лопаток на характеристики колебаний рабочих колес турбомашин методом конечных элементов (МКЭ). Также даны сравнения полученных результатов МУП с экспериментальными данными и результатами, которые получены при использовании МКЭ для полной модели (ПМ) программного комплекса ANSYS, и предложены рекомендации по характеристикам колебаний рабочих колес турбомашин с расстройкой.

Ключевые слова: метод конечных элементов, моделирование уменьшенного порядка, характеристики колебания, расстройка, рабочее колесо турбомашин.

**STUDY OF CHARACTERISTICS OF VIBRATIONS OF MISTUNED BLADED DISKS
OF TURBOMACHINES ON THE BASIS OF REDUCED-ORDER MODELING
BY FINITE ELEMENT METHOD**

O. V. Repetskiy¹, Do Manh Tung²

¹East Siberian Institute of Economics and Law
258A, Baikal str., Irkutsk, 664050, Russian Federation
E-mail: repetskiy@vsiep.ru

²Irkutsk State Academy of Agriculture
Molodezny Settlement, Irkutsk region, 664038, Russian Federation
E-mail: manhtungcvp@yahoo.com

This paper presents reduced order modeling (ROM) technique to investigate the influence of mistuning of bladed stiffness on characteristics vibrations of bladed discs of turbomachines by finite element method (FEM). Also the authors give the comparison of the results of ROM with experimental results and the results, which are obtained using FEM for the full model (FM) and using software ANSYS and some recommendations for characteristics vibrations of mistuned bladed discs of turbomachines.

Keywords: finite element method, reduced order modeling, characteristics vibrations, mistuning, bladed discs of turbomachines.

Роторы турбомашин являются динамическими системами с конструктивной поворотной симметрией (циклически-симметричные системы (ЦСС)), которые позволяют исследовать их динамику на основе одного сектора. На практике в конструкциях всегда возникают отличия между лопатками (по массе, геометрии, материалу и т. д.) из-за изготовления, износа при эксплуатации и других факторов. Все эти малые отличия лопаток (так называемая расстройка параметров) нарушают циклическую симметрию. Причины расстройки параметров (неидентичность секторов) ЦСС могут быть разные. Чаще всего расстройка лопаток является маленькой величиной (т. е. собственная частота лопаток различна в нескольких процентах от номинального значения), но она может привести к возникновению резонансных напряжений, которые выше

оптимальных на 20 % и более. Реальные увеличения максимальных напряжений на отдельных лопатках составляют от 0 до 20 % и зависят от размещения лопаток на диске. Можно предположить, что исследование расстройки будет играть большую роль при проектировании новых турбомашин, а также в правильной оценке и увеличении ресурса уже работающих [1; 2].

МУП используется, чтобы исследовать характеристики динамики ЦСС на основе одного сектора (рис. 1, б). В данной работе используется способ МУП, детально описанный в работах [3; 4], для исследования влияния расстройки лопаток на характеристики колебаний рабочих колес турбомашин, а именно: *собственные частоты колебаний, формы собственных колебаний и максимум отклика вынужденных колебаний*. Расчеты МУП проводятся МКЭ

с помощью треугольных конечных элементов переменной толщины STI218, которые описаны в работах [5; 6]. Результаты данного исследования для рабочего колеса сравнены с экспериментальными данными и с результатами, которые получены с использованием МКЭ для ПМ (рис. 1, а) с использованием программного комплекса ANSYS. Погрешность результатов между методами МУП и ПМ и результатов метода МУП и результатов, полученных с помощью программы ANSYS, определены как

$$\varepsilon_1 = \left| \frac{f_{\text{МУП}}^{\text{расс}} - f_{\text{ПМ}}^{\text{расс}}}{f_{\text{ПМ}}^{\text{расс}}} \right| \cdot 100, \quad \varepsilon_2 = \left| \frac{f_{\text{МУП}}^{\text{расс}} - f_{\text{ANSYS}}^{\text{расс}}}{f_{\text{ANSYS}}^{\text{расс}}} \right| \cdot 100, \quad (1)$$

где $f_{\text{МУП}}^{\text{расс}}$ – собственная частота колебаний рабочих колес с расстройкой, полученная с использованием МУП; $f_{\text{ПМ}}^{\text{расс}}$, $f_{\text{ANSYS}}^{\text{расс}}$ – собственная частота колебаний рабочих колес с расстройкой, полученная с использованием МКЭ для полной модели и программы ANSYS.

Реализация расстройки. Расстройка лопаток моделируется путем изменения эквивалентных жесткостей Λ или изменения собственных частот лопаток, когда они стационарны (собственные частоты консольных лопаток). Эквивалентная расстроенная жесткость k -й формы n -й лопатки представлены в виде [7]

$$\bar{\Lambda}_{b,n}^k = \left(\bar{\omega}_{b,n}^k \right)^2 = \left(1 + \Delta f_n^k \right) \Lambda_b^k, \quad (2)$$

где Λ_b^k – жесткость k -й настроенной формы колебаний консольной лопатки и Δf_n^k – расстройка параметров k -й формы n -й лопатки.

В данной работе рассмотрим расстройку жесткости лопаток путем изменения модуля упругости лопаток. Тогда модуль упругости i -й лопатки определен как [3]

$$E_i = (1 + \Delta f_i) E_0, \quad (3)$$

где E_0 – модуль упругости лопатки без расстройки, Δf_i – параметр расстройки i -й лопатки.

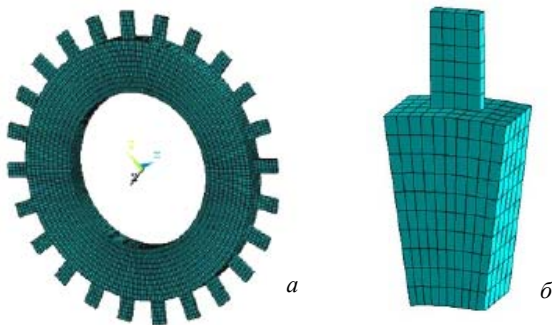


Рис. 1. Модель конечных элементов рабочих колес: а – полный диск; б – один типичный сектор

Общая схема моделирования уменьшенного порядка. Предположим, что степени свободы упорядочены так, чтобы получить блочно-диагональные формы при сборке матриц масс и жесткости всей конструкции. Они представлены в виде [4]

$$M = \begin{bmatrix} M_d & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \otimes \tilde{M}_d & 0 \\ 0 & I \otimes \tilde{M}_b \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_d & 0 \\ 0 & K_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \otimes \tilde{K}_d & 0 \\ 0 & I \otimes \tilde{K}_b \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где I – единичная матрица размера N ; N – число секторов; $\tilde{M}_d$, $\tilde{K}_d$ – матрицы масс и жесткости одного сектора диска; $\tilde{M}_b$, $\tilde{K}_b$ – матрицы масс и жесткости одной лопатки; символ $\otimes$ обозначает оператор Кронекера, описанный в работе [4].

Перемещения одного сектора (рис. 1, б) разделены на две части: перемещение диска с безмассовыми лопатками, которое имеет циклическое свойство (часть форм колебаний диска с лопаткой принадлежат степеням свободы лопатки и обозначаются δ^d , а часть диска – $\mathfrak{g}^d$), перемещение лопатки, закрепленной жестко с диском δ^b . Перемещения всей структуры определены как [4]

$$x = \begin{bmatrix} \mathfrak{g}^d \\ \delta^d \end{bmatrix} a + \begin{bmatrix} 0 \\ \delta^b \end{bmatrix} b, \quad (5)$$

где a – вектор обобщенных координат диска для всех форм, $a = [a_0^T \ a_1^T \ \dots \ a_P^T]^T$; a_n – один вектор обобщенных координат, соответствующих n узловым диаметрам диска; P – максимальное число гармоник или максимальное число узловых диаметров; b – вектор обобщенных координат для всех N лопаток, $b = [b_0^T \ b_1^T \ \dots \ b_N^T]^T$; b_i – вектор обобщенных координат i -й лопатки.

Уравнение движения системы «диск–лопатки» в виде матрицы определено как [4]

$$\begin{bmatrix} I_d + \delta^{dT} M_b \delta^d & \delta^{dT} M_b \delta^b \\ \delta^{bT} M_b \delta^d & I_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{a} \\ \ddot{b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \text{diag}_{k=1, \dots, m_b} [2\zeta^k] \otimes \sqrt{\hat{K}_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{a} \\ \dot{b} \end{bmatrix} + (1 + \gamma) \begin{bmatrix} \hat{K}_d & \delta^{dT} K_b \delta^b \\ \delta^{bT} K_b \delta^d & B \text{diag}_{n=1, \dots, N} \left[\text{diag}_{k=1, \dots, m_b} (1 + \Delta f_n^k) \right] \hat{K}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{dT} F \\ \delta^{bT} F \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $I_d = \mathfrak{g}^{dT} M_d \mathfrak{g}^d$, $\hat{K}_d = \mathfrak{g}^{dT} K_d \mathfrak{g}^d$ – соответственно, матрицы масс и жесткости диска, когда все формы

с матрицей масс нормированы; $I_b = \delta^{b^T} M_b \delta^b$, $\hat{K}_b = \delta^{b^T} K_b \delta^b$ – соответственно, матрицы масс и жесткости N лопаток, когда все формы с матрицей масс нормированы; N – количество лопаток, ξ^k – коэффициент вязкого демпфирования; γ – коэффициент демпфирования структуры; F – соответственно, вектор возбуждающих силы степеней свобод всех лопаток при сборке. Все матрицы в уравнении (6) детально описаны в работах [3; 4].

Характеристики колебаний рабочих колес турбомашин.

Собственные частоты колебаний. Метод МУП определяет собственные частоты колебаний рабочих колес без расстройки в зависимости от числа узловых диаметров и узловых окружностей. Число узловых диаметров одной формы колебаний нумеруется так, чтобы соответствовать одной фазе между смежными лопатками, определенной как [4]

$$\Phi_n = \frac{2\pi n}{N} \quad (n = 0, \dots, P), \quad (7)$$

где n – число узловых диаметров; N – количество лопаток рабочего колеса.

Формы собственных колебаний. В данной работе используем евклидову норму перемещений, чтобы исследовать формы колебаний рабочих колес с расстройкой и без расстройки. Для рабочих колес без расстройки евклидова норма определена в зависимости от числа узловых диаметров и узловых окружностей и является гармонической функцией при присутствии узловых диаметров (см. рис. 6, а, в). Евклидова норма перемещений для собственных колебаний выражена скалярной величиной, называемой формой относительных перемещений лопаток $\bar{\delta}_i^r$. Эта норма перемещений для i -й лопатки определена как [4]

$$\bar{\delta}_i^r = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{N_b} \delta_{j,i}^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \left[\sum_{j=1}^{N_b} \delta_{j,n}^2 \right]}} \quad (i = 1, \dots, N), \quad (8)$$

где $\delta_{j,i}$ – перемещение j -й степени свободы i -й лопатки; N_b – число степеней свободы одной лопатки; N – число лопаток в системе.

Максимум отклика вынужденных колебаний. В данной работе используем евклидову норму перемещений, чтобы исследовать максимальную амплитуду колебаний лопаток системы «диск–лопатки» с расстройкой и без расстройки. Для настроенной системы пик нормы перемещений всех лопаток одинаков, но это не так для расстроенной системы. Евклидова норма перемещений для вынужденных колебаний является скалярным выражением, оценивающим отклонение амплитуды лопаток, и определена как [4]

$$\bar{\delta}_n = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_b} \delta_{j,n}^2} \quad (n = 1, \dots, N), \quad (9)$$

где $\bar{\delta}_n$ – евклидова норма перемещений лопаток; N_b – число степеней одной лопатки; $\delta_{j,n}$ – перемещение j -й степени n -й лопатки.

Определение возбуждающей силы. Возбуждающие силы – это гармонические функции от времени, отличающиеся фазой между секторами. Фаза i -й лопатки определена как [4]

$$\Phi_i = \frac{2\pi C(i-1)}{N} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (10)$$

где C – порядок энергии возбуждений.

Вектор внешней возбуждающей силы представлен в виде [4]

$$F = \{ f e^{j\Phi_1} \quad f e^{j\Phi_2} \quad \dots \quad f e^{j\Phi_N} \}^T = \sqrt{N} e_{C+1} \otimes f, \quad (11)$$

где e_{C+1} – $(C+1)$ -й столбец матрицы Фурье; f – вектор возбуждающей силы одной лопатки.

На физической модели (рис. 2) математическое уравнение распределения вектора газодинамических сил $\{f_i\}$ по длине лопатки может быть описано следующим видом [5]:

$$\{f_i\} = [0 \quad P_y \quad P_x \quad m_z \quad 0 \quad 0]^T, \quad (12)$$

где $P_y = P_y(z, t)$ и $P_x = P_x(z, t)$ – возбуждающие силы по направлениям x и y ; $m_z = m_z(z, t)$ – крутящий момент (рис. 2). Определение P_x, P_y, m_z детально описано в работе [5].

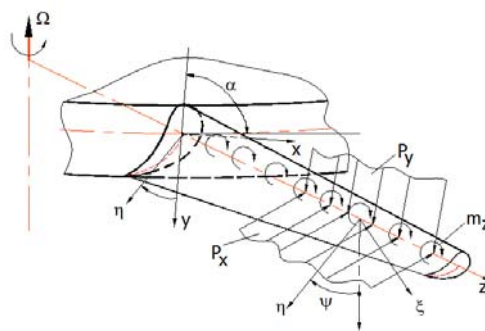


Рис. 2. Физическая модель лопатки ротора турбины под действием газодинамических сил

Результаты исследования. В качестве примера рассмотрим модельное рабочее колесо, содержащее 24 лопатки. Геометрические размеры и характеристики материала рассчитываемой конструкции: внутренний радиус 0,0135 м, внешний радиус 0,06 м, толщина диска и лопатки 0,002 м, длина лопатки 0,036 м, ширина лопатки 0,012 м, модуль упругости материала 210 ГПа, плотность 7850 кг/м³, коэффициент Пуассона 0,3. Возбуждающие силы приложены на все узлы пика каждой лопатки: $\{f_i\} = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T$, коэффициент вязкого демпфирования $\xi^k = 0$, коэффициент демпфирования структуры $\gamma = 0,6$ %. Параметры расстройки приведены в табл. 1.

Конечно-элементная модель сектора «диск–лопатки» для МУП и системы «диск–лопатки» при использовании МКЭ для ПМ на основе треугольных конечных элементов STI218, соответственно, содержит 174 и 3 312 степени свободы.

Результаты расчета собственных частот системы «диск–лопатки» без расстройки при использовании МУП, ПМ и программного комплекса ANSYS приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Подобные результаты исследований колебаний рабочего колеса с расстройкой параметров по собственным частотам, погрешностям результатов и евклидовым нормам перемещений лопаток методов МУП, ПМ и программы ANSYS приведены на рис. 4–6.

Максимальная амплитуда перемещений лопаток, соответствующая порядкам энергии возмущения $C = 5$, приведена на рис. 7.

Таблица 1

Параметры расстройки

Лопатка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Δf_i (%)	–0,52	–1,87	–1,82	–0,39	–5,01	–0,85	1,42	7,62	2,93	2,72	2,77	–4,92
Лопатка	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Δf_i (%)	–8,07	–4,91	5,93	–6,92	–0,41	0,43	1,84	–5,47	2,39	3,81	4,11	3,92

Таблица 2

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений частот собственных колебаний модельного диска [8]

Формы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Эксп. [1]	210	265	340	501	681	803	922	938	961	1008	1027	1030
МУП	255,1	260,1	321	492	669	808	911,9	987	1041	1079	1104	1119
ПМ	255,1	260,1	321	492	669	808	911,9	987	1041	1079	1104	1119
ANSYS	265	284	318	491	655	778	865	929	973	1006	1026	1039
Формы	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Эксп. [1]	1032	1386	1362	1723	2109	2714	3452	4102	4738	5112	5513	5983
МУП	1123	1461	1521	1737	2147	2713	3354	4002	4613	5155	5605	5947
ПМ	1123	1461	1521	1737	2147	2713	3354	4002	4613	5155	5605	5947
ANSYS	1043	1481	1524	1743	2208	2815	3447	4040	4567	5154	5655	5700



Рис. 3. График частот собственных колебаний «диск–лопатки» без расстройки в зависимости от числа узловых диаметров n и узловых окружностей m

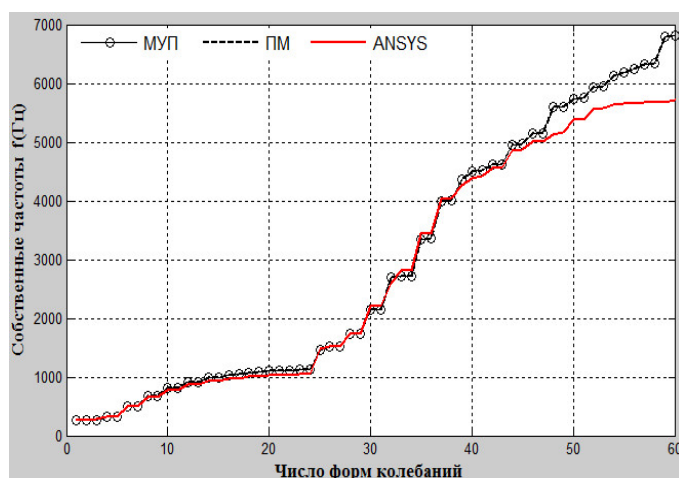
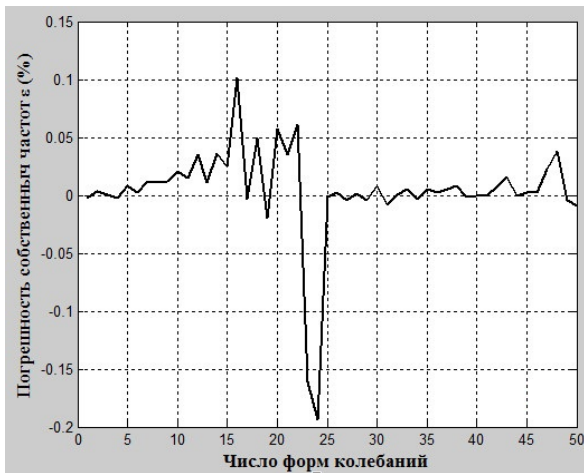
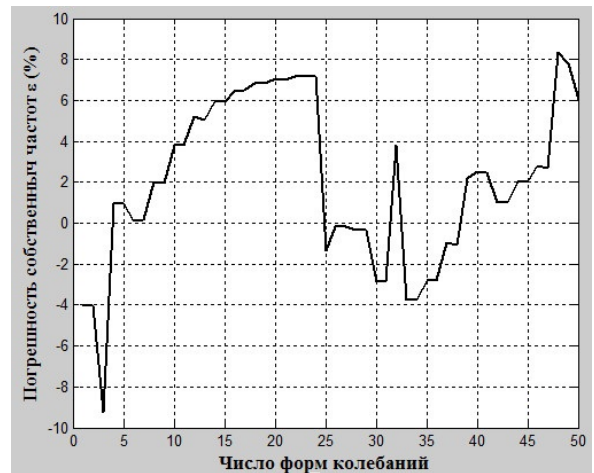


Рис. 4. График собственных частот рабочего колеса с расстройкой параметров

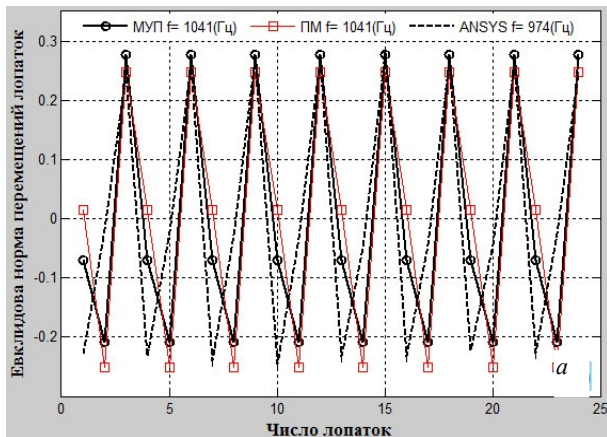


а

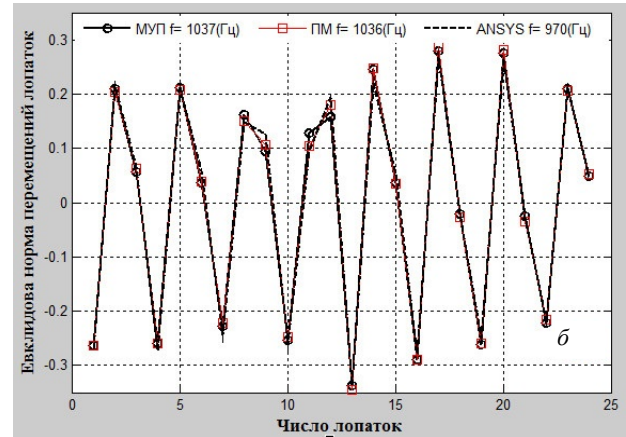


б

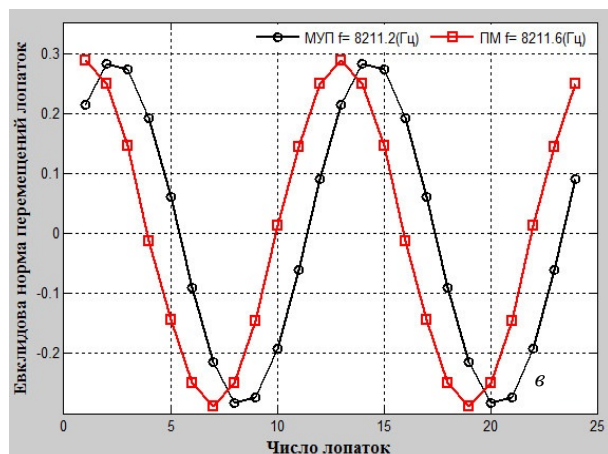
Рис. 5. Погрешность результатов собственных частот:
а – при использовании МУП и ПМ; б – при использовании МУП и программы ANSYS



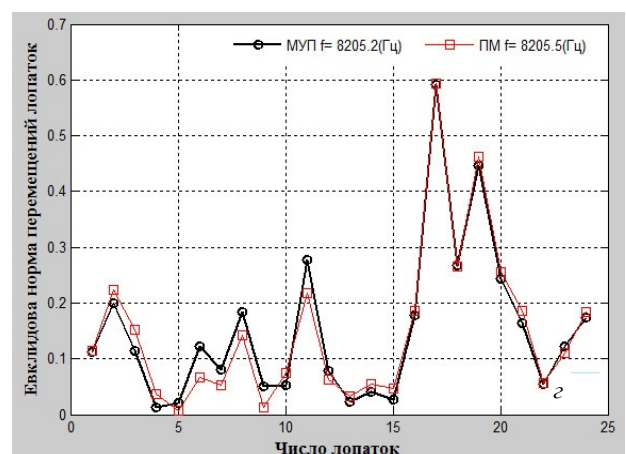
а



б



в



г

Рис. 6. График евклидовой нормы перемещений лопаток, соответствующей собственным расстроенным частотам

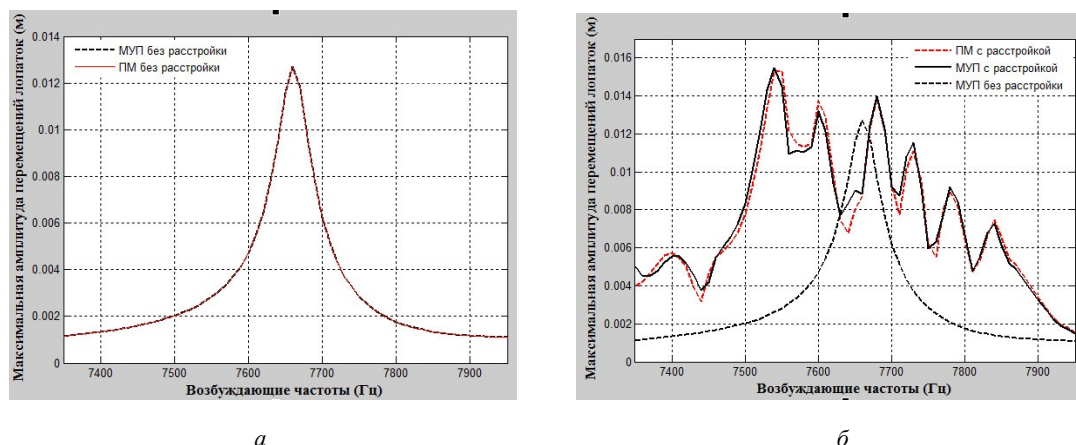


Рис. 7. График максимальных значений отклика вынужденных колебаний рабочих колес при $C = 5$

В работе представлен способ МУП для исследования колебания рабочих колес турбомашин без расстройки и с расстройкой жесткости лопаток. В этом способе использован подход составляющей формы: один сектор системы «диск–лопатки» разделен на две части. Это диск с безмассовыми лопатками, жестко защемленный на внутреннем радиусе, и консольная лопатка, жестко защемленная на поверхности между диском и лопаткой [9]. При этом используются матрицы масс и жесткости конечных элементов одиночной лопатки. Поэтому расстройка жесткости лопатки легко моделируется в расчете. Дополнительно при использовании МУП число степеней свободы расчета значительно уменьшается (из 3 312 степеней свободы при использовании ПМ число степеней свободы уменьшено до 174 для МУП), что снижает трудоемкость и численные затраты времени на ЭВМ.

Из рис. 3, 6 и 7 видно, что на графике собственных частот рабочих колес без расстройки в зависимости от числа узловых диаметров и окружностей часто появляются поворотные зоны частот. В этих зонах амплитуды собственных колебаний и максимальные амплитуды вынужденных колебаний рабочих колес даже с маленькой расстройкой жесткости сильно изменяются как качественно, так и количественно (рис. 6, з; 7, б).

Из табл. 2 и рис. 5 видно, что численные результаты МУП для рабочих колес без расстройки и с расстройкой МКЭ на основе треугольных конечных элементов STI218 хорошо совпадают с экспериментальными данными и результатами программного комплекса ANSYS. Полученные результаты 2-х этих методов очень близки. Однако использование треугольных конечных элементов STI218 позволяет учитывать модели со сложной геометрией сечения. Здесь представлено влияние расстройки жесткости лопаток на характеристику колебаний рабочих колес турбомашин. Эти результаты совпадают с выводами работ, которые опубликованы авторами Gisli Ottarsson [3], J. R. Bladh [4], и позволяют решать задачи чувствительности колебаний и повышения прочности рабочих колес с расстройкой при проектиро-

вании новых и эксплуатации старых конструкций турбомашин.

Данные исследования являются базовыми для дальнейшего анализа влияния расстройки параметров на долговечность рабочих колес турбомашин.

Библиографические ссылки

1. Мехатроника / Б. Хайманн [и др.]. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2010.
2. Мироновский С. Н., Репецкий О. В., Рыжиков И. Н. Эффект расстройки лопаток рабочих колес турбомашин // Вестник стипендиатов DAAD. 2002, № 2. С. 75–81.
3. Ottarsson G., Castanier M. P., Pierre C. A reduced-order modeling technique for mistuned bladed disks // Journal AIAA, 1994–1640. P. 2552–2562.
4. Jan Ronnie Bladh. Efficient predictions of the vibratory response of mistuned bladed disks by reduced order modeling. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the University of Michigan, 2001.
5. Репецкий О. В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 1999.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975.
7. Bladh J. R., Castanier M. P., Pierre C. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks – Part I: Theoretical Models // Journal of Engineering for Gas turbines and Power, 2001. № 8. P. 89–99.
8. Борискин О. Ф., Кулибаба В. В., Репецкий О. В. Конечно-элементный анализ колебаний машин. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 1989.
9. Hurty W. C. Dynamic analysis of structural systems using component modes // Journal AIAA. 1965. № 4. P. 678–685.

References

1. Khaymann B., Gert V. Popp K., Repetskiy O. V. *Mekhatronika* (Mechatronics). Novosibirsk, SO RAN Publ., 2010.

2. Mironovskiy S. N., Repetskiy O. V., Ryzhikov I. N. *Effekt rasstroyki lopatok rabochikh koles tyrbomashin* (effect of mistuning blades on the rotors of turbomachines). *Vestnik stipendiatov DAAD*, 2012, no. 2, p. 75–81.
3. Gisli Ottarsson, Mathew P. Castanier, Christophe Pierre. A reduced-order modeling technique for mistuned bladed disks. *Journal AIAA*, 1994–1640, p. 2552–2562.
4. Jan Ronnie Bladh. Efficient predictions of the vibratory response of mistuned bladed disks by reduced order modeling. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the University of Michigan, 2001.
5. Repetskiy O. V. *Komp'yuternyj analiz dinamiki i prochnosti turbomashin* (Computer analysis of dynamics and strength turbomachines). Irkutsk, IrGTU Publ., 1999.
6. Zenkevich O. *Metod konechnykh jelementov v tehnike* (The Finite Element Method in engineering science). Moscow, Mir Publ., 1975.
7. Bladh J. R., Castanier M. P., Pierre C. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks – Part I: Theoretical Models. *Journal of Engineering for Gas turbines and Power*, 2001, no. 8, p. 89–99.
8. Boriskin O. F. Kulibaba V. V. Repetskiy O. V. *Konechnojelementnyj analiz kolebaniy mashin* (Finite element analysis of vibration machines). Irkutsk, IrGTU Publ., 1989.
9. Hurty W. C. Dynamic analysis of structural systems using component modes. *Journal AIAA*, 1965, no. 4, p. 678–685.

© Репецкий О. В., До Мань Тунг, 2014

УДК 005; 519.7; 303.732

AUTOMATIC LINEAR DIFFERENTIAL EQUATION IDENTIFICATION IN ANALYTICAL FORM*

I. S. Ryzhikov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru

In this study a multi-agent evolutionary strategies algorithms system is considered in application to linear dynamic system identification problem solving. The proposed approach is based on previous results of designing the universal simultaneous parameters and structure identification technique that uses the observations of system output and input. Every agent is model-based and has an aim to find an extremum for agent's criterion. The solution of the problem is symbolic and can be automatically found for the small samples and noised data.

Keywords: evolutionary strategies, multi-agent system, identification, structure and parameters, differential equation.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В АНАЛИТИЧЕСКОМ ВИДЕ

И. С. Рыжиков

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru

Рассматривается применение многоагентной системы алгоритмов эволюционных стратегий для решения задач идентификации линейных динамических систем. Предлагаемый подход основан на результатах предыдущих работ по разработке и совершенствованию универсального метода, позволяющего автоматически решать задачу идентификации одновременно параметров и структуры объекта по данным наблюдений его входа и выхода. Каждый агент основан на модели и имеет цель найти оптимум функционала; функционалы отличаются для всех агентов. Решение ищется в аналитическом виде автоматически, в том числе и для случаев малой выборки.

Ключевые слова: эволюционные стратегии, многоагентные системы, идентификация, структура и параметры, дифференциальное уравнение.

* The study was supported by The Ministry of education and science of Russian Federation, project № 14.B37.21.1521. The second International Workshop on Mathematical Models and its Applications (IWMMA 2013).

The problem of making a model for a dynamic plant or process is not new and has a lot of definitions. For some problem definitions there are quite a lot of techniques, so problems can be called classic today. For instance, there are techniques that are based on the mathematical statistics maximum likelihood method [1] or techniques that are based on autocorrelation function and nonparametric kernel statistics [2]. Still we can face different systems or definitions that require new approaches to reach a success, since the nature of the task makes it useless or impossible to apply common techniques.

One of these problems is so-called identification of the black box, when the structure is unknown and there are only observations of inputs and outputs. It is still possible to make a model in a form of stochastic differential equation [3], if the order of the equation is known and there is an acceptable observation of the reaction on the unit-step function. Also, it is possible to estimate the transient function via fuzzy output estimation [4], artificial neural network modelling [5; 6], genetic programming [7], or another function estimation technique. Every of suggested methods have their own advantages and disadvantages. But all of them allow to find or the estimation for the observed time segment only, or the estimation, which symbolic representation makes it useless for analytic methods of control or analysis. Some of them are dependent on the size of the sample. In this study we consider a special case of the problem, when the observations are noised, the size of the sample can be small and the aim is not just to estimate the dynamic model of the system but estimate it in symbolic form.

In the article [8] the linear dynamic system identification with the 2nd order ordinary differential equation via the genetic algorithm was examined. Although, the genetic algorithm is a well-known and reliable global optimization technique, it is more preferable to apply the seeking not only on the given compact and avoid quantizing of the arguments. That is why it was suggested to implement the optimization technique for the real valued arguments.

In the previous work the approach of reducing the initial identification problem to extremum problem on the real vector field was suggested and the modified and hybrid evolutionary strategies algorithm was designed and examined. The efficient algorithm settings were found to be promising in application to the identification task.

Linear differential equations models are useful in many different fields, so the linear dynamics identification problem is significant and takes place in different problem definitions. The filtering problem and articulatory identification [7; 9], are related to the stochastic ODE identification. The proposed approach can be extended to stochastic ODE or Bessel equations identification. Hence, it is also can be applicable to Markov processes [10; 11]. That is why the linear differential equation identification can be useful in some fields related to speech recognition problem, gesture recognition problem and, probably, many more.

Let one have the sample of one input, one output system measurements $\{y_i, u_i, t_i\}, i = \overline{1, s}$, where s is its size, $y_i \in R$ is dynamic system output measurement at time t_i , and $u_i = u(t_i)$ is control measurement. It is also known, that the dynamic system is linear and stationary, so it can be described with the ordinary differential equation (ODE):

$$a_k \cdot x^{(k)} + a_{k-1} \cdot x^{(k-1)} + \dots + a_0 \cdot x = b \cdot u(t), \quad x(0) = x_0. \quad (1)$$

Here x_0 is supposed to be known. In the case of the transition observation, we can put forward a hypothesis about initial point: the system output is known at time $t = 0$ and the derivative values can be set to zero, because usually the system observation starts with it's being in the steady state. In general, the initial point can be approximated or even being the part of optimization problem. Using the sample data we need to identify parameters and the system order m , which is assumed to be limited, so $m \leq M, M \in N$. M is a parameter that is set by the researcher. This value limits the structure of the differential equation, i. e., it limits the ODE order. It is also assumed that there is an additive noise $\xi: E(\xi) = 0, D(\xi) < \infty$, that affects the output measurements:

$$y_i = x(t_i) + \xi_i. \quad (2)$$

Since the identification problem definition requires the model in symbolic form, the system structure is needed. For the ODE structure can be defined with the order of the differential equation and its parameters. That is why we put forward a hypothesis about ODE order, that it is less than chosen maximum order for the equation M . So now, the proposed approach is underparametrized.

Without loss of the generality, let the leading coefficient of ODE be the constant equal to 1, so that

$$x^{(k)} + \frac{a_{k-1}}{a_k} \cdot x^{(k-1)} + \dots + \frac{a_0}{a_k} \cdot x = \frac{b}{a_k} \cdot u(t), \quad (3)$$

or

$$x^{(k)} + \tilde{a}_k \cdot x^{(k-1)} + \dots + \tilde{a}_1 \cdot x = \tilde{b} \cdot u(t). \quad (4)$$

Then one can be searching for the solution of the identification task as a vector of parameters for linear differential equation with the order m

$$\hat{x}^{(m)} + \hat{a}_m \cdot \hat{x}^{(m-1)} + \dots + \hat{a}_1 \cdot \hat{x} = \hat{a}_0 \cdot u(t), \quad \hat{x}(0) = x_0, \quad (5)$$

where the vector of equation parameters $\hat{a} = (0, \dots, 0, \hat{a}_m, \dots, \hat{a}_1, \hat{a}_0)^T \in R^n$, $n \leq M+1$, delivers an extremum to the functional

$$I(a, n) = \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{x}(t_i)| \Big|_{\hat{a}=a} \rightarrow \min_{a \in R^n, n \leq M+1}. \quad (6)$$

In general case, the solution $\hat{x}(t)$ is evaluated with a numerical integration technique, because the control function has no analytical form, rather is given algorithmically. We prefer the criterion (6) instead of quadratic criteria because of its robustness.

Previous study was focused on designing a special technique that allows automatically estimate the order and the parameters with an algorithm, which argument is a vector with fixed length. The advantage of that technique is an ability of simultaneous problems solving. Anyway, the main disadvantage was the fact that proposed reduction required a special scheme for integration of ODE. And since the order reduction is connected with setting the first vector's arguments to 0, the optimization algorithm should deal with this fact. Actually, it means that for stochastic optimization algorithms on the real vector field some special modifications are needed to be designed and examined, because of the solution sensitiveness to small disturbances that takes place.

The current study is based on another principle of order and parameters estimation, but still the algorithm provides automatic simultaneous seeking. Let every optimization problem for different values of variable n be solving with a distinct algorithm.

As a basis of the optimization technique the evolutionary strategies algorithm was chosen. The basic idea of this algorithm is described in [12]. This heuristic evolution-based technique was chosen, because the identification problem leads to solving the multimodal optimization task with complex criterion, that can be evaluated only numerically. The system structure and its parameters are defined with an integer and a vector. The criteria (6) for these vectors are complex and sensitive to its components, which are changing by stochastic search operators. This is why we have to develop the specific modification for the global optimization technique. The proposed approach is based on hybridized and modified evolutionary strategies algorithm (HMES).

Let every individual be represented with tuple

$$H_i = \langle op^i, sp^i, fitness(op^i) \rangle, \quad i = \overline{1, N_I},$$

where $op_j^i \in R, j = \overline{1, k}$ is the set of objective parameters

of the differential equation; $sp_j^i \in R^+, j = \overline{1, k}$ is the set of strategic parameters; N_I is the population size;

$fitness(x): R^k \rightarrow (0, 1], fitness(x) = \frac{1}{1 + I(x)}$ is the fitness function.

Selection types were borrowed from the genetic algorithm: proportional, rank-based and tournament-based. The algorithms in this study are based on produces one offspring from two parents and every next population have the same size as previous. Recombination types initially were chosen from the intermediate, weighed, randomly weighed and discrete crossovers. The mutation of every offspring's gene happens with the chosen probability p_m . If we have the random value $z = \{0, 1\}, P(z = 1) = p_m$, which is generated for every current objective gene and its strategic parameter then

$$op_i^{offspring} = op_i^{offspring} + z \cdot N(0, sp_i^{offspring}),$$

$$sp_i^{offspring} = |sp_i^{offspring} + z \cdot N(0, 1)|,$$

where $N(m, \sigma^2)$ is the normally distributed random value with the expected value m and the variance σ^2 . The other way of implementing the mutation operand is with using the exponential adaptation of strategic parameters with an extra parameter of adaptation τ :

$$op_i^{offspring} = op_i^{offspring} + z \cdot N(0, sp_i^{offspring}),$$

$$sp_i^{offspring} = sp_i^{offspring} \cdot e^{\tau \cdot z \cdot N(0, 1)}.$$

The stochastic evolutionary algorithm was hybridized with stochastic coordinate-wise optimization technique. Let N_1 randomly chosen individuals for N_2 randomly chosen objective chromosomes are changing with N_3 iterations of local search. The local optimization step is h_l . After every circle and iteration the initial point is being replaced with best solution. If all others solutions are worse, it does not change.

During the development of the ODE identification system that was based on modified evolutionary strategies algorithms parallelization some investigations were done. First, the sample for the ODE with chosen order was generated, and then every client program was searching for the best parameters of model. Every client was working with its own order. After the system stops evaluations, it brings as many models with different orders of ODE, as many clients were launched. Here we present some results of relation between the maximum fitness function values for the best solution found and the order of the system. On the fig. 1 diagrams are demonstrating this relation for the samples generated by systems with different orders of the ODE: a – second order; b – fourth order, c – sixth order, d – eighth order. So, the every sample was identified with ODE, orders of models varied from 1st to 9th. The algorithm is stochastic, that is why the results were averaged for 20 runs in every case. The settings of algorithms were examined, so every client had the same and the most efficient settings due to efficiency estimation done.

On these figures one can see that for the every system, the model with the same order fits best than other models. Moreover, increasing the difference in orders between the model and the system leads to decreasing the fitness value. The relation has a form of unimodal mapping with the pike in point with correct order. That is why it was suggested to develop an algorithm that would reallocate resources for all HMES solving optimization problems related to ODE parameters identification for different orders of equation.

We skipped the varying of all the HMES settings in the current research. First of all, the aim of this study was to develop the identification technique that is based on a different approach for estimation of the order. We do believe that the paradigm would be successful with any settings that are efficient enough to reach the adequate estimation. Second of all, in previous studies [13; 14] and [15] a lot of settings investigations were done, also for the algorithm that is described above. Hence, the most

efficient settings were chosen. In a further work there would be another complete examination, since there is no doubt that with the new paradigm another algorithm's settings could improve the efficiency.

As it was mentioned earlier, every HMES is applied for the different ODE order. For instance, let the parameter be set: $m = 9$, so there would be 9 different extremum problems with criterion (6) for $n = \overline{2, 10}$. Let the every HMES be the agent with its own aim – to find best solution on the given space and computational resources. Working in cooperation, these agents are trying to figure out, which one of them is the most efficient, and then to reallocate all the resources between agents. In the current work we consider a simple cooperation between the agents; reallocation and cooperation both can be called momentary and proportional-based. It is also possible to implement the dynamic reallocation and based on set of different characteristics.

Let $best_i, i = \overline{1, m}$ be the fitness of the best solution found by the i -th algorithm. Similarly, let $size_i$ be the size of the population, $N_{1,i}, N_{2,i}$ – parameters for local optimization, $p_{m,i}$ – mutation probabilities, k_i – number of parameters. To prevent collapse of any agent, the minimum population size $Min_size > 0$ is needed. So, if the sum of all the individuals in populations is $Sum_size = \sum_{i=1}^m size_i$, then the free resources are $Free = Sum_size - Min_size$.

In the simplest case, when the agents are model-based reaction agents the reallocation can be implemented in following form:

$$size_i = round(f_w(i, best, a_w) \cdot Free),$$

where $f_w : N \times R \times R_w \rightarrow [0; 1]$ is increasing weight function and $\forall best_i^* \in best^*, best_i \in best : best_i^* > best_i \Rightarrow f_w(i, best^*, a_w) > f_w(i, best, a_w)$; a_w – are the set of its parameters; $round : N \rightarrow R$ turns its argument to nearest integer. We considered these weight functions:

$$f_w^1(i, best) = \frac{best_i}{\sum_{j=1}^m best_j} \cdot Free, \quad (7)$$

$$f_w^2(i, best, a_w) = \frac{e^{a_w \cdot best_i}}{\sum_{j=1}^m e^{a_w \cdot best_j}} \cdot Free, a_w > 0. \quad (8)$$

Of course, using the best solution of every HMES is not the only way of how to design the scheme. It is also possible to use, for example, the average of fitness function.

To provide the investigation of the scheme testing samples were generated: 10 for every order from first to ninth. Parameters of the systems were randomly

generated: $\hat{a}_k^i = U(0, 5)$, $\hat{b}_k = U(0, 5)$, $i = \overline{1, 9}$, $k = \overline{1, i}$, where $U(0, 5)$ is uniformly distributed random value. The time of the process was set to 5. The control function was the step function, $u(t) = 1$. For sample forming $s = 50$ points were taken randomly. For every task 10 runs of the algorithm were executed. The goal of examination is to investigate the approach, determine its characteristics.

After examining the HMES algorithm in previous works, it was suggested to use the following settings: 50 individuals for 50 populations, local optimization parameters are $N_1 = 10$, $N_2 = 10$ and $N_3 = 1$ with $h_l = 0, 1$, the tournament selection with the tournament size equals 2, the discrete crossover and the mutation with the probability $p_m = \frac{1}{k}$.

One can be interested in if there is resources reallocating does it need special regularization, since the different agents works with different dimension and so, requires more or less resources. In this work two different investigations were made. The first thing is that there is no relation between efficiency increasing and increasing the number of individuals or the number of local optimization steps. For every sample and every algorithm 10 more tests with 10 launches in every of them were

made: 1 – $N_{1,j} = 10 + j \cdot 10$, $j = \overline{1, 10}$, 2 – $N_{1,j} = 50 + 10 \cdot j$. On the fig. 2, a, b similar diagram to one that was shown on fig. 1 is presented for the investigations of increasing local search resources and individuals, respectively. The sample was generated with the system of the 2nd order.

On the fig. 2, both 2, a and 2, b , there are different polylines; each is the average of the solution fitness function for the given experiment for different orders of model. The first interesting fact is that with increasing number of local search steps, we slightly improved the efficiency. In a test with varying the population size the variation of different runs for the same order have larger variance in a scaw zone. Varying the local optimization steps leads the increasing of variance in a pike and shifts the best solution to the next to proper order solution more often than in test with population size.

Anyway, the statistics shows that varying both the number of steps and the size of population gives no sufficient improvements. Moreover, sometimes it even leads to small distortions in identifying the proper order. That is why, reallocating of the resources in the new heuristic algorithm is made due to the common sense.

Now let us consider the main strategy of reallocating and examine how the varying of the weight function parameters would react on its efficiency. The reallocating strategy in the current study was implemented as it is shown below:

- run the same number of circles every HMES;
- reallocate the resources for the number of individuals;
- set the number of individuals that are going to be improved to $round(size_i \cdot 0, 2)$;
- check the stop criterion.

As the stop criterion it is possible to use the achievement of desired accuracy of the model or the exceeding of evaluations.

Here we investigate the influence of the parameter a_w value on the sizes of populations. First, we compare the distribution of the resources by the end of algorithm evaluation for different parameter values. For instance, the system of the 2nd order was chosen, the results are the average for 20 launches. The final sizes of populations in dependence of parameter's value are shown on fig. 3. Another diagram on fig. 4 is to show the dependence of final solution fitness for every order of the parameter value. The linear polyline is for weight function (7).

One can see that with increasing of the weight coefficient the pike of resources distributions are becoming

narrower. It means that there can be lack of resources to improve the solutions for other orders of ODE and in the same time there can be no improvement of solution that is already found. That solution, actually, is forming a pike.

On this figure once can easily see the problem that was noticed above. The large values of weight lead to a gap in identification efficiency for orders that are far from the pike. The next fig. 5 shows the character of the best individual fitness function value, average fitness for the population and population size. To fit everything on the same scales, we normed the population size, its max value was 178. And best fitness value were normed by its min and max values.

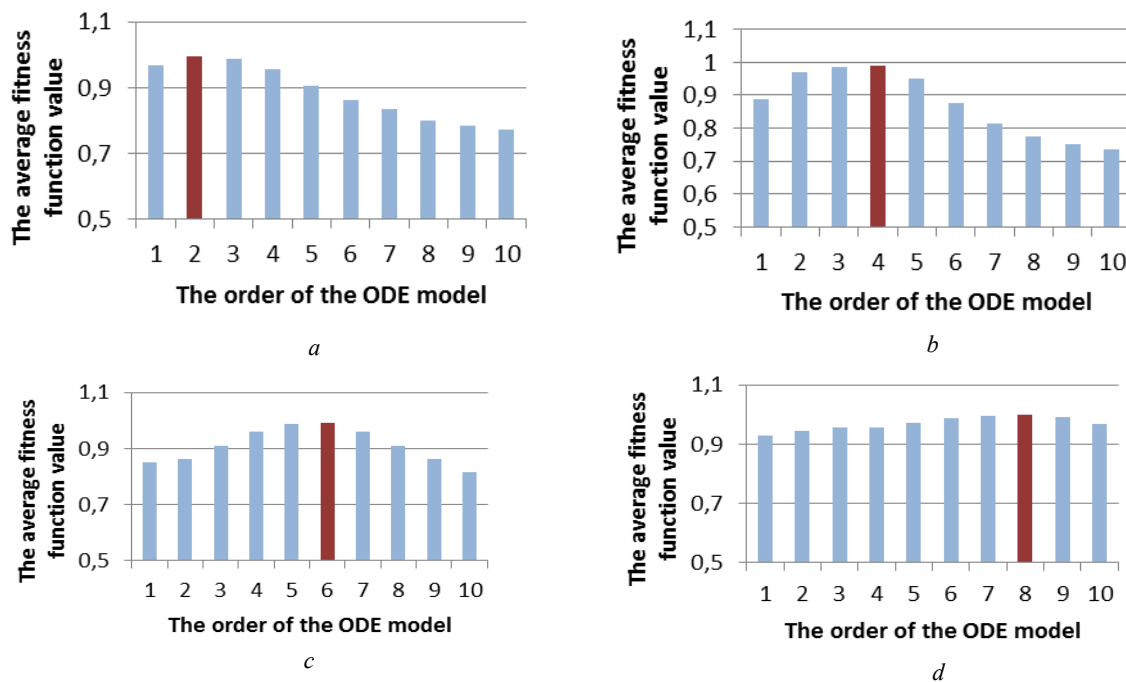


Fig. 1. Fitness function of the best solution found average value in relation with the order of ODE model for different cases: samples generated by 2nd order ODEs (a); samples generated by 4th order ODEs (b); samples generated by 6th order ODEs (c); samples generated by 8th order ODEs (d)

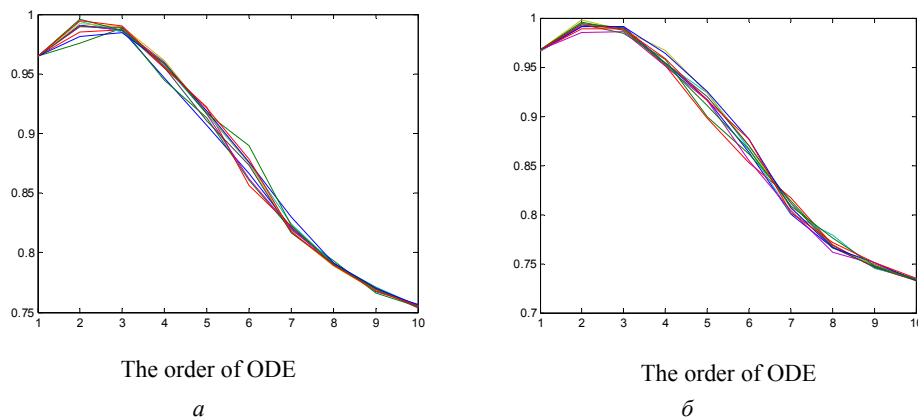


Fig. 2. Varying the number of local optimization steps (a), and size of population (b), for different orders of model

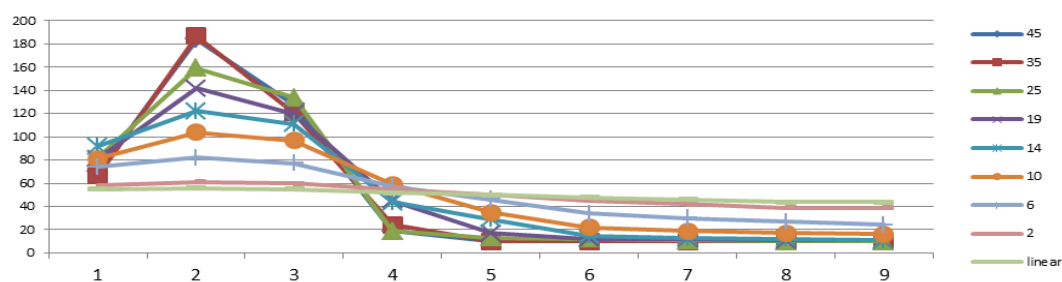


Fig. 3. Distribution of populations' sizes in relation to weight parameter value

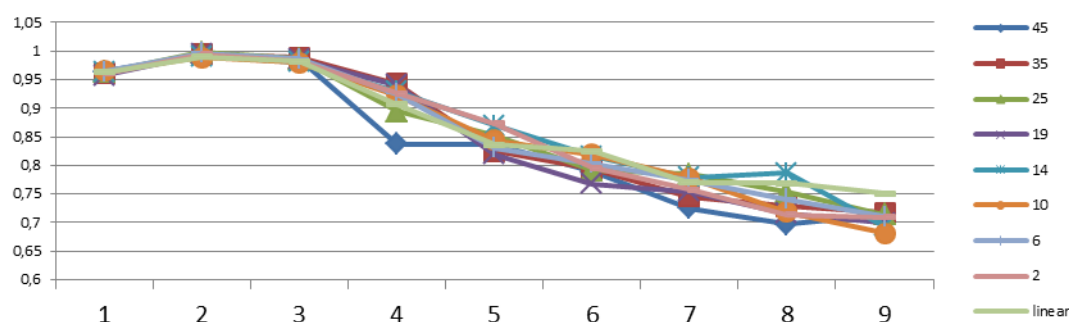


Fig. 4. The best solution fitness function value in relation to weight parameter value

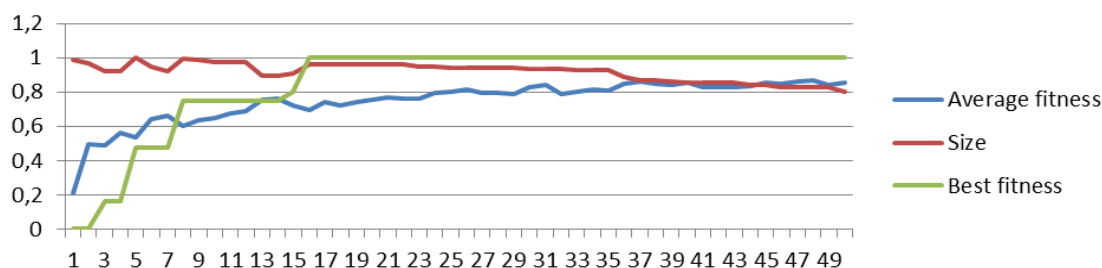


Fig. 5. The characteristics of the population

All of the settings that were listed above and the weight function (8) with parameter $a_w = 19$, which was determined to be the most reliable the proposed approach during the test demonstrated its high efficiency with less computational efforts as the HMES algorithm with rounding of its parameters for some problems. In the further work the aim of investigation would be to compare both algorithms and to design and examine the new approaches to reallocate resources.

The proposed approach can be used for automatic identification of the linear dynamic system by its observations. In this paper we presented a scheme of interaction between different optimization algorithms. Further work despite would it be the HMES with rounding or the co-evolution-like scheme is focusing also on implementing the cooperation of three different but dependent optimization problems: identification of the structure and parameters, identification of the input, identification of the starting point.

But first of all, after examining different ways of interaction between agents and reallocating techniques the approach we looking forward to implement identification system that would allow solving MIMO dynamic problems with unknown order of every system state.

References

1. Astreon K. J., Bohlin T. Numerical Identification of Linear Dynamic Systems from Normal Operating Records. Technical paper. IBM Nordic Laboratory, Lidingo, Sweden: 38 p., 1967.
2. Medvedev A. V. Identification and control for linear dynamic system of unknown order. Optimization Techniques IFIP Technical Conference. Berlin – Heidelberg – New York: Springer-Verlag, p. 48–56, 1975.
3. Zoteev V. Parametrical identification of linear dynamical system on the basis of stochastic difference equations. Matem. Mod. 2008. Vol. 20, no. 9, p. 120–128.

4. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy control. Addison Wesley Longman, Inc. 1998. 502 p.
5. Tan Y., Dong R., Chien H., He H. Neural networks based identification of hysteresis in human meridian systems. Int. Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2012. Vol. 22, no. 3, p. 685–694.
6. Jovanovic O., Identification of Dynamic System Using Neural Network // Architecture and Civil Engineering. 1997. Vol. 1, no. 4, p. 525–532.
7. Cao H., Kang L., Chen Y., Yu J. Evolutionary modeling of systems of ordinary differential equations with genetic programming. Genetic Programming and Evolvable Machines 1 (40) p. 309–337, 2000.
8. Parmar G., Prasad R., Mukherjee S. Order reduction of linear dynamic systems using stability equation method and GA. International Journal of computer and Information Engineering 1:1, 2007.
9. Reimer M., Rudzicz F. Identifying articulatory goals from kinematic data using principal differential analysis. Proceedings of Interspeech 2010, Makuhari Japan. 2010. P. 1608–1611.
10. Mineiro P., Movell J. R., Williams R. J. Modeling path distributions using partially observable diffusion networks: a Monte-Carlo approach. Technica IReport CogSci.UCSD-99.01, Department of Cognitive Science, UCSD, San Diego, 1999.
11. Saerens M. Viterbi algorithm for acoustic vectors generated by a linear stochastic differential equation. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Detroit, 1995, p. 233–236.
12. Schwefel Hans-Paul Evolution and Optimum Seeking : New York: Wiley & Sons., 1995.
13. Ryzhikov I., Semenko E. Evolutionary Strategies Algorithm Based Approaches for the Linear Dynamic System Identification. Adaptive and Natural Computing Algorithms, Springer: p. 477–483, 2013.
14. Ryzhikov I., Semenko E. Modified Evolutionary Strategies Algorithm in Linear Dynamic System Identification. ICINCO (1): p. 618–621, 2012
15. Ryzhikov I., Semenko E. The Application of Evolutionary Algorithm for the Linear Dynamic System Modelling. SIMULTECH: p. 234–237, 2012.

© Рыжиков И. С., 2014

УДК 629.19.22

ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОРОШКОВ И ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

В. Н. Саунин, С. В. Телегин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: telegin@sibsau.ru

Приведены исследования химического состава, морфологии и структуры порошков магнитомягких материалов из кристаллических сплавов 79НМ, 10СЮ и аморфного сплава 71КНСП для их применения в качестве исходных порошков при плазменном напылении ферромагнитных сердечников и магнитных экранов с высокой проницаемостью. Проведен анализ структуры и магнитных характеристик плазмонапыленных покрытий. Установлено, что порошки 79НМ, 10СЮ из-за наличия оксидных пленок по границам зерен имеют магнитную проницаемость около 100 Гс/Э, а в покрытиях она находилась в области 100–300 Гс/Э при напряженности магнитного поля от 0,5 до 3,0 Э. Порошки сплава 71КНСП отличались от кристаллических отсутствием оксидных образований на поверхности частиц и однородностью структуры и имели магнитную проницаемость до 9000 Гс/Э. Максимальная магнитная проницаемость напыленных образцов из порошков сплава 71КНСП при толщине покрытий от 200 до 600 мкм составила 2000–6000 Гс/Э при напряженности магнитного поля 0,1–0,35 Э.

Ключевые слова: магнитомягкие материалы, аморфный сплав, магнитная проницаемость, плазмотрон, напыление.

RESEARCH OF FERROMAGNETIC POWDER AND THE COATINGS ON THEIR BASIS

V. N. Saunin, S. V. Telegin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: telegin@sibsau.ru

This research shows the chemical composition, morphology and structure of magnetic materials powders of crystalline alloys 79NM, 10SYU and amorphous alloy 71KNSR for their use as starting powders during plasma spraying ferromagnetic cores and magnetic shields with high permeability. The analysis of the structure and magnetic properties of plazmonapylennyh coatings is carried out. It has been established that the powders 79NM, 10SYU due to the oxide films at the grain boundaries have a magnetic permeability of about 100 G / Oe, and in coatings, it is in the region of 100–300 G / Oe for the magnetic field strength of from 0.5 to 3.0 Oe. 71KNSR alloy powders are differed from lack of crystalline oxide formations on the surface of the particles and the homogeneity of the structure and have a magnetic permeability of up to 9000 gauss / Oe. The maximum permeability of the deposited samples 71KNSR alloy powder coatings at a thickness of 200 to 600 microns made 2000–6000 Gauss / Oe for the magnetic field intensity 0.1–0.35 Oe.

Keywords: magnetic materials, amorphous alloy, the magnetic permeability, plasma torch, sputtering.

Развитие науки и техники требует создания новых перспективных магнитомягких материалов для изделий элементной базы электронных приборов: сердечников магнитомодуляционных датчиков, магнитопроводов и магнитных экранов. Осуществлять компактирование детали сложной геометрической формы и слоев магнитных экранов возможно методом плазменного напыления исходными магнитомягкими порошками. Магнитные свойства таких изделий в значительной мере будут определяться качеством исходных порошков, полученных различными методами из прецизионных магнитных сплавов.

Для исследования были выбраны порошки магнитомягких материалов с высокой магнитной проницаемостью из кристаллических сплавов 79NM, 10СЮ и аморфного сплава 71КНСР (см. таблицу).

Химический состав исследуемых порошков

№ п/п	Марка порошка	Размер фракции порошка, мкм	Химический состав, %	
			По ТУ	Измеренный
1	79 NM	50–80	Ni – 68,6–70 Mo – 2,7 Si – 0,03–0,1 Fe – остальное	Ni – 78,5–80 Mo – 3,8–4,1 Si – 0,2 Fe – остальное
2	10СЮ	50–80	Si – 9,65 Al – 5,45 Fe – остальное	Si – 9,6 Al – 5,4 Fe – остальное
3	71КНСР	50–63	Co – 71 Ni – 12 Fe – 6 C – 3 Si – 7	Co – 72,5 Ni – 12,0 Fe – 6,5 C – 3,5 Si – 6,4 Mn – 0,3

Проводились металлографические, электронно-микроскопические исследования, а также исследования рентгеновского микроанализа (РМА) для исходных порошков и плазмонапыленных покрытий из них [1].

Частицы порошка 79NM имели преимущественно сферическую форму и отличались значительной неоднородностью по размеру (10–80 мкм). При анализе шлифов в частицах порошка обнаружены поры и неметаллические включения, которые в соответствии с выявленными признаками в светлом и темном полях

зрения можно классифицировать как оксиды, что подтвердилось данными РМА и явилось окислом железа. Микроструктура частиц после травления представляла собой однофазный γ -твердый раствор, отличающийся разнотелностью. Границы зерен сильно растравлены, что может быть связано с процессами окисления и образования приграничных областей с повышенной дефектностью структуры при получении порошкового материала. Проведенный РМА частиц выявил значительную неоднородность по химическому составу, например, содержание Мо колеблется в пределах 1,43–4,13 % вместо 2,7 % по технической документации. Наличие внутренней пористости, неметаллических включений, окисных слоев, неоднородной микроструктуры и отличий по химическому составу препятствует получению плотных качественных покрытий с необходимым уровнем магнитных свойств.

Частицы порошка 10СЮ имели осколочную форму, неоднородны по размеру (5–60 мкм) и характеризуются наличием большого количества микротрещин различной протяженности. Микроструктура частиц представляет собой однофазный γ -твердый раствор, при увеличении более чем в 1250 крат видно ячеистодендритное строение. Поверхность частиц покрыта оксидной пленкой различной толщины на основе Al, поэтому не представляется возможным оценить степень неоднородности порошка по химическому составу.

Частицы порошка 71КНСР осколочной формы и однородны по размеру (50–63 мкм). Травление частиц не позволило выявить структуру сплава. В сечении наблюдались интенсивные растравы поверхности, имеющие вид трещин. Можно предположить, что они образовались в местах расположения концентрированных неоднородностей, расслоения аморфной фазы.

Анализ поверхности шлифов плазмонапыленных покрытий из сплавов 79NM и 10СЮ фракцией 10–80 мкм показал, что они имеют идентичный характер. В процессе напыления частиц среди расплавленных попадают и оплавленные. Наблюдаются зазоры и пустоты, количество которых определяет пористость покрытия. Структура имеет характерное для плазменного покрытия слоистое строение. Между слоями оплавленных частиц наблюдаются темные прослойки, которые, как показал РМА, представляют собой в сплаве 79NM оксиды на основе железа, а в сплаве 10СЮ – оксиды на основе алюминия. Они

образовались в покрытии из-за наличия оксидных пленок, имеющих на частицах порошка в исходном состоянии. Выявленные оксидные пленки отрицательно влияют на свойства межслойных границ, способствуя образованию трещин.

Отличительным признаком покрытий из сплава 71КНСП является отсутствие слоистого строения [2]. Это можно объяснить отсутствием на поверхности исходного порошка окисной пленки, препятствующей плотному сцеплению частиц. Покрытие характеризуется лишь наличием пор, одной из причин образования которых можно считать попадание крупных частиц порошка в струю плазматрона [3].

Анализ магнитных характеристик показывает, что напыленные покрытия из сплавов 79НМ и 10СЮ в нетермообработанном состоянии имеют низкий уровень магнитных свойств; магнитная проницаемость при напряженности магнитного поля от 0,5 до 3,0 Э составила 100–300 Гс/Э. Магнитная проницаемость на образце-свидетеле в виде покрытия из нетермообработанной ленты сплава 79НМ толщиной 50 мкм, полученного намоткой в 5 слоев на тороидальную подложку (толщина полученного слоя 250 мкм), составила 100–150 Гс/Э в тех же полях, т. е. значения магнитной проницаемости примерно одинаковы (рис. 1).

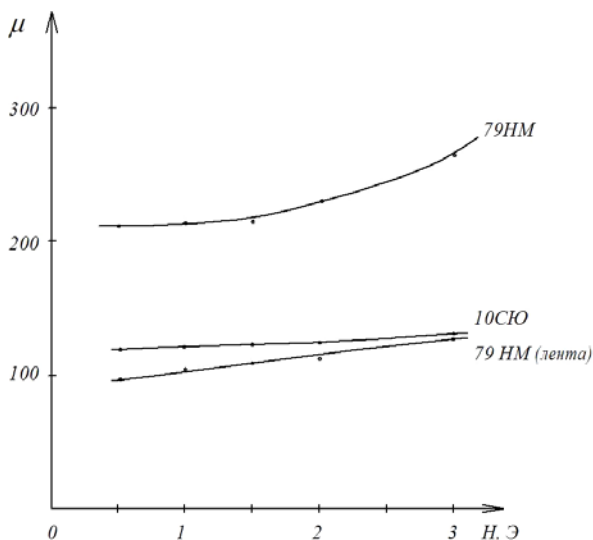


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости μ от величины магнитного поля H (Э) для кристаллических сплавов

Максимальный коэффициент экранирования напыленных покрытий в полях 3–4 Э равен 2. Коэрцитивная сила материалов покрытий: 79НМ – 0,4 Э, 10СЮ – 0,33 Э, а образца-свидетеля из ленты 79НМ – 0,45 Э.

Магнитные свойства, измеренные на образцах с покрытием из сплава 71КНСП, имеют следующие значения. Максимальная магнитная проницаемость напыленных в одинаковых условиях образцов при различной толщине покрытий от 200 до 600 мкм составила 2000–6000 Гс/Э при напряженности магнитного поля 0,1–0,35 Э. Образец-свидетель из ленты аморфного сплава 71КНСП имел магнитную прони-

цаемость 9000 Гс/Э в поле 0,1 Э, т. е. в 1,5 раза выше, чем напыленный материал.

Полученные данные показывают, что с ростом толщины напыленного слоя значение максимальной магнитной проницаемости снижается (рис. 2) и одновременно наблюдается меньшая зависимость проницаемости от напряженности магнитного поля. При этом основные различия магнитной проницаемости наблюдаются в полях 1,5 Э, а затем значения проницаемости примерно одинаковы (от 1000 до 1500 Гс/Э в полях более 2 Э).

Максимальный коэффициент экранирования составил 90 в поле 6–7 Э, на образце из ленты величина коэффициента экранирования превышала 200 при той же напряженности магнитного поля.

Рассматривая зависимость коэффициента экранирования от толщины покрытия, можно заметить уменьшение максимального коэффициента экранирования (в полях до 10 Э) и повышение значения в полях напряженностью до 50 Э при меньшей зависимости K_s напыленного слоя от напряженности магнитного поля. В полях от 40 Э значения K_s – от 5 до 25 при толщине покрытия от 200 до 660 мкм (рис. 3).

Результаты более детальных исследований плазмонапыленных покрытий порошков из сплава 71КНСП приведены в монографии [4]. На основании этих исследований была разработана оригинальная конструкция магнитного экрана.

При плазменном компактировании изделий электронной техники целесообразно применять в качестве исходного порошка сплав 71КНСП, магнитная проницаемость покрытий достигает 6000 Гс/Э.

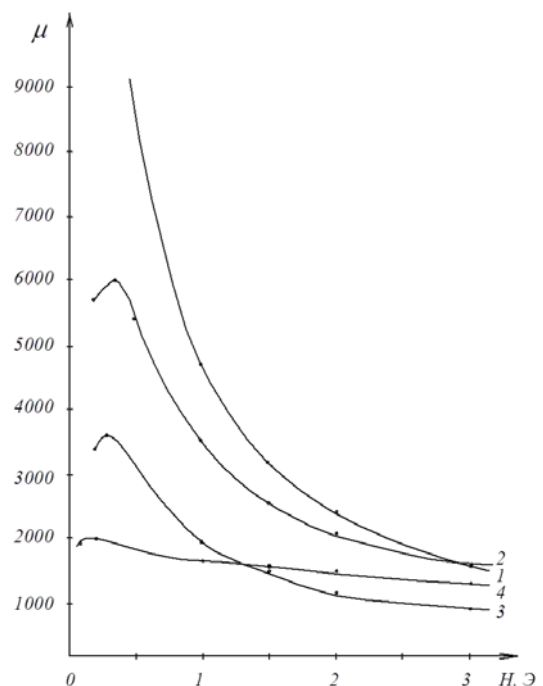


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости μ от величины напряженности магнитного поля H (Э) для покрытий из аморфного сплава 71КНСП при различной толщине покрытия: 1 – лента; 2 – 200 мкм; 3 – 400 мкм; 4 – 600 мкм

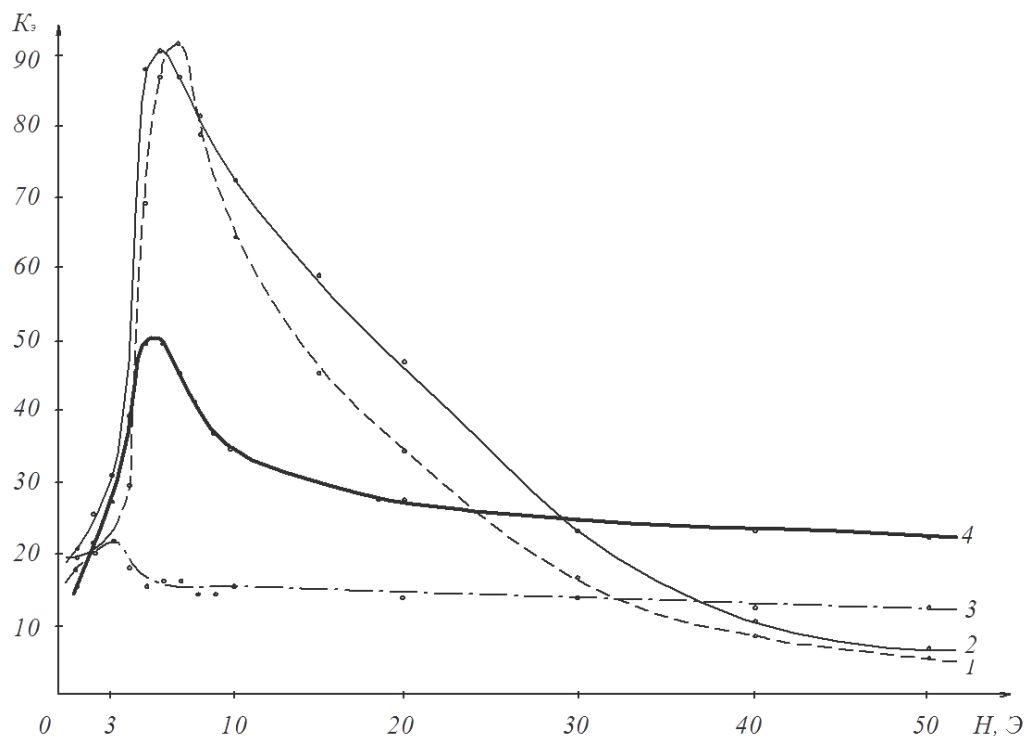


Рис. 3. Зависимость коэффициента экранирования K_s от напряженности магнитного поля H для сплава 71KHCP при различной толщине:
1 – 200 мкм, 2 – 660 мкм, 3 – 600 мкм, 4 – 400 мкм

Библиографические ссылки

1. Саунин В. Н., Лепешев А. А., Телегин С. В. Технологические особенности плазменного напыления аморфных покрытий магнитных экранов летательных аппаратов // Вестник СибГАУ. 2001. Вып. 2. С. 83–87.
2. Саунин В. Н., Телегин С. В., Растобарова В. П. Модификация структуры и магнитных свойств при переделе аморфной ленты в плазменное покрытие // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 6 (13). С. 107–108.
3. Saunin V. N., Telegin S. V., Kalita V. I., Denisova E. A. Formation of bulk magnetically soft materials with nano-and amorphous structure using plasma spraying // Inorganic Materials: Applied Research. 2012. Vol. 3, no. 3. P. 201–209.
4. Саунин В. Н., Телегин С. В. Физика и механика управления структурой плазменных покрытий : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. – 200 с.

References

1. Saunin V. N., Lepeshev A. A., Telegin S. V. *Vestnik SibGAU*, 2001, no. 2, p. 83–87.
2. Saunin V. N., Telegin S. V., Rastobarova V. P. *Vestnik SibGAU*, 2006, no. 6 (13), p. 107–108.
3. Saunin V. N., Telegin S. V., Kalita V. I., Denisova E. A. Formation of bulk magnetically soft materials with nano-and amorphous structure using plasma spraying. *Inorganic materials: Applied research*, vol. 3, no. 3, p. 201–209.
4. Saunin V. N., Telegin S. V. *Fizika i mekhanika upravleniya strukturoy plazmennykh pokrytiy* (Physics and mechanics of controlling the structure of plasma coatings). Krasnoyarsk, Sib. gos. aerokosmich. un-t, 2012, 200 p.

© Саунин В. Н., Телегин С. В., 2014

УДК 512.54

ВЗАИМООТНОШЕНИЯ ПОЧТИ СЛОЙНО КОНЕЧНЫХ ГРУПП С БЛИЗКИМИ КЛАССАМИ

В. И. Сенашов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: sen1112home@mail.ru

Работа посвящена изучению взаимоотношений классов групп с условиями конечности. Условия конечности накладываются на количество элементов данного порядка в группе, на порядки ее элементов, на мощность классов сопряженных элементов. Приводятся примеры групп, разделяющие класс почти слойно конечных групп и близкие к нему классы групп: слойно конечные группы, периодические группы, черниковские группы, локально нормальные группы и группы с конечными классами сопряженных элементов. Устанавливаются свойства взаимоотношений рассматриваемых классов групп. В частности, доказывается совпадение классов почти слойно конечных групп и черниковских групп в классе примарных групп. Результаты статьи найдут применение при изучении бесконечных групп с условиями конечности.

Ключевые слова: группа, слойно конечный радикал, инволюция, слойная конечность.

RELATIONSHIPS OF THE ALMOST LAYER FINITE GROUPS WITH SIMILAR GROUP CLASSES

V. I. Senashov

Siberian State Airspace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
Institute of Computational Modelling of Siberian Branch of RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: sen1112home@mail.ru

This paper is devoted to the study of the relationships between classes of groups with finiteness conditions. Finiteness conditions superimpose limitations on a number of elements of a certain order in a group, on the order of its elements and on the cardinality of conjugate classes. The paper provides examples of groups that share class of almost layer-finite groups and those close to that class of groups: layer-finite groups, periodic groups, Chernikov's groups, locally normal groups and the groups with the finite classes of conjugate elements. We establish the properties of the relationships of the considered classes of groups. In particular, we prove the coincidence of the classes of almost layer-finite groups and Chernikov's groups in the class of primary groups. Our results will be used in the study of infinite groups with finiteness conditions.

Keywords: group, layer-finite radical, involution, layer-finiteness.

Группа называется *слойно конечной*, если она имеет конечное число элементов каждого порядка. Это понятие впервые было введено С. Н. Черниковым в работе [1]. Слойно конечные группы исследовали С. Н. Черников, Р. Бэр, Х. Х. Мухамеджан, Я. Д. Половицкий и др. Теория таких групп в развернутом виде изложена в монографиях [2; 3]. Как указал С. Н. Черников в математической энциклопедии [4], слойно

конечные группы оказались наиболее изученными среди групп с конечными классами сопряженных элементов. В почти слойно конечных группах классы сопряженных элементов не обязаны быть конечными.

Определение. Почти слойно конечная группа – это группа, являющаяся расширением слойно конечной группы при помощи конечной группы.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 10-01-00509) и гранта Сибирского федерального университета (проект «Алгебро-логические структуры и комплексный анализ»).

Почти слойно конечные группы представляют собой существенно более широкий класс групп, чем слойно конечные группы. В него, в частности, входят все черниковские группы. Черниковские группы не обязательно являются слойно конечными.

Напомним, что группа называется *черниковской*, если она либо конечна, либо является конечным расширением прямого произведения конечного числа квазициклических групп.

Слойно конечные группы начали изучаться С. Н. Черниковым в связи с изучением групп с условием минимальности в случае, когда конечен индекс центра группы. Основным результатом, описывающим строение слойно конечных групп, был получен С. Н. Черниковым в 1948 г. в работе [5]. В нем говорится, что группа тогда и только тогда слойно конечна, когда ее можно представить в виде произведения двух поэлементно перестановочных подгрупп, из которых первая является слойно конечной полной абелевой группой, а вторая – слойно конечной группой с конечными силовскими подгруппами.

Почти слойно конечные группы не обязаны удовлетворять условию минимальности, но близки по свойствам к таким группам. В данной работе мы приведем примеры групп, разделяющих между собой класс почти слойно конечных групп и близкие к нему классы групп: слойно конечные группы, периодические группы, группы с конечными классами сопряженных элементов, локально нормальные группы, черниковские группы. Докажем ряд теорем, которые помогут установить взаимоотношения этих классов групп.

Классу почти слойно конечных групп посвящены работы [6–8].

По своему определению почти слойно конечные группы представляют собой более широкий класс групп, чем слойно конечные группы. В качестве примера, показывающего различие этих классов групп, можно указать расширение квазициклической примарной группы при помощи циклической группы порядка два, которая инвертирует все элементы из квазициклической группы.

Этот же пример разделяет между собой классы черниковских групп и слойно конечных групп, так как рассмотренная группа черниковская и не является слойно конечной.

Определения слойно конечной группы, почти слойно конечной группы и черниковской группы приведены выше. Напомним определения классов групп, которые мы также будем рассматривать.

Определение. *Периодическая группа* – это группа, в которой порядок любого элемента конечен.

Определение. *Группа с конечными классами сопряженных элементов* – это группа, в которой все классы сопряженных элементов конечны.

Определение. *Группа называется локально нормальной*, если в ней любое конечное множество элементов содержится в конечной подгруппе, нормальной в самой группе.

Нам потребуются еще два термина.

Определение. *Элемент второго порядка* называется инволюцией.

Определение. Если произведение всех нормальных слойно конечных подгрупп группы слойно конечно, то оно называется *слойно конечным радикалом* группы.

Приведем известные результаты, которые мы использовали в работе. Для удобства ссылок на эти результаты, будем называть их предложениями с соответствующим номером.

Предложение 1 (С. Н. Черников). Если группу G можно представить в виде произведения двух слойно конечных нормальных делителей, то группа G слойно конечна (усиление теоремы 3.5 из [2], приведенное в [2] на с.140).

Предложение 2 (В. П. Шунков). Расширение черниковской группы с помощью черниковской группы есть черниковская группа (теорема 2.2 из [9]).

Предложение 3 (С. Н. Черников). Слойно конечную группу можно представить в виде произведения двух поэлементно перестановочных подгрупп, из которых первая является полной абелевой слойно конечной группой, а вторая – слойно конечной группой с конечными силовскими подгруппами (теорема 3.3 из [2]).

Предложение 4 (С. Н. Черников). Класс слойно конечных групп совпадает с классом локально нормальных групп, все силовские подгруппы которых удовлетворяют условию минимальности (теорема 3.7 из [2]).

Предложение 5 (С. Н. Черников). Бесконечная слойно конечная p -группа G содержит нормальную подгруппу конечного индекса, которая разлагается в прямое произведение конечного числа квазициклических групп (и потому группа G нильпотентна и удовлетворяет условию минимальности) [1] (см. также теорему 5.1 из [3]).

При изучении почти слойно конечных групп понятие слойно конечного радикала является ключевым. Не в каждой группе имеется слойно конечный радикал. Однако любая почти слойно конечная группа обладает слойно конечным радикалом, который имеет конечный индекс в группе.

Действительно, пусть W – произвольная почти слойно конечная группа. Если группа W слойно конечна, то она совпадает со своим слойно конечным радикалом. Поэтому будем полагать группу W не слойно конечной. Почти слойная конечность группы W означает, что в группе W можно найти нормальный делитель A_1 , фактор-группа по которому конечна. Если группа A_1 не является максимальной нормальной в группе W слойно конечной подгруппой, то найдется содержащая подгруппу A_1 слойно конечная подгруппа A_2 , нормальная в W и отличная от A_1 . При этом выполняется неравенство $|W/A_2| < |W/A_1|$. Если группа A_2 снова не является максимальной нормальной в группе W слойно конечной подгруппой, то строим подгруппу A_3 аналогично. Процесс построения подгрупп A_i , $i = 1, 2, 3, \dots$ оборвется на некотором конечном шаге n ввиду конечности порядка группы W/A_1 ,

и построенная группа A_n будет являться максимальной нормальной в группе W слойно конечной подгруппой.

Группа A_n будет единственной максимальной нормальной в группе W слойно конечной подгруппой. Действительно, если нашлась другая максимальная нормальная в группе W слойно конечная подгруппа C , то ввиду предложения 1 группа $A_n \cdot C$ является слойно конечной и в то же время нормальной в группе W . Поскольку группа $A_n \cdot C$ строго содержит подгруппу A_n , то получаем противоречие с максимальной последней.

В черниковской группе множество простых делителей порядков элементов конечно, в то же время черниковские группы почти слойно конечны. В связи с этим интересен следующий результат: нечерниковская почти слойно конечная группа обладает бесконечным множеством простых делителей порядков ее элементов.

По предложению 2 слойно конечный радикал $R(W)$ нечерниковской группы W является нечерниковской группой, по предложениям 3 и 4 $R(W)$ можно представить в виде произведения двух поэлементно перестановочных подгрупп A и B , где A – полная абелева группа, а B – локально нормальная группа с конечными силовскими подгруппами. Если бы множество простых делителей порядков группы W было конечным, то группа A являлась бы прямым произведением конечного числа квазициклических групп, а группа B – конечной группой, и тогда группа $R(W)$ была бы черниковской. Противоречие означает, что множество простых делителей порядков элементов группы W бесконечно.

Существование нечерниковской почти слойно конечной группы, одно из свойств которой только что получено, устанавливает следующий пример: расширение прямого произведения бесконечного множества квазициклических групп по разным простым числам при помощи циклической группы порядка два, инволюция из которой инвертирует все элементы из прямого произведения.

Почти слойно конечная группа из этого примера не является ни черниковской группой, ни группой с конечными классами сопряженных элементов, ни слойно конечной группой.

Рассмотрим строение почти слойно конечных примарных групп. В качестве примера таких групп можно указать прямые произведения конечного числа квазициклических примарных групп по одному и тому же простому числу p и расширение таких групп при помощи конечных p -групп.

Этими примерами исчерпываются все примарные почти слойно конечные группы, а именно, справедлив следующий результат: бесконечная почти слойно конечная p -группа G содержит нормальную подгруппу конечного индекса, которая разлагается в прямое произведение конечного числа квазициклических групп.

Как мы показали выше, группа G обладает слойно конечным радикалом $R(G)$, имеющим конечный индекс в группе G . Слойно конечная подгруппа $R(G)$, в

свою очередь, содержит по предложению 5 нормальную подгруппу A конечного индекса, которая разлагается в прямое произведение конечного числа квазициклических групп. Так как группа A , очевидно, является характеристической в группе $R(G)$, то она также является нормальной подгруппой в группе G и имеет в G конечный индекс.

Из доказанного результата и определения черниковской группы вытекает следующее утверждение: почти слойно конечная примарная группа является черниковской.

Отсюда видно, что в классе примарных групп класс почти слойно конечных групп совпадает с классом черниковских групп. В то же время в классе примарных групп слойно конечные группы строго содержатся в классе черниковских групп, как показывает пример: расширение квазициклической 2-группы при помощи циклической группы порядка два, которая инвертирует все элементы из квазициклической группы.

Приведем пример слойно конечной группы с конечными классами сопряженных элементов, которая не является черниковской группой: прямое произведение бесконечного множества квазициклических групп по разным простым числам.

Следующий пример показывает, что классы слойно конечных групп и черниковских групп имеют неединичное пересечение: конечные группы или прямые произведения конечного множества квазициклических групп являются примерами слойно конечных черниковских групп.

Следующий пример – пример группы с конечными классами сопряженных элементов, не являющейся почти слойно конечной группой: прямое произведение бесконечного множества изоморфных между собой конечных групп.

Докажем еще следующий факт: почти слойно конечная группа является периодической.

Как мы показали выше, почти слойно конечная группа G обладает слойно конечным радикалом $R(G)$. Элемент бесконечного порядка не может содержаться в слойно конечном радикале, так как его степени составляют в нем бесконечный слой элементов одного и того же порядка.

Вне радикала в $G \setminus R(G)$ также не может содержаться элемента бесконечного порядка, так как в фактор-группе по слойно конечному радикалу в этом случае будет содержаться бесконечная циклическая подгруппа (ввиду единичности пересечения бесконечной циклической группы, порожденной этим элементом и слойно конечным радикалом), но это невозможно из-за конечности этой фактор-группы.

Из доказанного факта вытекает, что класс почти слойно конечных групп содержится в классе периодических групп. Эти классы не совпадают между собой, как показывает следующий пример: бесконечная элементарная абелева примарная группа является периодической не почти слойно конечной группой.

Этот пример также показывает, что локально нормальная группа не обязана быть почти слойно конечной. В связи с этим интересно, что класс почти слой-

но конечных групп совпадает с классом почти локально нормальных групп с силовскими подгруппами, удовлетворяющими условию минимальности.

Действительно, пусть группа G почти локально нормальна. Тогда в ней имеется локально нормальная подгруппа H конечного индекса. Если силовские подгруппы группы H удовлетворяют условию минимальности, то по предложению 4 H слойно конечна и в одну сторону. Утверждение доказано.

Пусть теперь группа G почти слойно конечна. Ее силовские подгруппы удовлетворяют условию минимальности по доказанному выше и ввиду того, что черниковские группы удовлетворяют условию минимальности. Слойно конечный радикал группы G имеет в G конечный индекс, как мы уже не раз отмечали, и является локально нормальной группой по предложению 4. Следовательно, G является почти локально нормальной группой.

В результате построения восьми примеров определены взаимоотношения класса почти слойно конечных групп с близкими по свойствам классами групп. Эти взаимоотношения уточнены при помощи доказанных свойств. Результаты статьи найдут применение при изучении бесконечных групп с условиями конечности.

Библиографические ссылки

1. Черников С. Н. К теории бесконечных специальных p -групп // Докл. АН СССР. 1945. Т. 50. С. 71–74.
2. Черников С. Н. Группы с заданными свойствами системы подгрупп. М.: Наука, 1980. 384 с.
3. Сенашов В. И. Слойно конечные группы. Новосибирск: Наука, 1993. 158 с.
4. Математическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1977. Т. 1. 1152 с.

5. Черников С. Н. Бесконечные слойно конечные группы // Мат. сб. 1948. Т. 22(64). С. 101–133.

6. Сенашов В. И. О группах Шункова с сильно вложенной почти слойно конечной подгруппой // Труды ИММ УрО РАН. 2010. Т. 16 (3). С. 234–239.

7. Сенашов В. И. О группах с сильно вложенной подгруппой, обладающей почти слойно конечной периодической частью // Украин. мат. журн. 2012. Т. 64(3). С. 384–391.

8. Сенашов В. И. Строение бесконечной силовой подгруппы в некоторых группах Шункова // Вестник СибГАУ. 2013. № 1 (47). С. 74–79.

9. Шунков В. П. О вложении примарных элементов в группе. Новосибирск: Наука, 1992. 132 с.

References

1. Chernikov S. N. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1945, vol. 50, p. 71–74.
2. Chernikov S. N. *Gruppy s zadannymi svoystvami sistemy podgrupp* (Group with the Given Properties of Subgroups Systems). Moscow, Nauka, 1980, 384 p.
3. Senashov V. I. *Sloyno konechnyye gruppy* (Layer Finite Groups). Novosibirsk, Nauka, 1993, 158 p.
4. *Matematicheskaya entsiklopediya*. Vol. 1. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1977, 1152 p.
5. Chernikov S. N. *Math. Sbornik*. 1948, vol. 22 (64), p. 101–133.
6. Senashov V. I. *Trudy IMM UrO RAN*. 2010, vol. 16, № 3, p. 234–239.
7. Senashov V. I. *Ukrain. math. zhurn.* 2012, vol. 64, № 3, p. 384–391.
8. Senashov V. I. *Vestnik SibGAU*. 2013, № 1 (47), p. 74–79.
9. Shunkov V. P. *O vlozhenii primarnykh elementov v gruppe* (On an Embedding of Primary Elements in a Group). Novosibirsk, Nauka Publ., 1992, 132 p.

© Сенашов В. И., 2014

УДК 539.371

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ПЛОСКОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ*

С. И. Сенашов, Е. В. Филюшина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sen@sibsau.ru, filyushina@sibsau.ru

В настоящее время для полноценного исследования дифференциальных уравнений кроме определения типа уравнений и правильной постановки граничных условий, выяснения существования и единственности решений необходимо знать симметрии, допускаемые системой, и законы сохранения. При этом оказывается, что кроме общеизвестных законов сохранения, следующих из общих методов построения уравнений, существуют и иные законы сохранения. Эти законы могут быть полезны для решения краевых задач и получения различных оценок решений. Построены новые законы сохранения для двумерных уравнений линейной упругости в стационарном случае. Сохраняющийся ток линеен по первым производным от искомых функций, но не зависит от

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Б-180-14.

самих искомым функций. Построенные законы сохранения можно использовать для решения краевых задач теории упругости для конечных областей.

Ключевые слова: законы сохранения, теория упругости, сохраняющийся ток.

CONSERVATION LAWS EQUATIONS PLANE THEORY OF ELASTICITY

S. I. Senashov, E. V. Filyushina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: sen@sibsau.ru, filyushina@sibsau.ru

Today for a full study of differential equations in addition to defining the type of equations and the correct formulation of the boundary conditions, determine the existence and uniqueness of solutions it is necessary to know the symmetry allowed by the system and conservation laws. It turns out that in addition to well-known laws of conservation of the following general methods for constructing equations, there are other conservation laws. These laws can be useful for solving boundary value problems and get different estimates of the solutions. In the paper, we construct new conservation laws for the two-dimensional equations of linear elasticity in the stationary case. Conserved current is linear in the first derivatives of the unknown functions, but does not depend on the unknown functions themselves. Constructed conservation laws can be used for solving boundary value problems of elasticity theory for finite fields.

Keywords: laws of conservation, elasticity theory, the conserved current.

Теория упругости (линейная) – это очень хорошо разработанный раздел механики сплошных сред. Развивые в ней методы позднее использовались при решении уравнений гидродинамики, теории пластичности и других дисциплин.

Для уравнений теории упругости известны следующие законы сохранения: закон сохранения энергии, законы сохранения количества движения и момента импульса. В силу линейности уравнений, уравнения теории упругости допускают бесконечное количество законов сохранения. Некоторые из них используются в механике разрушения. Это инвариантные *J-интегралы* и *Г-интегралы*. В предлагаемой работе приведена бесконечная серия новых законов сохранения. Авторы надеются, что новые законы сохранения найдут применение при решении краевых задач теории упругости, особенно для тел конечных размеров. Решение таких задач является одной из наиболее актуальных проблем для уравнений теории упругости.

Дадим необходимые определения. Пусть

$$F_i(x, y, u, v, u_x, v_x, u_y, v_y, \dots, v_{yy}) = 0, \quad i = 1, 2$$

система двух дифференциальных уравнений второго порядка, x, y – независимые переменные, u, v – искомые функции, индексы внизу означают производные по соответствующим переменным.

Определение. Назовем вектор (A, B) сохраняющимся током, а величину $A_x + B_y = 0$ законом сохранения, если

$$A_x + B_y = \Delta_1 F_1 + \Delta_2 F_2 = 0, \quad (1)$$

где Δ_i – некоторые дифференциальные операторы, по крайней мере, один из которых является нетривиальным. Более подробно построение законов сохранения описано в [1; 2] и цитируемой там литературе.

Известны разные способы построения законов сохранения. Наиболее широко используется метод построения законов сохранения на основе нетеровских симметрий, допускаемых уравнением. Этот способ построения для уравнений пластичности изложен в [3].

В данной работе законы сохранения будут строиться исходя из соотношения (1). Этот способ наиболее прост и, самое главное, он позволяет строить такие законы сохранения, которые можно использовать для решения краевых задач [4].

Рассмотрим двумерные уравнения линейной стационарной теории упругости

$$\begin{aligned} F_1 &= (\lambda + 2\mu)u_{xx} + (\lambda + \mu)v_{xy} + \mu u_{yy} = 0, \\ F_2 &= \mu v_{xx} + (\lambda + \mu)u_{xy} + (\lambda + 2\mu)v_{yy} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где u, v – компоненты вектора деформации; λ, μ – постоянные Ламе.

Ищем сохраняющийся ток в виде

$$\begin{aligned} A &= \alpha^1(\lambda + 2\mu)u_x + \beta^1\mu u_y + \gamma^1\mu v_x + \delta^1(\lambda + 2\mu)v_y, \\ B &= \alpha^2u_x + \beta^2u_y + \gamma^2v_x + \delta^2v_y, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha^i, \beta^i, \gamma^i, \delta^i$ – некоторые функции от x, y . Коэффициенты Ламе введены в коэффициенты компоненты A для удобства дальнейших выкладок.

В силу (1) имеем

$$\begin{aligned} &\alpha^1(\lambda + 2\mu)u_{xx} + \alpha_x^1(\lambda + 2\mu)u_x + \beta^1\mu u_{yx} + \\ &+ \beta_x^1\mu u_y + \gamma^1\mu v_{xx} + \gamma_x^1\mu v_x + \delta^1(\lambda + 2\mu)v_{xy} + \\ &+ \delta_x^1(\lambda + 2\mu)v_y + \alpha^2u_{xy} + \alpha_y^2u_x + \beta^2u_{yy} + \\ &+ \beta_y^2u_y + \gamma^2v_{xy} + \gamma_y^2v_x + \delta^2v_{yy} + \delta_y^2v_y = \alpha^1F_1 + \gamma^1F_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Из соотношений (4) получаем

$$\begin{aligned}
-(\lambda + \mu)\alpha^1 + \delta^1 + \gamma^2 &= 0, \quad -\mu\alpha^1 + \beta^2 = 0, \\
-(\lambda + \mu)\gamma^1 + \delta^1 + \alpha^2 &= 0, \quad -(\lambda + \mu)\gamma^1 + \delta^2 = 0, \\
(\lambda + 2\mu)\alpha_x^1 + \alpha_y^2 &= 0, \quad \beta_x^1 + \beta_y^2 = 0, \quad \mu\gamma_x^1 + \gamma_y^2 = 0, \\
\delta_x^1 + \delta_y^2 &= 0.
\end{aligned} \quad (5)$$

Из (5) следует

$$\begin{aligned}
\alpha^2 &= -\beta_1 + (\lambda + \mu)\gamma^1, \quad \beta^2 = \mu\alpha^1, \\
\gamma^2 &= -\delta_1 + (\lambda + \mu)\alpha^1, \quad \delta^2 = (\lambda + 2\mu)\gamma^1.
\end{aligned}$$

Подставим эти соотношения в последние четыре уравнения (5). Имеем

$$\begin{aligned}
(\lambda + 2\mu)\alpha_x^1 + (\lambda + \mu)\gamma_y^1 - \beta_y^1 &= 0, \\
\mu\gamma_x^1 + (\lambda + \mu)\alpha_y^1 - \delta_y^1 &= 0,
\end{aligned} \quad (6)$$

и

$$\beta_x^1 + \mu\alpha_y^1 = 0, \quad \delta_x^1 + (\lambda + 2\mu)\gamma_y^1 = 0. \quad (7)$$

Дифференцируем первое уравнение (6) по x , а второе – по y , с учетом (7) получаем

$$\begin{aligned}
(\lambda + 2\mu)\alpha_{xx}^1 + (\lambda + \mu)\gamma_{xy}^1 + \mu\alpha_{yy}^1 &= 0, \\
\mu\gamma_{xx}^1 + (\lambda + \mu)\alpha_{xy}^1 + (\lambda + 2\mu)\gamma_{yy}^1 &= 0.
\end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) следует, что (α^1, γ^1) – произвольное решение системы (2), а (β^1, δ^1) восстанавливаются по формулам (7) и, в свою очередь, тоже являются решением уравнений (2). Последнее нетрудно проверить. Для этого достаточно продифференцировать первое уравнение (7) по x , а второе – по y и воспользоваться соотношениями (6).

Известно, что любые решения уравнений (2) можно записать с помощью трех гармонических функций Φ^0, Φ^1, Φ^2 .

Имеем

$$\begin{aligned}
\alpha^1 &= \Phi^1 - \frac{1}{4(1-\nu)}(x\Phi_x^1 + y\Phi_y^2 + \Phi_x^0), \\
\gamma^1 &= \Phi^2 - \frac{1}{4(1-\nu)}(x\Phi_y^1 + y\Phi_y^2 + \Phi_y^0),
\end{aligned} \quad (9)$$

где ν – коэффициент Пуассона; $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$;

E – модуль упругости при растяжении и сжатии.

Задавая гармонические функции Φ^0, Φ^1, Φ^2 и решая соответствующие уравнения (7), получим явный вид законов сохранения.

В частности, если $\Phi^1 = \Phi^2 = 0$, без труда получаем бесконечную серию законов сохранения:

$$\alpha^1 = \Phi_x^0, \quad \gamma^1 = \Phi_y^0,$$

$$\beta^1 = -\mu\gamma^1, \quad \delta^1 = (\lambda + 2\mu)\alpha^1,$$

$$\alpha^2 = (\lambda + 2\mu)\gamma^1, \quad \beta^2 = \mu\alpha^1,$$

$$\gamma^2 = -\mu\alpha^1, \quad \delta^2 = (\lambda + 2\mu)\gamma^1.$$

В этом случае сохраняющийся ток имеет вид

$$A = (\alpha + 2\mu)\alpha^1(u_x + v_y) + \mu\gamma^1(-u_x + v_x),$$

$$B = (\alpha + 2\mu)\gamma^1(u_x + v_y) + \mu\alpha^1(u_x - v_x).$$

Замечание 1. Аналогичным образом законы сохранения могут быть построены и в трехмерном случае.

Замечание 2. Законы сохранения, построенные в работе, могут быть использованы для решения краевых задач, так же как в статьях [3; 4]. Это будет сделано в следующих статьях.

Библиографические ссылки

1. Предельное состояние деформированных тел и горных пород / Д. Д. Ивлев [и др.]. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 831 с.
2. Сенашов С. И., Гомонова О. В., Яхно А. Н. Математические вопросы двумерных уравнений идеальной пластичности / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. 137 с.
3. Сенашов С. И., Яхно А. Н. Законы сохранения уравнений пластичности среды Мизеса // Вестник ЧГПУ. 2013. № 2 (16). С. 107–115.
4. Сенашов С. И., Черепанова О. И., Кондрин А. В. Об упругопластическом кручении стержня // Вестник СибГАУ. 2013. 3(49). С. 100–103.

References

1. Ivlev D. D., Maksimova L. A., Nepershin L. I. et al. *Predel'noe sostojanie deformirovannyh tel i gornyh porod* (Limit state of deformed bodies and rocks). Moscow, FIZMATLIT, 2008, p. 831.
2. Senashov S. I., Gomonoova O. V., Jahno A. N. *Matematicheskie voprosy dvumernyh uravnenij ideal'noj plastichnosti* (Mathematical questions of two-dimensional equations of ideal plasticity). Krasnoyarsk, SibGAU, 2012, p. 137.
3. Senashov S. I. Jahno A. N. *Vestnik ChGPU*. 2013, no. 2(16), p. 107–115.
4. Senashov S. I., Cherepanova O. I., Kondrin A. V. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 3(49), p. 100–103.

© Сенашов С. И., Филюшина Е. В, 2014

ABOUT THE MODEL OF THE ACTIVE SYSTEM*

A. V. Strelnikov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: arkstrelvlad@mail.ru

The problem of the active system modeling is researched. There are three sources of information to construct the models. The first source is the theory of the problem, the second one is experts in the field of problem, and the third one is data bases. The method considered in this article uses the third way. The nonparametric algorithm for modeling active element in the system is proposed. The results of the computer experiments are published.

Keywords: active system, nonparametric model, identification.

О МОДЕЛИ АКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

А. В. Стрельников

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

Исследуется проблема моделирования активной системы. Рассматриваются три источника информации для конструирования моделей. Первый – теория задачи, второй – эксперты предметной области, третий – базы данных. Метод, рассматриваемый в статье, основан на третьем подходе. Предлагается непараметрический алгоритм для моделирования активного элемента в системе. Представлены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: активная система, непараметрическая модель, идентификация.

In this article we talk about constructing model of active systems. These are such systems which includes people as elements of considered system. We could find such kind of problem in marketing, industrial and different other spheres of our life. Usually it's necessary to predict of competitor strategy. In this case we can't ignore manly factor and we should create some adequate model describing behavior of the competitor. It would be better if the model will be mathematical and can be realized as automated program.

There are many ways to model a man. One of them considers all possible scenarios and models strategies for all scenarios. The good example of such systems is chess machine program. On May 11, 1997 computer Deep Blue beat the world chess champion after a six-game match [1]. It was victory of artificial intelligent over human mind. But chess is a game without stochastic events, which is happened every day in producing spheres of life. Poker game is more close to real situations. And group scientists from University Alberta research this game and create artificial intelligent which could beat a real person [2]. But their results are not yet impressive [3]. The competitive games are a good start point for intelligent system.

Another way is expert method. Here the experts in the

field of researched problem help to construct systems [4]. It's simple way to use knowledge of experts for creating strategy. For example, consultant psychologist can be engaged to solve a crime. Today scientists combine artificial intelligent systems and expert methods [5]. It's necessary if we want to use evaluating power of computers.

The first couple approaches use information from knowledge of problem theory and people who work with researched system a long time. The third source of information is digital data base. Almost every system has information which can be measured. These measures are collected and learn models. For example, in marketing the collected data are used to model relation of client to product [6]. In this article the method based on such way is used to solve problem of modeling at the point identification theory [7]. The problem is solved by the new scheme of system. But at the first let's consider the general problem of identification.

The general problem of identification. The identification theory has many problem tasks. In this article the control problem task is researched, when we need to form strategy of system control. At the point of identification theory we have inertialess process as researched system. This processes are more actual in spheres of the problem.

* The second International Workshop on Mathematical Models and its Applications (IWMMA 2013).

It's connection with a fact that the measurements of the variables are mad through significant period of time. In particular it's happened when step of discretization is larger than stability time of process. Let's consider the typical identification task of [8], in which the process belongs to the class of static and corresponds to the following scheme.

On the fig. 1 A is operator describing the process, $x(t) \in R^1$ is output scalar variable, $u(t) \in R^n$ is input vector variable, $\xi(t)$ is random action, $h^u(t)$ and $h^x(t)$ are noises executing in the measuring lines, u_t and x_t are measurements of input and output variables at the moment t , Control is a block of control system, $x^*(t)$ is desirable output. Type and distribution of the random action $\xi(t)$ are unknown. The random action is centered random variables with limited variance. The distribution laws of the noises $h^u(t)$ and $h^x(t)$ are also unknown, centered and have limited variance. We also don't know the structure of the operator A, but we know that it has an active element.

Mathematically the process can be shown as the equation:

$$x(t) = A(u(t), \xi(t)). \quad (1)$$

The task is to construct the control:

$$u(t) = A^{-1}(x(t), \xi(t)). \quad (2)$$

There are two ways to solve this task: identification in "narrow" and "wide" senses. The first way is used when structure of operator A could be defined and opposite operator A^{-1} is exist. The parametric model will be used to solve this task:

$$\hat{u}(t) = B_\alpha(x(t), \alpha), \quad (3)$$

when B_α is a parametric operator, α is a set of parameters.

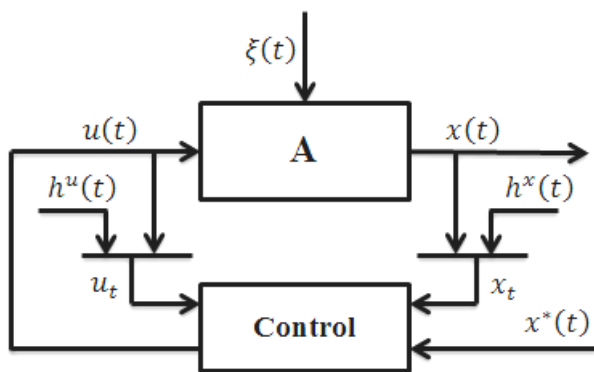


Fig. 1. Scheme of the process

The second way is used when structure of operator A couldn't be defined with necessary accuracy. The non-parametric model [9] will be used to solve this task:

$$u_s(t) = B_s(x(t), \bar{u}_s, \bar{x}_s), \quad (4)$$

where B_s is a nonparametric operator, $\bar{u}_s = (u_1, \dots, u_s)$ and $\bar{x}_s = (x_1, \dots, x_s)$ are time vectors.

The active element of the researched system could be considered like as an uncontrolled input variable of the process. But in this case we ignore the fact that it's active and has own strategy. Further the interesting scheme of active element modeling is proposed.

The control of active system. In our problem the active element is real person, competitor. Therefore the competitor tries to find the optimal strategy too. He can use some procedures for evaluating optimal own control. These procedures form certain rules and dependences into system. When we use the general models, such dependences stay unconsidered. The simplest way to consider the active element in the constructed model is to evaluate the optimal strategy for competitor. Then scheme of the process will be changed (measuring lines aren't shown).

On the fig. 2 Active Element is just block evaluating estimation $\mu_s(t)$ of the competitor strategy's variable $\mu(t) \in R^k$, $x_u^*(t)$ and $x_\mu^*(t)$ are our and competitor's desirable outputs. It should be differed estimation $\mu_s(t)$ and value of competitor's real choice $\mu(t)$. The block Active Element is a part of control system in our case.

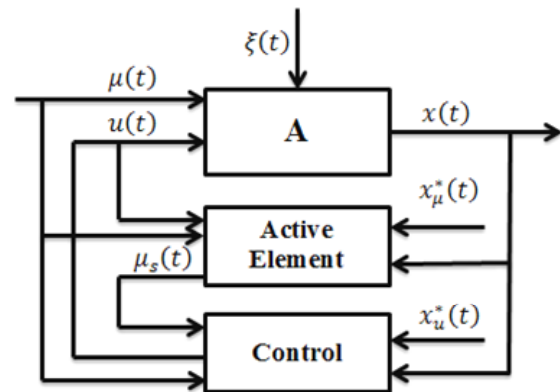


Fig. 2. Scheme of the active process

Let's imagine that we have samples x_i, u_i, μ_i , $i = 1, 2, \dots, s$, when s is a volume of samples. At the first we need to estimate $\mu_s(t)$ for evaluating the control. For example, we could use nonparametric estimation of [10]:

$$\mu_s(t) = \frac{\sum_{i=1}^s \mu_i \Phi\left(\frac{x_i - x_\mu^*(t)}{c_s^x}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{u_i^j - u^j(t)}{c_s^u}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_i - x_\mu^*(t)}{c_s^x}\right) \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{u_i^j - u^j(t)}{c_s^u}\right)}, \quad (5)$$

where $\Phi(\cdot)$ is kernel function and c_s are smooth parameters. The current value $u^j(t)$ is usually evaluated as the last value u_s^j or as mean of some the last values in marketing sphere.

Then it is necessary to estimate control. We could also nonparametric estimation:

$$u_s(t) = \frac{\sum_{i=1}^s u_i \Phi\left(\frac{x_i - x_u^*(t)}{c_s^x}\right) \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{\mu_i^j - \mu_s(t)}{c_s^u}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{x_i - x_u^*(t)}{c_s^x}\right) \prod_{j=1}^k \Phi\left(\frac{\mu_i^j - \mu_s(t)}{c_s^u}\right)}. \quad (6)$$

If the competitor actions not optimal or competitor's term of optimality is different, then we can consider previous values of all variables as input variables of blocks Active Element and Control. In other words, we try to estimate of competitor's behavior. Otherwise the researched process becomes inertial in this case.

The numeracy experiment. Let's consider a simple experiment, when $u(t)$ and $\mu(t)$ are scalar variables. The object is described equation:

$$x(t) = \sin(u(t)) \cos(\mu(t)). \quad (7)$$

The desires outputs equal $x_u^*(t) = 0.2$ and $x_\mu^*(t) = -0.2$. Controlling starts at the 10th point, before control is random. The control for competitor is evaluated by formula:

$$\mu(t) = x_u^*(t) - \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} u_{s-i}. \quad (8)$$

If we use ordinary control without considering active element, then we obtain:

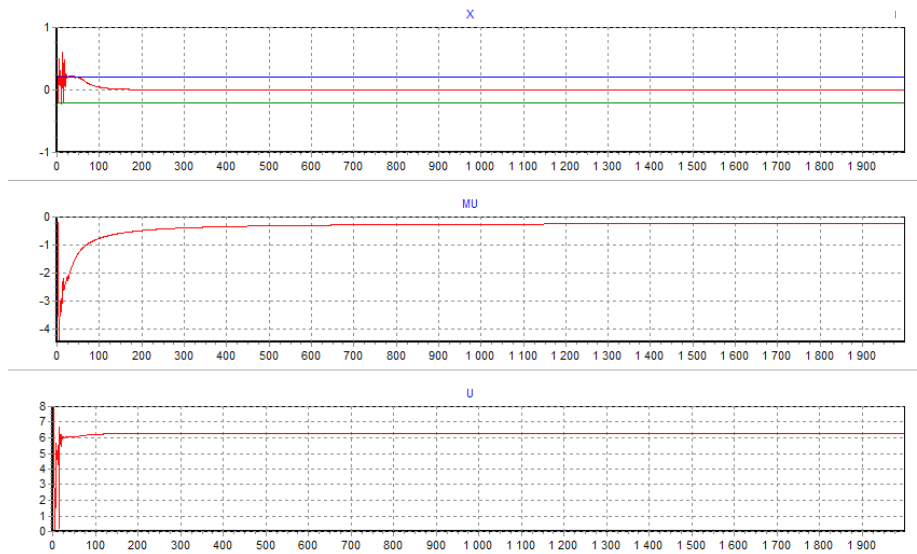


Fig. 3. Results of experiments without block Active Element

Otherwise we use the Active Element for constructing control system:

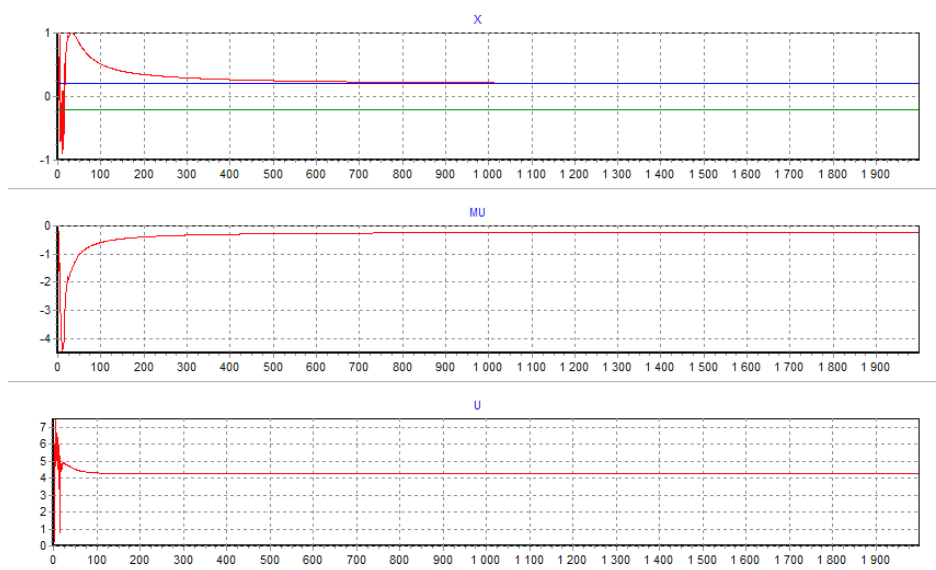


Fig. 4. Results of experiments with block Active Element

On the figures we can see, that two controls compare with each other. And when we consider, the active element out control system is stronger than competitor's control system.

Conclusion. The problem of active system modeling was researched. There are different approaches to model such systems. We used identification theory approach for solving the problem. According this approach it's necessary to construct control system and reach the desired value of output variable. The problem is difficult because of competitor. The competitor is another control system at the point identification theory. If we use ordinary way to construct control system the desired value isn't reached. The new scheme including the active element for constructing control system is proposed. It helps to predict behavior of competitor. The proposed approach works that desired value is reached.

References

1. IBM 100 Icons of Progress. Deep Blue. 2011.
2. Mazrooei P., Archibald C., and Bowling M. Automating Collusion Detection in Sequential Games. Proceedings of the Twenty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence. July, 2013.
3. Blincoe R. \$8.9m poker prize up for grabs – humans only please. Why can't a bot play at this level? The Register. 5th November, 2010.
4. Jackson P. *Vvedeniye v ekspertnyye sistemy* (Introduction in the expert systems). 3rd edition. Moscow, Published House Williams, 2001, 624 p. [in Russian]
5. Ruchkin V., Fulin V. *Universal'nyy iskusstvennyy intellekt i ekspertnyye sistemy* (Universal artificial intelligent and expert systems). S. Peterburg, BHV-Peterburg Publ., 2009, 240 p. [in Russian].
6. Jeffery M. *Data-Driven Marketing. The 15 Metrics Everyone in Marketing Should Know*. John Wiley and Sons, 2010.
7. Leung L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya pol'zovatelya* (System identification: theory for user). Moscow, Nauka Publ., 1991, 432 p. [in Russian].
8. Eykhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya. Otsenivaniye parametrov sostoyaniya* (Foundations of control systems identification). Moscow, Mir Publ., 1975, 688 p. [in Russian].
9. Medvedev A. [Theory of the nonparametric systems. Processes]. *Vestnik SibGAU*, 2010, no. 3 (29), p. 4–9.
10. Watson G. *Smooth regression analysis*. Sankhya. Ser. A. 1964.

Библиографические ссылки

1. IBM 100 Icons of Progress. Deep Blue. 2011.
2. Mazrooei P., Archibald C., and Bowling M. Automating Collusion Detection in Sequential Games // Proceedings of the Twenty-Seventh AAAI Conference on Artificial Intelligence. July, 2013.
3. Blincoe R. \$8.9m poker prize up for grabs – humans only please. Why can't a bot play at this level? The Register. 5th November, 2010.
4. Джексон П. Введение в экспертные системы. 3-е изд. М. : Вильямс, 2001. 624 с.
5. Ручкин В. Н., Фулин В. А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы. СПб. : БХВ-Петербург, 2009. 240 с.
6. Jeffery M. *Data-Driven Marketing. The 15 Metrics Everyone in Marketing Should Know*. John Wiley and Sons, 2010.
7. Льюинг Л. Идентификация систем. Теория пользователя. М. : Наука, 1991. 432 с.
8. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров состояния / под ред. Н. С. Райбмана М. : Мир, 1975. 688 с.
9. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (29). С. 4–9.
10. Watson G. *Smooth regression analysis*. Sankhya. Ser. A. 1964.

© Стрельников А. В., 2014

УДК 004.942

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА SPACE COLONIZATION ПРИ ТРЕХМЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. А. Ткачева

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: tkacheva@mail.sibsau.ru

Для создания моделей лесной растительности используются особые методы и алгоритмы. Изучение процесса роста растений требует более мощных инструментов моделирования для того, чтобы описать и смоделировать различные процессы функционирования растений. В последнее десятилетие наиболее часто для решения подобных задач используется формализм L-систем. Основная идея L-систем (Линденмайер системы) – постоянная перезапись элементов строки, L-система оперирует со строкой символов по специальным правилам, начиная с первоначальной простой аксиомы, позволяя генерировать различные объекты с фрактальной структурой. Рассматривается адаптация L-систем и Space Colonization алгоритма на языке Python, популяр-

ного и мощного открытого лицензионного динамического языка. Использование данного языка программирования позволяет строить сложные модели, кроме того, приведены полученные результаты для различных исходных данных, получены трехмерные модели, произведена визуальная оценка реалистичности полученных моделей.

Ключевые слова: трехмерное моделирование растительности, алгоритм Space Colonization, L-системы, имитационное моделирование.

SPACE COLONIZATION ALGORITHM APPLICATION IN THREE-DIMENSIONAL MODELING OF COMPLEX NATURAL OBJECTS

A. A. Tkacheva

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: tkacheva@mail.sibsau.ru

Special methods and algorithms are used to create models of forest vegetation. The study of plant development requires increasingly powerful modeling tools to help understand and simulate the growth and functioning of plants. In the last decade, the formalism of L-systems has emerged as a major paradigm for modeling plant development language. Lindenmayer systems (L-systems) are formalism for parallel rewriting, used for generating fractal. In this work, we present an adaptation of L-systems and Space Colonization algorithm to the Python language, a popular and powerful open-license dynamic language. We show that the use of dynamic language properties makes it possible to build complex models, moreover the results obtained for a variety of input data, a three-dimensional model, made a visual assessment of the realism of the obtained models are given in the article.

Keywords: three dimensional plant modeling, Space colonization algorithm, L-systems, simulating modeling.

Процесс моделирования ландшафтных сцен разбивается на две части: непосредственная генерация самого ландшафта и наполнение исходного ландшафта объектами сцены (растительность, источники воды, света). Моделирование антропогенных объектов (здания, заборы, транспортные средства) не вызывает значительных трудностей, так как геометрия данных объектов состоит из таких примитивов, как куб, шар, цилиндр, и описывается математическими системами однозначно. Необходимость в ландшафтных сценах возникает в различных пакетах архитектурного моделирования, симуляторов виртуальной реальности, геоинформационных системах [1]. Реалистичность ландшафта напрямую зависит от точности объектов, наполняющих эту сцену. Растительность является основным элементом естественного ландшафта, соответственно, от реалистичности полученных моделей деревьев и кустарников будет зависеть сложность и естественность полученной сцены. В свою очередь, моделирование растительности является нетривиальной задачей. Сложность данной задачи заключается в том, что форма объектов деревьев и кустарников далека от геометрических примитивов и их сочетания, обладает ветвящейся структурой, примитивно которую можно описать фракталами. Модели с такой структурой проектируются в CAD-системах неоднозначно, а также требуют значительных временных затрат.

Существуют два основных подхода в ландшафтном моделировании: моделирование всей сцены в специальных пакетах трехмерного моделирования (Vue9.5 xStream, 3dsMAX, XSI, Maya, DAZ 3D Bryce)

и моделирование на основе данных наземного лазерного сканирования и аэрофотоснимков. Для каждого из этих подходов можно выделить общие принципы моделирования растительности: математическое моделирование, основанное на правилах и грамматиках; интерактивное моделирование, основанное на шаблонах моделей, и моделирование, основанное на ряде изображений исходного объекта. Альтернативой является моделирование роста дерева на основе L-систем, данный подход изобрел датский математик и биолог Линденмайер [2]. L-система – это грамматика некоторого языка программирования:

$$G = \{V, \omega, P\}, \quad (1)$$

где V – алфавит; $\omega \in V$ – аксиомы; $P \in V \times V$ – правила.

В программном виде данное определение L-систем выглядит следующим образом:

```
module Apex(age), Internode(length, radius)
MAX_AGE, dr = 10, 0.02 # константы
Axiom: Apex(0) # определение аксиом
production: # описание правил ветвления
Internode(l,r) --> Internode(l,r + dr)
Apex(age):
if age < MAX_AGE:
produce Internode(1,0.05)/(137.5)
[+(40)Apex(age+1)]Apex(age+1)
```

Алфавит L-систем состоит из набора стандартных символов. Для каждого типа L-систем расширяется стандартный алфавит, например, для скобочных

L-систем вводятся символы «[» и «]». Линденмайер описал несколько типов L-систем. Представим классификацию от простых L-систем к более сложным: скобочные (bracketed), параметрические (parametric), контекстно-зависимые (context-sensitive), стохастические (stochastic) [3]. Основное отличие стохастических L-систем заключается в том, для каждого символа алфавита можно задать не одно правило, а несколько, снабдив каждое из них вероятностью его применения. В этом случае развитие системы уже не будет жестко предопределенным – при подстановках будет происходить случайный выбор одного правила из нескольких в соответствии с заданными вероятностями.

Дадим определение стохастическим L-системам: пусть существует только одно x из множества V^* для каждого a из множества V ; если x может быть выбрано с определенной степенью свободы, система называется стохастической L-системой, обозначаемой в виде четверки $G = \{V, \omega, P, \pi\}$. Функция π отображает соответствующего предшественника (a) на вероятностях предшественника (x). Общая сумма всех вероятностей x , присваиваемых конкретному a , должна быть равна 1. Пример программной реализации стохастической системы:

```
from random import * # использование генератора
случайных чисел
p0 = 0.5 # исходная вероятность
Axiom: Apex(0)
production:
Apex(age): # описание процесса ветвления
  nproduce Internode(1,0.1)/(180)
  if uniform() < p0: nproduce[+(20)Apex(age+1)]
  produce Apex(age+1)
```

Данный подход позволяет описывать развитие кроны дерева и кустарника, а также учитывать практически все параметры дерева, измеряемые в природе; сложность заключается в естественном имитировании различных типов ветвления: моноподиальном, симподиальном и ложнодихотимическом (тернарном). Для каждого из типов ветвления разработаны собственные L-системы (рис. 1).

При моноподиальном типе ветвления один из углов ветвления равен нулю и ясно выражена главная

ось. Правила ветвления выглядят следующим образом:

```
p1: A(l,w) : *→
      !(w)F(l)[&(a0)B(l*r2,w*wr)]/(d)A(l*r1,w*wr)
p2: B(l,w) : *→
      !(w)F(l)[- (a2)$C(l*r2,w*wr)]C(l*r1,w*wr)
p3: C(l,w) : *→
      !(w)F(l)[+ (a2)$B(l*r2,w*wr)]B(l*r1,w*wr)
```

Другие L-системы охватывают симподиальные структуры, в которых оба дочерних сегмента формируют ненулевой угол с материнским. В этом случае активность главной вершины снижена из-за формирования ствола. Тернарный тип ветвления является по сути симподиальным типом и отличается лишь тем, что отсутствует жесткое предопределение длин ветвей, их развитие описывается вместе с процессом роста растительности. Приведем псевдокод описания тернарного типа ветвления:

```
d1= 94.74 # угол ветвления первой боковой оси
d2= 132.63 # угол ветвления второй боковой оси
a=18.95 # первоначальный угол ветвления
lr=1.109 # коэффициент пропорциональности
длины ветви
vr=1.732 # коэффициент пропорциональности
ширины ветви

ω : !(1)F(200)/(45)A
p1 : A : *→ !(vr)F(50)[&(a)F(50)A]/(d1)
      [&(a)F(50)A]/(d2)[&(a)F(50)A]
p2 : F(l) : *→ F(l*lr)
p3 : !(w) : *→ !(w*vr)
```

Для описания растительности в глобальной системе окружающей среды используется особый тип L-систем, зависимый от окружения в модельном пространстве (environmentally sensitive); в данных системах используются различные запросы получения позиции вектора и его ориентации в пространстве:

```
? P(x, y, z) – получение текущей позиции;
? H(x, y, z) – вектор направления;
? U(x, y, z) – отклонение вверх вектора направления;
? L(x, y, z) – отклонение влево вектора направления.
```

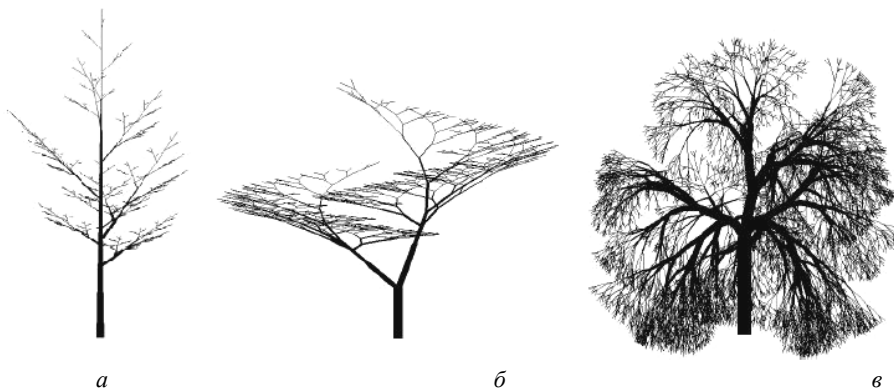


Рис. 1. Модели деревьев L-систем: а – моноподиальный тип ветвления; б – симподиальный тип ветвления; в – тернарный тип ветвления

Кроме приведенной классификации, существуют и «оригинальные» типы ветвления (ветвления типа пагоды и терминалия), которые также заслуживают внимания, хотя в природе не так часто встречаются, однако именно такие объекты придают ландшафту естественность и разнообразие.

Тем не менее, несмотря на успешную работу в создании реалистичных моделей деревьев, по-прежнему остается невозможным точно и естественно моделировать процесс ветвления, физические движения деревьев под воздействием ветра, взаимовлияние растительности и соседствующих объектов [4]. Ветровые модели в основном применяются к стволу и ветвям, листья же в общем случае представляются в виде текстуры и являются неподвижными, что сказывается на их трехмерном представлении. Также при взаимодействии растительности друг с другом и другими антропогенными объектами необходимо учитывать развитие кроны дерева в ограниченном пространстве.

Взаимодействие растительности с окружающей средой можно рассматривать с глобальной и локальной точки зрения. Глобальные переменные взаимодействуют с растительностью в целом: температурный режим, газовый состав воздуха, воздействие солнечных лучей на рост (фотосинтез) и пр. К локальным переменным относятся те, которые изменяют лишь отдельные параметры растительности, такие как позиция и ориентация объектов в пространстве [5]. Будем рассматривать лишь локальные переменные окружающей среды, а именно, взаимное влияние соседствующей растительности друг на друга, воздействие ветра, ограниченность пространства растущих деревьев: стены, дома и другие архитектурные комплексы, обрезка деревьев.

Рассмотрим иной подход к моделированию растительности — использование алгоритма Space Colonization. Несмотря на то, что изначально данный алгоритм применялся для предсказания движения пешеходов в толпе [6], его можно применить и для моделирования растительности, так как нетрудно заметить, что для определения возможной траектории движения пешехода строится некая ветвящаяся структура, подобная растениям.

Основная идея алгоритма Space Colonization заключается в итеративном добавлении новых элементов (ветвей) к существующей геометрической структуре объекта (дерева), сформированного на предыдущих шагах [7].

Данный алгоритм является адаптивным, т. е. процесс роста зависит от следующих параметров: близлежащее присутствие объектов окружающего мира, соседство с другими деревьями. Изначально задается облако из N точек (листьев), их суммарное количество обычно составляет сотни или тысячи, соответственно, на этом этапе можно задать некие препятствия роста дерева, причем точки, выходящие за заданные границы, будут отбрасываться. Также на этом этапе задается начальная точка ствола, с которой начинается итеративное построение «скелета» дерева, на каждой итерации воспроизводится ветвь в направлении ближайшей точки кроны дерева. Пошаговая работа алгоритма представлена на рис. 2.

Математическая постановка задачи заключается в следующем: пусть имеется некоторая «корневая» точка v , из этой точки может выходить несколько ветвей, т. е. в окрестности данной точки имеется множество точек $S(v)$, находящихся на расстоянии меньше, чем d_i — параметр, задаваемый пользователем (параметр управления). Если множество $S(v)$ непустое, то новая точка v' присоединяется к общей структуре дерева путем построения сегмента (v, v') . Причем новая точка v' находится на расстоянии D от исходной точки v в направлении средненормированного вектора n по отношению ко всем источникам:

$$D = \frac{v' - v}{\hat{n}}, \quad (2)$$

$$\hat{n} = \frac{\bar{n}}{\|\bar{n}\|}, \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S(v)} \frac{s - v}{\|s - v\|}. \quad (4)$$

Данный процесс заканчивается при прохождении всех точек кроны дерева (N) либо при выполнении заданного пользователем количества итераций. Некоторые узловые точки удаляются, т. е. при построении нового сегмента происходит проверка: все точки, находящиеся на расстоянии dk (dk — *killdistance*, входной параметр) от точки v' , удаляются. Далее для более реалистичной визуализации задается сглаживание ветвей — скругление изгибов-переломов на узловых точках, т. е. аппроксимация по точкам (рис. 2, *e*). На рис. 2, *ж* показана объемная визуализация полученного «скелета» с помощью цилиндров разных радиусов. При соединении дочерних ветвей в узловой точке разных радиусов r_1 и r_2 , новый радиус r вычисляется по формуле 5:

$$r^n = r_1^n + r_2^n, \quad (5)$$

где $n \in (2, 3)$.

На конечном этапе происходит наложение листы на существующую структуру ветвей (рис. 2, *з*). Данный алгоритм позволяет получать реалистичные модели деревьев и кустарников различной формы.

Приведем примеры различных исходных облаков точек. Для детального построения геометрии дерева необходимо задавать облака точек, содержащих сотни элементов, также немаловажным является и распределение точек по всей области облака (рис. 3).

Полученные результаты, приближенные к реальности, представлены на рис. 4.

Одна из наиболее важных особенностей данного алгоритма заключается в возможности моделирования деревьев и кустарников различной формы, связанной с воздействием окружающей среды: освещенность, расположенность моделируемых объектов вдоль стены или иных преград, соседство рядом с другой растительностью (рис. 5).

Все представленные выше результаты выполнены с помощью динамического языка программирования Python, все исходные облака точек задавались с помощью генератора случайных чисел, дальнейшим направлением работы является использование данных лазерного сканирования (рис. 6).

Визуализация написанного скрипта выполнена средствами графического редактора Blender (открытое программное обеспечение). Основная геометрия дерева – процесс ветвления – осуществлялся по алгоритму Space Colonization, стохастические L-системы

использовались на конечных итерациях (дорисовка мелких ветвей) перед наложением текстур на объект. Построенные в соответствии с изложенным методом 3D-ландшафтные сцены являются реалистичными и не требуют больших вычислительных затрат.

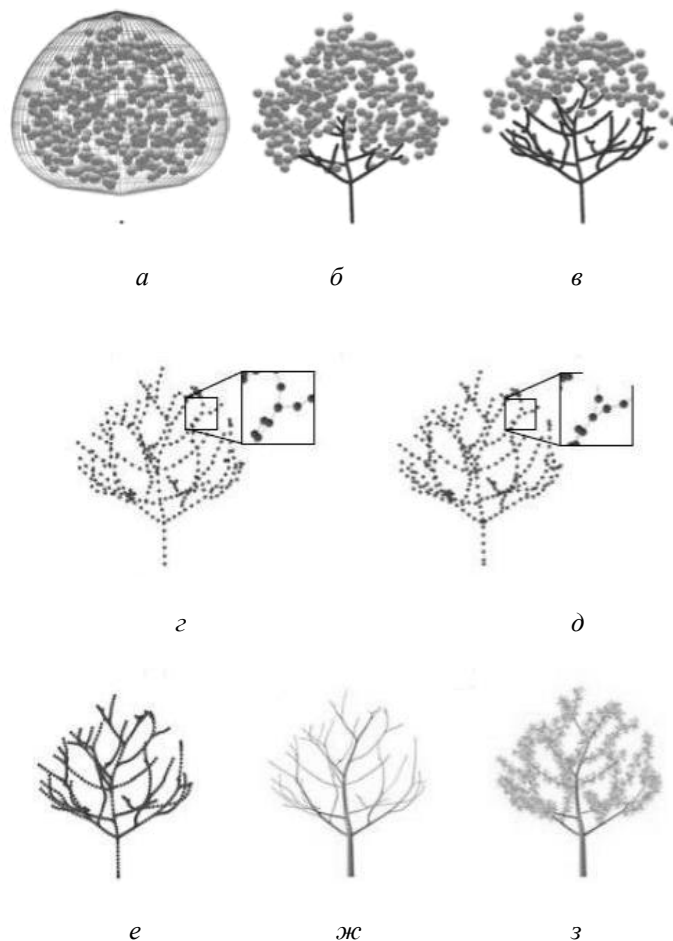


Рис. 2. Последовательность шагов алгоритма SpaceColonization:
а – задание облака точек кроны дерева; *б* – прорисовка общего предварительного «скелета» ветвей;
в – инициализация почек; *г*, *д* – прореживание точек ветвей; *е* – скругление ветвей;
ж – объемное (цилиндрическое) моделирование ветвей; *з* – наложение лиственной массы

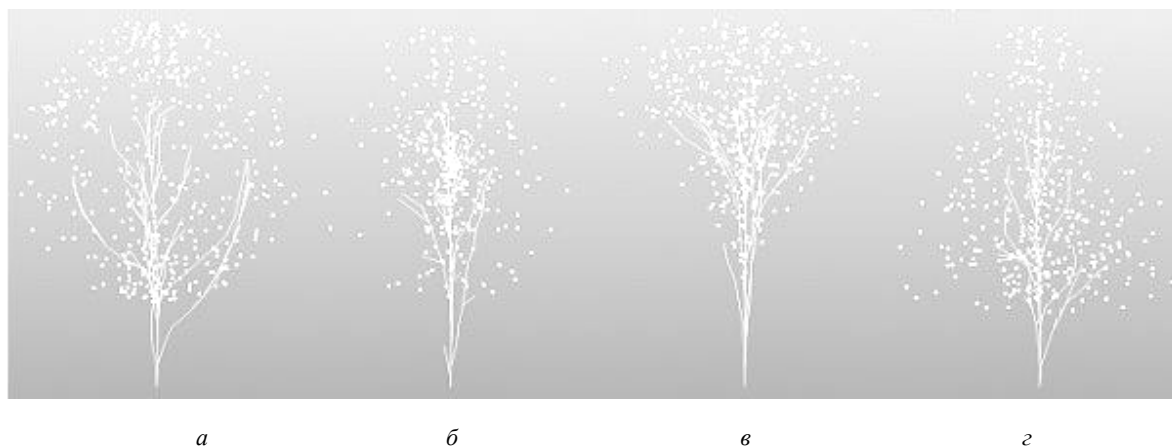


Рис. 3. Результаты первых этапов работы алгоритма SpaceColonization для различных облаков точек: *а*, *б* – облако точек с элементами, сосредоточенными ближе к границе / центральной оси;
в, *г* – концентрация элементов облака в верхних и нижних частях соответственно

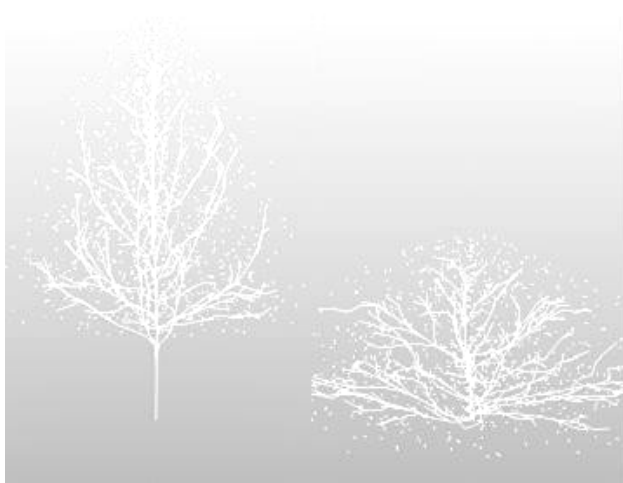


Рис. 4. Модели дерева и кустарника, полученные с помощью алгоритма Space Colonization

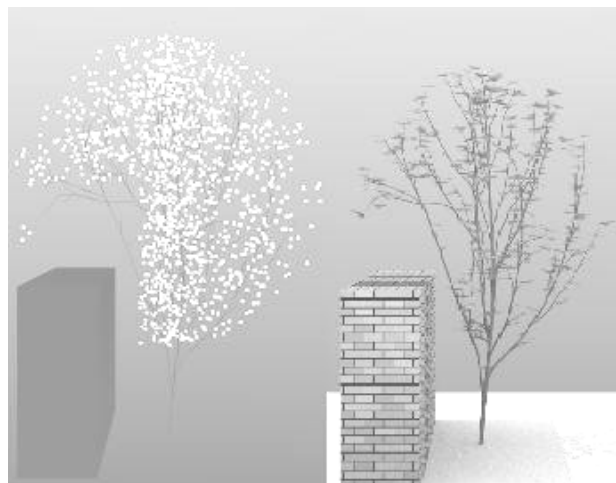


Рис. 5. Моделирование объекта в условиях ограниченного роста

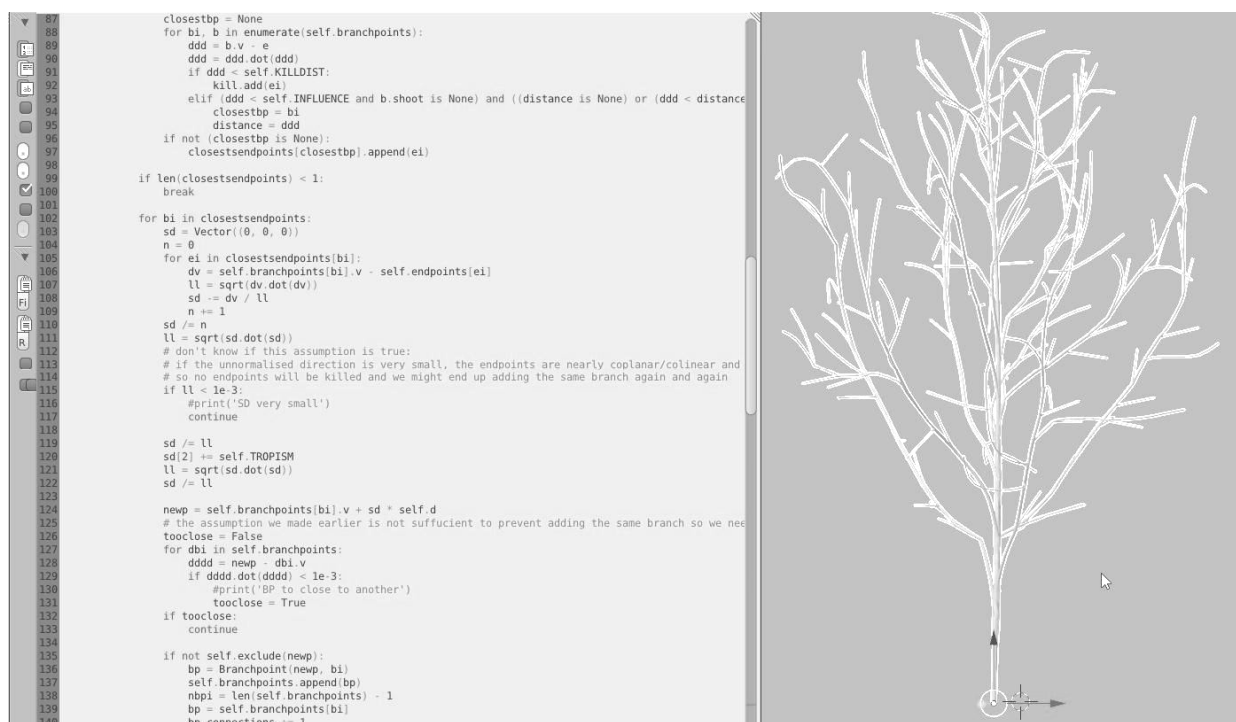


Рис. 6. Моделирование дерева в Blender с использованием Python API

Библиографические ссылки

1. Якубайлик О. Э. Проблемы формирования информационно-вычислительного обеспечения систем экологического мониторинга // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 3 (43). С. 96–102.
2. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants. New York : Springer-Verlag, 1990. 256 p.
3. Longay S., Runions A., Boudon F., Prusinkiewicz P. TreeSketch: Interactive procedural modeling of trees on a

- tablet // *Proceedings of the Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling*. 2012, p. 107–120.
4. Favorskaya M., Tkacheva A. Rendering of wind effects in 3D landscape scenes // *Procedia Computer Sciences*. 2013, vol. 22, p. 1229–1238.
5. Boudon F. [et al.]. L-Py: an L-System simulation framework for modeling plant development based on a dynamic language // *Frontiers in technical advances in plant science*. 2012, p. 1–20.

6. De Lima Bicho A. [et al.] Simulating crowds based on a space colonization algorithm // *Computers and Graphics*. 2012, № 36, p. 70–79.

7. Runions A., Lane P. Modeling trees with a space colonization algorithm // *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. 2007, p. 63–70.

References

1. Yakubailik O. *Vestnik SibGAU*. 2012, no. 3 (43), p. 96–102.

2. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. New York, Springer-Verlag, 1990. 256 p.

3. Longay S., Runions A., Boudon F., Prusinkiewicz P. *Proceedings of the Eurographics Symposium on Sketch-Based Interfaces and Modeling*. 2012, p. 107–120.

4. Favorskaya M., Tkacheva A. *Procedia Computer Sciences*. 2013, vol. 22, p. 1229–1238.

5. Boudon F., Pradal C., Cokelaer T., Prusinkiewicz P., Godin C. *Frontiers in technical advances in plant science*. 2012, p. 1–20.

6. de Lima Bicho A., Rodrigues R., Musse S., Jung C., Paravisi M. *Computers and Graphics*. 2012, № 36, p. 70–79.

7. Runions A., Lane P. *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. 2007, p. 63–70.

© Ткачева А. А., 2014

УДК 539.3+539.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПЛОСКИХ КОНСТРУКЦИЙ, АРМИРОВАННЫХ ВДОЛЬ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Н. А. Федорова

Сибирский федеральный университет,
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26
E-mail: ran@akadem.ru

На основе структурной модели в рамках плоской неоднородной линейной задачи упругости решена задача рационального армирования криволинейными волокнами. Рассмотрено растяжение трехслойного армированного диска под действием центробежной силы в полярной системе координат. Получена разрешающая система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно радиальной и окружной компонент перемещений в осесимметрической постановке задачи. Изучено влияние структурных параметров на предельное нагружение конструкции. Показано, что за счет выбора структуры армирования возможно увеличение предельной скорости вращения диска почти в два раза.

Ключевые слова: армирование, структурная модель, криволинейные траектории.

MATHEMATICAL MODELLING FOR EXTREME DEFORMATIONS OF PLANAR CONSTRUCTIONS REINFORCED WITH CURVILINEAR TRAJECTORIES

N. A. Feodorova

Siberian Federal University
26, Kirenskogo Av., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation
E-mail: ran@akadem.ru

The problem of curvilinear fibers rational reinforcement is solved by reference to the structural model within the heterogeneous linear elasticity problem. Traction of a three-layered reinforced disc under the centrifugal force action in the polar coordinate system is considered. The resolving system of ordinary differential equations in radial and peripheral movement components for the axisymmetric problem definition is obtained. The effect of structural parameters for a construction limit stressing is studied. It is approved that by reinforcement structure choosing the extreme speed of a disc rotation can be increases twofold.

Keywords: reinforcement, structural model, curvilinear trajectories.

В современной промышленности широко используются тонкостенные элементы из волокнистых композитных материалов. Волокнистое армирование устанавливает анизотропию свойств материала [1] и позволяет применять новые принципы проектирования и изготов-

ления изделий, основанные на том, что материал и изделие создаются одновременно в рамках единого технологического процесса. В результате получается изделие с новыми уникальными эксплуатационными качествами. До недавнего времени армирование осуществлялось

преимущественно прямолинейными волокнами. Такие структуры армирования не могут быть эффективны для конструкций с большими градиентами полей напряжений и деформаций в зоне отверстий и переходных элементов. В этом случае необходимо создавать конструкции со специальными криволинейными структурами армирования. Работы [2–6] и настоящая статья посвящены методам поиска таких структур армирования.

Предлагается армирование конструкции по криволинейным траекториям проводить на основе трех подходов: по сетке координатных линий ортогональной системы координат, определяемой заданным конформным отображением [2; 3]; по изогональным траекториям, построенным к данным кривым [4]; по спиралевидным траекториям в осесимметрической постановке задачи [5].

В настоящей работе в качестве примера армированной конструкции рассматривается растяжение трехслойного диска под действием центробежной силы в полярной системе координат (r, θ) . В диске учитываются усилия $N_r, N_\theta, N_{r\theta}$ как сумма усилий в изотропном слое $(N_{r1}, N_{\theta1}, N_{r\theta1})$ и армированном слое $(N_{r2}, N_{\theta2}, N_{r\theta2})$, рассматриваются окружные и радиальные перемещения.

Пусть диск насажен на вал радиуса r_0 , внешний контур диска r_1 . С диском жестко соединены лопатки, наружный контур лопаток r_2 . Диск и лопатки вращаются внутри кожуха турбинного аппарата радиуса r_3 , $r_3 > r_2 > r_1 > r_0$.

Сформулируем уравнения равновесия конструкции в усилиях $N_r, N_\theta, N_{r\theta}$:

$$\frac{dN_r}{dr} + \frac{N_r - N_\theta}{r} = \Phi_1, \quad \frac{dN_{r\theta}}{dr} + \frac{2N_{r\theta}}{r} = \Phi_2. \quad (1)$$

В (1) усилия записываются как суммы усилий в слоях:

$$N_r = N_{r1} + N_{r2}; \quad N_\theta = N_{\theta1} + N_{\theta2}; \quad N_{r\theta} = N_{r\theta1} + N_{r\theta2}.$$

Массовые силы Φ_1, Φ_2 вычисляются по формулам

$$\Phi_1 = \Phi_r \omega^2 r, \quad \Phi_2 = m^v \frac{d\omega}{dt} r, \quad \text{где } \omega - \text{угловая скорость.}$$

В настоящей работе считаем, что угловая скорость ω не зависит от времени, $\Phi_2 = 0$ (установившийся режим). Находим $\Phi_r = \Phi_{r1} + \Phi_{r2}$, где $\Phi_{r1} = m_1^v h_1$, $\Phi_{r2} = m_2^v h_2$, $m^v = m_1^v + m_2^v$, m_1^v, m_2^v – удельные массы изотропного и армированного слоев, m_1^v совпадает с плотностью материала ρ_{01} . Для армированного m семействами волокон слоя имеем

$$m_2^v = \rho_{02} \left(1 - \sum_k \omega_k\right) + \sum_k \omega_k \rho_k, \quad k = 1, \dots, m, \quad (2)$$

где ρ_{02} – плотность материала связующего армированного слоя; ρ_k – плотность материала k -го семейства армирующих волокон; ω_k – интенсивность армирования k -м семейством волокон.

Исходя из введенных выше предположений, связь между усилиями и напряжениями $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{r\theta}$ в рассматриваемых слоях примет вид

$$\begin{aligned} N_{r1} &= \sigma_{r1} h_1, N_{r2} = \sigma_{r2} h_2, N_{\theta1} = \sigma_{\theta1} h_1, N_{\theta2} = \\ &= \sigma_{\theta2} h_2, N_{r\theta1} = \sigma_{r\theta1} h_1, N_{r\theta2} = \sigma_{r\theta2} h_2. \end{aligned} \quad (3)$$

В (3) $h_1(r), h_2(r)$ – заданные толщины защитного слоя и армированного слоя как функции радиуса. Ввиду жесткого соединения слоев деформирование в слоях диска происходит совместно:

$$U_r = U_{r1} = U_{r2}; \quad U_\theta = U_{\theta1} = U_{\theta2}.$$

Соотношения Коши имеют вид

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_{\theta1} = \varepsilon_{\theta2} = \frac{U_\theta}{r}; \quad \varepsilon_r = \varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = \frac{dU_r}{dr};$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{r\theta1} = \varepsilon_{r\theta2} = \frac{dU_\theta}{dr} - \frac{U_\theta}{r}.$$

Сформулированная задача (1) является статически неопределенной, необходимо привлечь связь напряжений с деформациями.

Для армированного слоя диска связь между напряжениями и деформациями с криволинейными траекториями армирования установлена на основе структурной модели в виде

$$\sigma_{r2} = a_{11}\varepsilon_r + a_{12}\varepsilon_\theta + a_{13}\varepsilon_{r\theta},$$

$$\sigma_{\theta2} = a_{21}\varepsilon_r + a_{22}\varepsilon_\theta + a_{23}\varepsilon_{r\theta},$$

$$\sigma_{r\theta2} = a_{31}\varepsilon_r + a_{32}\varepsilon_\theta + a_{33}\varepsilon_{r\theta}.$$

Полученные в работах [5; 6] коэффициенты $a_{ij}(r) = a_{ji}(r)$ учитывают все структурные характеристики материалов связующего и армирующих волокон: число семейств армирующих волокон, механические характеристики материалов связующего и волокон, интенсивность и тригонометрические функции углов армирования, входные данные технологического процесса. Здесь они не приводятся ввиду громоздкости математических выражений.

Для построения замкнутой системы разрешающих уравнений сформулируем задачу в перемещениях U_r, U_θ . В результате получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, не разрешенную относительно производных от радиального и окружного перемещений, моделирующую растяжение трехслойного диска под действием центробежной силы:

$$\begin{aligned} A_1 \frac{d^2 U_r}{dr^2} + B_1 \frac{d^2 U_\theta}{dr^2} + C_1 \frac{dU_r}{dr} + \\ + D_1 \frac{dU_\theta}{dr} + EE_1 U_r + Z_1 U_\theta = \Phi_r, \\ A_2 \frac{d^2 U_r}{dr^2} + B_2 \frac{d^2 U_\theta}{dr^2} + C_2 \frac{dU_r}{dr} + \\ + D_2 \frac{dU_\theta}{dr} + EE_2 U_r + Z_2 U_\theta = \Phi_\theta. \end{aligned} \quad (4)$$

К системе (4) присоединим краевые условия:

а) на внутреннем контуре $r = r_0$ предполагаем, что диск жестко закреплен, смещения отсутствуют, $U_r(r_0) = U_\theta(r_0) = 0$;

б) на внешнем контуре заданы усилия $N_r(r_1) = K_1 \omega^2$, $N_{r\theta}(r_1) = K_2 \omega^2$, где K_1, K_2 – экспериментально определяемые значения.

При проектировании диска необходимо установить предельную угловую скорость вращения. Введем понятие предельного упругого состояния в некоторой точке рассматриваемой конструкции, по достижении которого хотя бы в одной точке либо в связующем, либо в волокне происходит выход за пределы упругости (напряжение превышает предел текучести).

Будем рассматривать диски различных структур: спиралевидные, радиально-окружные, «спицы велосипеда» и их комбинации. Выполним обезразмеривание системы (4) и краевых условий: линейный размер отнесем к величине внутреннего радиуса r_0 , напряжение отнесем к модулю Юнга материала одного из семейств волокон E_m ($m = 1, 2$).

Для численного решения обезразмеренная система сводится к системе четырех дифференциальных уравнений первого порядка, затем строится разностная схема, аппроксимирующая систему дифференциальных уравнений и краевые условия со вторым порядком точности. Полученная при этом система линейных уравнений с трехдиагональной матрицей решается методом ортогональной прогонки. В работе численные результаты получены для дисков постоянной толщины. Наиболее важной рабочей характеристикой турбинного диска, определяющей его несущую способность, является максимальная допустимая угловая скорость вращения. Исследуем влияние структуры армирования на данный параметр.

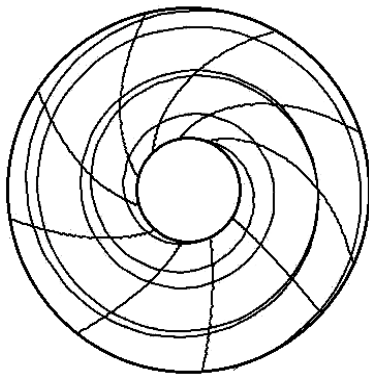


Рис. 1

Для диска газовой турбины касательные усилия в осесимметрической постановке не существенны, поэтому примем $N_{r\theta} = 0$. Предельные скорости вращения дисков газовых турбин рассмотрены на примере титанового диска массой 9,8 кг, ограниченного контурами с радиусами $r_1 = 0,05$ м, $r_2 = 0,1$ м с защитными керамическими покрытиями толщиной 0,03 мм.

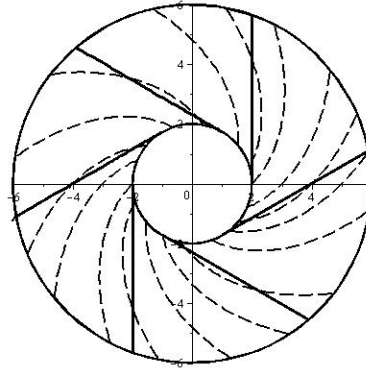


Рис. 2

В таблице приведены предельные скорости вращения армированного диска для трех типов структур армирования керамическими волокнами. Для первой структуры траекториями армирования являются семейства спиралей Архимеда и логарифмических спиралей. Обозначим эту структуру как (A+L), ее иллюстрация приведена на рис. 1. Вторая структура – семейство спиралей Архимеда и «спицы велосипеда», обозначим структуру как (A+V). Третья структура – семейство логарифмических спиралей и «спицы велосипеда». Обозначим эту структуру (L+V), иллюстрация на рис. 2.

Зависимость предельных значений числа оборотов в минуту n от структуры армирования

Структура армирования	n
Однородный титановый диск	10000
Армированный титановый диск, структура (A+L)	18500
Армированный титановый диск, структура (A+V)	19000
Армированный титановый диск, структура (L+V)	18500

Из таблицы видно, что может быть достигнуто существенное увеличение предельной скорости вращения армированного диска газовой турбины за счет выбора способа армирования вдоль криволинейных траекторий.

Библиографические ссылки

1. Федорова Н. А., Шкутин Л. И. Асимптотика осесимметричной задачи упругости для анизотропной цилиндрической оболочки // Журн. прикл. механ. и техн. физики. 1981. № 5. С. 156–162.
2. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Математическое моделирование плоских конструкций из армированных волокнистых материалов. Красноярск : СФУ, 2010. 136 с.
3. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Армирование плоских конструкций по криволинейным траекториям // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. «Физ.-мат. науки». 2010. Вып. 5 (21). С. 96–104.

4. Федорова Н. А. Моделирование изогонально армированных кольцевых пластин в полярной системе координат // Журн. СФУ. Сер. «Матем. и физ.». 2011. Т. 4, № 3. С. 400–405.

5. Федорова Н. А. Моделирование деформирования плоских конструкций со сложными криволинейными структурами армирования // Вестник СибГАУ. 2011. № 3 (36). С. 92–98.

6. Немировский Ю. В., Федорова Н. А. Исследование рациональных структур криволинейного армирования в полярной системе координат // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. «Физ.-мат. науки». 2013. Вып. 1 (30). С. 233–245.

References

1. Feodorova N. A., Skutin L. I. Asymptotic form of the axisymmetric elasticity problem for anisotropic cylin-

drical shell. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1981, vol. 22, p. 725–730.

2. Nemirovsiy Yu. V., Feodorova N. A. *Matematicheskoe modelirovanie ploskikh konstruktssii iz armirovannykh voloknistykh materialov* (Mathematical modeling of flat structures made of reinforced fiber materials). Krasnoyarsk, Sib. Fed. Univ., 2010. 136 p.

3. Nemirovsiy Yu. V., Feodorova N. A. *Vestn. Samar. Gos. Techn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2010, no 5 (21), p. 96–104.

4. Feodorova N. A. *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys.*, 2011, vol. 4, no. 3, p. 400–405.

5. Feodorova N. A. *Vestnik SibGAU*. 2011, no. 3 (36), p. 92–98.

6. Nemirovsiy Yu. V., Feodorova N. A. *Vestn. Samar. Gos. Techn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2013, no. 1 (30), p. 233–244.

© Федорова Н. А., 2014

УДК 621.355: 519.713

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ЕМКОСТИ ЛИТИЙ-ИОННОГО АККУМУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ

М. М. Хандорин¹, В. Г. Букреев²

¹ОАО «Научно-производственный центр «Полус»

Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в. E-mail: m.khandorin@gmail.com

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30. E-mail: bukreev@tpu.ru

Представлен метод оценки остаточной емкости литий-ионного аккумулятора. Приведен краткий обзор существующих подходов к решению данной проблемы. Предложен способ подстройки интегрирующего счетчика ампер-часов аккумулятора на основе модели Тевенина. Параметры модели, которые зависят от степени заряженности аккумуляторной батареи, заданы дискретными значениями. Интерполяция этих параметров производится при помощи кубического сплайна, при этом их значения принимаются за его узлы. Для снижения вычислительной сложности алгоритма сплайн-интерполяция выполняется по равномерной сетке. Приведены сравнительные результаты моделирования в среде Matlab Simulink. Они показывают, что относительная погрешность определения остаточной емкости по данному алгоритму не превышает 6 %. Также приведена оценка потребления ресурсов микроконтроллера при использовании данного алгоритма.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, модель Тевенина, интегрирующий счетчик ампер-часов, сплайн-интерполяция.

EVALUATION OF LITHIUM-ION BATTERY DISCHARGE CAPACITY BASED ON THE REFERENCE MODEL

M. M. Khandorin¹, V. G. Bukreev²

¹Joint Stock Company “Research and Production Center “Polus”

56v, Kirov Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

E-mail: m.khandorin@gmail.com

²National Research Tomsk Polytechnic University

30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation

E-mail: bukreev@tpu.ru

The method of lithium-ion battery remaining capacity has been developed. The short overview of approaches to solving this problem is provided in this paper. The integrating ampere-hour counter adjustment method based on the

Thevenin model has been developed. The state of charge dependent parameters of Thevenin model is defined in discrete values. Model parameters interpolation has been made using the cubic spline, wherein a parameter's values are used as its nodes. To reduce a spline coefficients algorithm computational complexity a uniform grid of values is used. The modeling results in Matlab Simulink software of algorithm work are provided. The relative error of remaining capacity estimation was less than 6 %. The microcontroller consumption has been also rated in this paper.

Keywords: lithium-ion battery, integrating ampere-hour counter, Thevenin model, spline-interpolation.

Эффективное управление электропитанием и энергобалансом космического аппарата, на котором накопителем энергии служит аккумуляторная батарея, требует точной информации об имеющейся разрядной емкости. Для широко применяемых в настоящий момент литий-ионных аккумуляторных батарей не в полной мере определены аналитические зависимости между внешними измеряемыми параметрами аккумулятора и его остаточной емкостью.

Наиболее очевидно для подсчета остаточной емкости аккумулятора использование счетчика ампер-часов, который является составной частью многих алгоритмов оценки данной емкости. Он применяется даже в однокристальных системах, например, в микросхемах DS2438, DS2780 и аналогичных [1]. Алгоритм определения остаточной емкости по счетчику ампер-часов предполагает вычисление полной емкости аккумулятора при текущих условиях эксплуатации и вычитание из этой величины затраченной емкости. Основным недостатком при этом – накопление интегральной ошибки при циклическом заряде и разряде батареи [2].

Для повышения точности работы счетчика ампер-часов применяются различные методы. Так, оценить степень заряженности аккумулятора можно при помощи счетчика ампер-часов и самообучающейся системы на основе нечеткой логической модели, которая корректирует показания счетчика при изменении параметров батареи [3]. Этот метод был разработан применительно к свинцово-кислотным аккумуляторам, но оказался достаточно универсальным.

Повысить точность работы счетчика ампер-часов можно и с помощью фильтра Калмана [4]. Данные от счетчика поступают в модель литий-ионной аккумуляторной батареи, которая вычисляет ее выходное напряжение при текущих значениях тока разряда и температуры. Полученное значение напряжения сравнивается с измеряемым напряжением на батарее, и в соответствии с ошибкой осуществляется коррекция показаний счетчика ампер-часов. При этом обеспечивается более высокая точность, чем обычно. Однако для работы с эталонной моделью батареи требуется большая вычислительная мощность, что не всегда возможно в микроконтроллерных системах.

Рассмотрим другой способ подстройки счетчика ампер-часов по эталонной модели. Для этого введем поправочный коэффициент δ_i и расчет значения остаточной емкости батареи $C_{ост}$ будем производить по следующей формуле:

$$C_{ост} = C_0 - \sum_{i=0}^n (I_i \Delta t_i + \delta_i), \quad (1)$$

где C_0 – разрядная емкость батареи после полного заряда, А·ч; I_i – ток разряда или заряда на i -м интервале времени; Δt_i – длительность i -го интервала времени интегрирования.

Так как напряжение на выходе батареи определяется ее остаточной емкостью [5], то значение поправочного коэффициента δ_i выбирается пропорционально ошибке определения указанного напряжения:

$$\delta_i = k(U_{и} - U_{м}), \quad (2)$$

где k – нормирующий множитель (способ определения которого будет рассмотрен ниже); $U_{и}$ – измеренное напряжение аккумуляторной батареи; $U_{м}$ – значение напряжения батареи, вычисленное по эталонной модели.

Для наглядности схема процесса коррекции показаний счетчика ампер-часов показана на рис. 1.

Исходя из обзора эмпирических моделей литий-ионных аккумуляторных батарей [6; 7], предлагается выбрать модель Тевенина, которая при относительной простоте реализации учитывает динамические параметры аккумулятора.

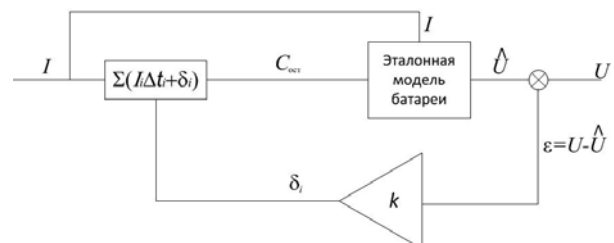


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая процесс коррекции показаний счетчика ампер-часов

Модель выходного напряжения $U_{м}$ аккумуляторной батареи при заданном значении остаточной емкости $C_{ост}$ выглядет следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dU_{Th}}{dt_i} = -\frac{U_{Th}}{R_{Th}C_{Th}} + \frac{I_i}{C_{Th}}; \\ U_{м} = U_{oc} - U_{Th} - I_i R_0, \end{cases} \quad (3)$$

где U_{Th} – падение напряжения, зависящее от химических процессов в аккумуляторе, В; R_{Th} – эквивалентное сопротивление поляризации, Ом; C_{Th} – эквивалентная емкость (определяется динамическими параметрами аккумулятора), Ф; U_{oc} – напряжение разомкнутой цепи аккумулятора, В; R_0 – постоянное сопротивление, зависящее от его конструкции, Ом.

При этом значения параметров R_{Th} , C_{Th} , U_{oc} являются функциями от остаточной емкости аккумулятора

и могут быть определены экспериментально в любой точке разрядной характеристики [6]. Очевидно, что количество таких точек будет конечно, поэтому для нормальной работы алгоритма необходимо интерполировать значения параметров R_{Th} , C_{Th} , U_{oc} на промежуточных интервалах разрядной характеристики аккумулятора.

Существует несколько способов построения интерполяционной функции между заданными точками. Интерполяция полиномом с применением кубического сплайна является предпочтительной, так как она позволяет получить форму кривой на интервалах, наиболее точно соответствующую исходной характеристике при незначительных аппаратных затратах.

Каждая точка в пространстве параметров, в которой экспериментальным образом установлены значения выбранных параметров, называется узлом сплайна. На интервалах между двумя узлами $[C_{ост\,i-1}, C_{ост\,i}]$ значения параметров вычисляются по следующим формулам [8]:

$$\begin{cases} C_{Th_i}(C_{ост}) = a_{c_i} + b_{c_i}(C_{ост} - C_{ост\,i}) + \\ + \frac{c_{c_i}}{2}(C_{ост} - C_{ост\,i})^2 + \frac{d_{c_i}}{6}(C_{ост} - C_{ост\,i})^3; \\ R_{Th_i}(C_{ост}) = a_{R_i} + b_{R_i}(C_{ост} - C_{ост\,i}) + \\ + \frac{c_{R_i}}{2}(C_{ост} - C_{ост\,i})^2 + \frac{d_{R_i}}{6}(C_{ост} - C_{ост\,i})^3; \\ U_{oc_i}(C_{ост}) = a_{U_i} + b_{U_i}(C_{ост} - C_{ост\,i}) + \\ + \frac{c_{U_i}}{2}(C_{ост} - C_{ост\,i})^2 + \frac{d_{U_i}}{6}(C_{ост} - C_{ост\,i})^3, \end{cases} \quad (4)$$

где a , b , c , d – коэффициенты сплайна.

В результате получаем семейство сплайнов для описания зависимостей R_{Th} , C_{Th} , U_{oc} в функции от значений остаточной емкости $C_{ост}$.

Так как начальный и конечный участки разрядной характеристики с экспоненциальной зависимостью параметров модели от остаточной емкости занимают около 20 % емкости батареи [5], то для построения сплайна в пространстве параметров U_{oc} , R_{Th} , C_{Th} целесообразно иметь не менее 20 узлов. При достаточно большом количестве узлов можно использовать равномерную сетку для расчета коэффициентов сплайна [8].

Следует отметить, что значения параметров R_{Th} , C_{Th} модели для заряда и разряда аккумулятора будут отличаться при известном значении $C_{ост}$, поэтому для их описания потребуется, как минимум, два семейства сплайнов.

В качестве имитационной модели реального аккумулятора используется стандартная модель в среде моделирования Simulink, параметры которой соответствуют литий-ионному аккумулятору ЛИГП-10 (ОАО «Ригель», г. Санкт-Петербург). Параметры эталонной модели Тевенина для подстройки счетчика ампер-часов определены для того же аккумулятора.

Нормировочный коэффициент k определяется экспериментально и для данного класса аккумуляторов

находится в пределах 0,0001–0,001. Выбор оптимального значения коэффициента k в рамках данного диапазона обеспечивает подстройку модели за приемлемое время и уменьшает перерегулирование.

Сравним три варианта организации счетчика ампер-часов: один с подстройкой по эталонной модели Тевенина, другой – без такой подстройки и образцовый, связанный со встроенной моделью. Показания счетчиков с подстройкой по эталонной модели и без подстройки были смещены на 3 А·ч (35 % для данного аккумулятора) для имитации накопленной ошибки. В процессе моделирования попеременного заряда и разряда аккумулятора (изменения тока от 5 А на разряде до 2 А на заряде) выполнялась оценка остаточной емкости аккумулятора (рис. 2).

В результате моделирования установлено, что подстройка счетчика ампер-часов по эталонной модели позволяет уменьшить ошибку оценивания остаточной емкости с 3 А·ч (35 %) до 0,5 А·ч (6 %).

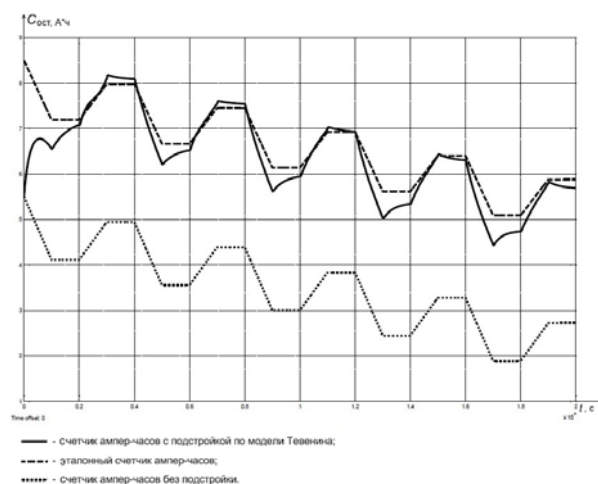


Рис. 2. Сравнение работы трех счетчиков ампер-часов

Расчет необходимых вычислительных ресурсов микроконтроллера для реализации данного метода подстройки показывает, что при использовании микроконтроллера типа Intel 8051 потребуется около 200 байт ПЗУ (в основном для хранения коэффициентов кубических сплайнов) и около 32 байт ОЗУ. Время одной итерации алгоритма составит приблизительно 900 мкс.

Рассмотренный способ подстройки счетчика ампер-часов позволяет вычислить значение остаточной емкости литий-ионной аккумуляторной батареи в процессе эксплуатации без заряда до максимальной емкости и не требует существенных программных ресурсов. Дальнейшим развитием данного метода является учет изменения параметров батареи при изменении температуры и деградации ее элементов.

Библиографические ссылки

1. Application note 131. Lithium-Ion Cell Fuel Gauging with Maxim Battery Monitor ICs. URL: <http://www.maximintegrated.com/design/techdocs/appnot>

es/index.mvp/id/5/c/Battery%20Management#c5 (дата обращения: 09.10.2013).

2. Chang W. Y. The State of Charge Estimating Methods for Battery : A Review. Hindawi Publishing Corporation ISRN Applied Mathematics. 2013. Article ID 953792. 7 p.

3. Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology. A. J. Salkind [et al.] // J. of Power Sources. 1999. Vol. 80, № 1–2. P. 293–300.

4. Shifei Y., Hongjie W., Chengliang Y. State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model // Energies. 2013. № 6. P. 444–470.

5. Таганова А. А. Герметичные химические источники тока. Элементы и аккумуляторы, оборудование для испытаний и эксплуатации. СПб. : Химиздат, 2005.

6. Hongwen H., Rui X., Jinxin F. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach // Energies. 2011. № 4. P. 582–598.

7. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams // Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review). 2012. № 7b. P. 152–156.

8. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М. : Мир, 2001.

<http://www.maximintegrated.com/design/techdocs/app-notes/index.mvp/id/5/c/Battery%20Management#c5>.

2. Chang W. Y. The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. Hindawi Publishing Corporation ISRN Applied Mathematics, 2013, Article ID 953792.

3. Salkind A. J., Fennie C., Singh P., Atwater T., Reisner D. E. Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology, *Journal of Power Sources*, vol. 80, no. 1–2, p. 293–300, 1999.

4. Shifei Y., Hongjie W. and Chengliang Y. State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model. *Energies*, 2013, 6, p. 444–470

5. Taganova A. A. *Germetichnie khimicheskie istochniki toka. Elementi i akkumuliatori, oborodovanie dlia ispitaniy i ekspluatacii* (Sealed chemical power sources. Batteries, equipment for tests and exploitation). St. Petersburg, Himizdat, 2005.

6. Hongwen H., Rui X., Jinxin F. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*. 2011, № 4, p. 582–598.

7. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2012, № 7b, p. 152–156.

8. Rogers D., Adams D. *Matematicheskie osnovi mashinnoi grafiki* (Mathematical basis of computer graphics). Moscow, Mir Publ., 2001.

References

1. Application note 131. Lithium-Ion Cell Fuel Gauging with Maxim Battery Monitor ICs. Available at :

© Хандорин М. М., Букреев В. Г., 2014

УДК 523.64: 52-33

ДРУГОЙ СЦЕНАРИЙ ТУНГУССКИХ СОБЫТИЙ 1908 ГОДА

В. В. Шайдуров

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44.
E-mail: shaidurov04@mail.ru

Излагается сценарий многочисленных событий 30 июня 1908 года, обычно называемых тунгусской катастрофой и относящихся ко взрыву космического тела в земной атмосфере. Этот сценарий не совпадает с наиболее распространенной версией событий, но может объяснить разнообразный круг явлений, произошедших на огромной территории от Западной Европы до Восточной Сибири. Его обоснование опирается на фактический материал, собранный и классифицированный на протяжении десятилетий самоотверженными исследователями тунгусских событий. В статье изложена только схема обоснования, опирающаяся на физические явления, известные из университетских учебников. Более подробное изложение и верификация каждого эффекта будут проведены в последующих статьях путем детального сравнения с накопленным за десятилетия фактическим материалом.

Ключевые слова: Тунгусский метеорит, кометные осколки, ионизация, сила Лоренца, разделение ионов, диссоциация молекул, дипольные образования.

ANOTHER SCENARIO OF TUNGUSKA EVENTS IN 1908

V. V. Shaidurov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
 Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of RAS
 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
 E-mail: shaidurov04@mail.ru

The article describes a scenario of many events on 30 June 1908, commonly called Tunguska catastrophe and related to the explosion of a space body in the Earth's atmosphere. This scenario is not the same as the most common versions of these events, but it can explain the diverse range of phenomena that occurred in the vast area from Western Europe to Eastern Siberia. The rationale for this scenario is based on factual data collected and classified during decades by selfless researchers of Tunguska events. In this paper the only scheme of justification is presented that based on the physical phenomena known from university textbooks. A more detailed explanation and verification of each effect will be carried out in the further papers by careful comparison with the factual material accumulated during decades.

Keywords: Tungus meteorite, comet fragments, ionization, Lorenz force, separation of ions, dissociation of molecules, dipole formations.

Траектория космического тела вблизи эпицентра разрушений. В течение нескольких минут после полуночи по гринвичскому времени (GMT) 30 июня 1908 г. (17.06.1908 г. по старому стилю) Земля пересекла траекторию осколков разрушенного кометного тела. Большая часть этих осколков сгорела, ионизировалась, взорвалась высоко в атмосфере, дав ряд воздушных и наземных эффектов [1; 2].

Наибольшие наземные эффекты проявились в хорошо известной и исследованной местности в бассейне реки Подкаменная Тунгуска Красноярского края с координатами эпицентра $60^{\circ}53'$ с. ш. и $101^{\circ}53'$ в. д., где произошло значительное поражение местности. Тщательный анализ физических эффектов и повреждений дает основания утверждать, что движение главного космического тела, взорвавшегося в 0 ч 14 мин GMT на высоте в несколько километров над эпицентром, происходило по азимуту $\sim 276^{\circ}$ (здесь и далее, отсчитываемому к востоку от северного направления географического меридиана, т. е. по часовой стрелке). Таким образом, по предлагаемому здесь сценарию движение космического тела до взрыва происходило вдоль оси симметрии поражений лесного массива, выведенной В. Г. Фастом еще в 1967 г. [3; 4], но в противоположном направлении.

Направление движения в свое время было выбрано для согласования с показаниями «восточных очевидцев», проживавших в верховьях рек Нижней Тунгуски и Лены [1; 5]. Правда, по мере согласования траектории с их показаниями, обострялось противоречие с показаниями «южных очевидцев», проживавших на Ангаре в поселке Кежемском. Между тем, мы покажем, что «восточные» и «южные» очевидцы наблюдали вторичные эффекты, несомненно связанные с аналогичными осколками, но не имеющие прямой связи со взрывом в эпицентре. В самом деле, если принять во внимание такую отброшенную как бесполезную информацию о том, что в ряде поселений 30-го июня 1908 г. (например, в Ново-Удинское, Тангуй,

Балаган [2; 5]) ничего необычного не наблюдалось, то зоны необычных явлений окажутся геометрически изолированными. Количество этих зон мы попробуем вывести из исследований Ф. Уиппла [6] чуть позднее.

Разделение и консервация ионов во время пролета болида в атмосфере. Хорошо известно, что при скоростях входа космического тела в атмосферу порядка 20 км/с происходит ионизация как принесенного материала, так и воздуха [7; 8]. С учетом кулоновских сил взаимодействия разноименных зарядов среднее время жизни таких ионов до рекомбинации обычно оказывается незначительным. Между тем, в данной ситуации время их раздельного существования значительно увеличивается двумя явлениями.

Во-первых, при движении иона заряда $+e$ или $-e$ с вектором скорости $\mathbf{v}$ в магнитном поле Земли на него действует сила Лоренца, равная $\pm e (\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}])$, где $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции [9]. Поскольку далее речь пойдет о разреженной атмосфере, то с большой точностью можно положить $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля Земли в соответствующем месте. Кроме того, в условиях невозмущенной атмосферы на больших высотах можно положить первое слагаемое в скобках $\mathbf{E}$ равным нулю [6]. В итоге с учетом угла α между векторами $\mathbf{v}$ и $\mathbf{H}$ на заряд $\pm e$ действует сила, равная $F = \pm e v \mu_0 H \sin \alpha$, где v и H – численные значения модуля векторов $\mathbf{v}$ и $\mathbf{H}$. Причем направление действия силы Лоренца *противоположно* для ионов разных знаков.

Напомним, что в регионе, где происходили основные события, наклонение вектора напряженности магнитного поля Земли было таково, что магнитные силовые линии уходили в земную поверхность с углом $\sim 77^{\circ}$ [10; 11].

Поэтому при входе болида в атмосферу происходит образование, разделение и накопление ионов в спутном потоке (рис. 1). В самом деле,

ионизация материала происходит главным образом в носовой части ударной волны, после чего ионы уносятся в спутный поток по разные стороны в зависимости от знака ввиду силы Лоренца. Что касается диссоциации молекул, то она происходила по всей поверхности ударной волны и в части спутного потока. На первый взгляд кажется, что накопление разделенных ионов в указанной области активной ионизации может создать локальное электрическое поле с напряженностью E противоположного направления к $[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$. Но спутный поток движется со скоростью меньшей, чем ударная волна [7; 12], и образующиеся ионы отстают от зоны активной ионизации, не накапливая существенной разницы зарядов вблизи нее.

Таким образом, в носовой части ударной волны работает «фабрика» по производству и разделению ионов, а во всей ударной волне происходит массовая диссоциация молекул [7].

Другим фактором, увеличивающим время жизни ионов до их рекомбинации в спутном потоке, является их изоляция диполями. Одним из главных дипольных объектов, фигурирующих в создании описываемых физических эффектов, является молекула воды. Из-за теплового вращения единичной молекулы направление ее диполя в пространстве быстро меняется. Другое дело – кластеры воды, в которые эти молекулы собираются за счет водородных связей. В настоящее время проведена подробная классификация этих кластеров, в частности, определив кластеры с наиболее выгодными энергетическими состояниями при разных температурах окружающей среды [13]. Многие из них обладают суммарным дипольным моментом [14]. В результате такие кластеры, да и сталкивающиеся с ионом другие молекулы с дипольным моментом (воды, гидроксиды (ОН), окиси углерода (СО)) ввиду взаимодействия с его зарядом облепляют его, изолируя от облепленных ионов другого знака. В последующем два таких образования с ионами разных знаков за счет кулоновской силы могут слипаться в конгломерат, оставаясь изолированными и образуя диполь с еще большим моментом.

Теперь проясним вопрос с наличием водяных паров в спутном потоке. На первый взгляд, кажется невероятным существенное наличие льда или воды в обсуждаемом космическом теле. Дело в том, что при таком расстоянии до Солнца их присутствие дало бы

заметную газообразную кому. Вместе с тем, таких признаков не наблюдалось, хотя видимость неба в предшествующие ночи и была понижена. Отсутствие заметной комы может быть объяснено тем, что фрагменты космического тела состояли из «подсохшего» материала старой кометы, уже побывавшей в окрестности Солнца на предыдущих витках орбиты. Это предположение может объяснить также микроструктуру космического тела, состоящего главным образом из металлосиликатной пыли [15; 16], а также ее окислов и гидратов, полученных при предыдущих тепловых воздействиях. Тогда появление водяных паров при взаимодействии тела с атмосферой вызвано дегидратацией его пылевого состава. Это дало значительные атмосферные эффекты, доказывающие наличие в космическом теле большого запаса связанной воды [1; 17].

Итак, спутный поток падающего болида содержал большое количество разделенных ионов, а также радикалов, суммарно обладающих большим запасом энергии рекомбинации.

Движение газовых потоков после взрыва. При взрыве перегретой ионизированной смеси происходило сложение трех движений:

- 1) поступательное (уже основательно замедленное до звуковых скоростей) движение внесенного космического и захваченного материала;
- 2) «сферическое» распространение взорвавшейся массы;
- 3) смещение заряженных ионов благодаря силе Лоренца, перпендикулярное к векторной сумме двух предыдущих движений и к магнитным силовым линиям.

На сумму этих движений конечно влияет газодинамическое сопротивление атмосферы и образующиеся перепады давления и температуры, но их влияние тем меньше, чем выше скорость движения.

Именно благодаря силе Лоренца ионы двигались по криволинейным траекториям. Изменение направления характеризуется ускорением $a = F/m$, где m – масса ионизированной частицы. Отсюда изменение прямолинейного направления тем сильнее, чем выше скорость $v \sin \alpha$ перемещения этой частицы в направлении, перпендикулярном магнитным силовым линиям и чем меньше ее масса.

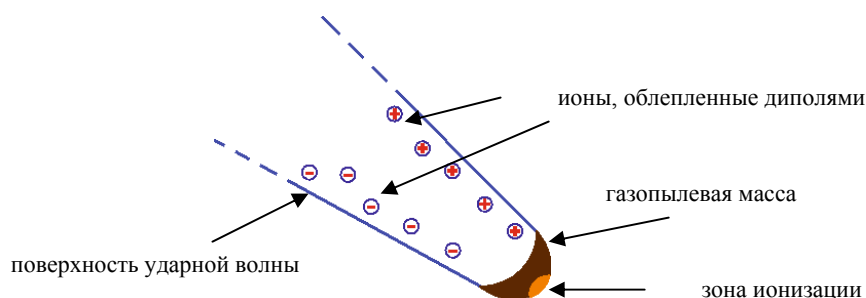


Рис. 1. Разделенные ионы в спутном потоке:
вид из точки сверху и южнее

Напомним, что максимальная скорость внесенного и захваченного материала достигается на переднем (по нашему сценарию на восточном) фронте ударной волны ввиду абсолютного сложения скоростей двух первых движений. Кроме того, исходя из наличия поражений на запад от эпицентра, можно заключить, что на момент взрыва скорость разлета взорвавшейся массы оказалась выше скорости поступательного движения. Поэтому на заднем (западном) фронте ударной волны суммарная скорость (точнее, разность их абсолютных значений) двух первых движений тоже оказалась ненулевой. В итоге эта часть ионизированного материала тоже дала свой вклад в поражение лесного массива, хотя и существенно меньший по площади, чем в направлении исходного движения импактного материала.

На наш взгляд, именно ионизированный материал не только вызвал нарушение «идеальной» картины вывала и поражения леса, но и в значительной мере повлиял на нее.

В этой связи напомним утверждение, сформированное в работе [4] и проверенное последующими исследованиями [1] (см. рис. 1): «Область вывала может быть разделена на четыре квадранта, симметричных относительно линии, проходящей с востока на запад-северо-запад через эпицентр в направлении 99° к востоку от географического меридиана. В первом квадранте, между 12° и 99° , значения отклонений от радиального направления отрицательны, т. е. имеет место сдвиг влево, против часовой стрелки, во втором – положительны (отклонение по часовой стрелке), в третьем – снова отрицательны и в четвертом – опять положительны. Отклонения эти статистически высокодостоверны и свидетельствуют о наличии факторов, существенно влияющих на общую картину радиальности. В литературе по Тунгусскому метеориту указанные отклонения получили наименование осесимметричных. Отчетливее они выражены в северо-восточных и юго-восточных квадрантах, где они достигают величины 7° и даже 14° » [1].

Отклонения именно с такими знаками и должны получиться с учетом силы Лоренца. Например, в первый квадрант во время взрыва с переднего фронта выносятся ионы с положительным зарядом (катионы), на которые действует сила, разворачивающая их против часовой стрелки. Во второй квадрант во время взрыва с переднего фронта выносятся ионы с отрицательным зарядом (анионы), на которые действует сила, разворачивающая их по часовой стрелке. В третий квадрант во время взрыва с заднего фронта снова выносятся катионы, на которые действует сила, разворачивающая их против часовой стрелки. А попавшие в четвертый квадрант анионы разворачиваются по часовой стрелке. Кроме того, в восточном направлении скорости взрывной волны и поступательного движения складываются, а в западном – вычитаются. Поэтому отклонения отчетливее выражены в восточных квадрантах, где суммарная скорость материала v существенно выше.

Итак, к поражающим факторам в районе тунгусской катастрофы в предлагаемом сценарии добавляется *энергия рекомбинации ионов*, выделяемая непосредственно в контакте с растительностью, почвой, скальными породами и водой.

Не меньшее значение имеет *энергия рекомбинации радикалов*, получившихся при высокотемпературной диссоциации молекул привнесенного космического и захваченного атмосферного материала и его абляции. И хотя энергия акта рекомбинации ионов обычно значительно больше энергии рекомбинации радикалов, плотность радикалов в спутном потоке существенно больше плотности ионов. Это делает ассоциацию радикалов еще одним поражающим фактором, тоже в существенной мере реализуемым непосредственно в контакте с наземными объектами.

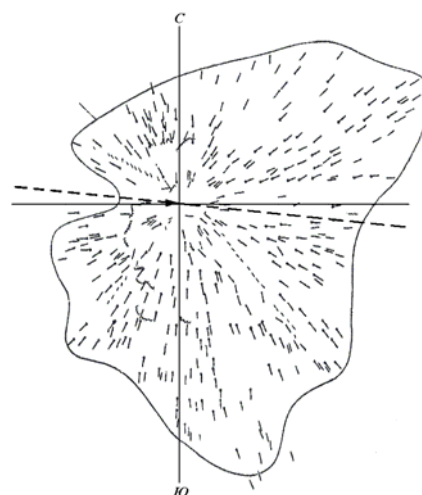


Рис. 2. Контур зоны поваленных деревьев («бабочка» В. Г. Фаста) и локальноосредненные направления поваленных деревьев из публикаций [1; 3; 4]. Эпицентр находится в начале координат, а пунктирная линия обозначает проекцию предложенной траектории космического тела на поверхность Земли и ее продолжение после взрыва

Отметим, что площадь поражения и сами поражения несколько меньше на север относительно предложенной траектории движения импактного материала. Возможное объяснение состоит в том, что сила Лоренца в южной части прижимает поток ионов к поверхности Земли с углом $\sim 13^\circ$, усиливая его поражающий фактор, а в северном направлении – поднимает поток ионов от поверхности с тем же углом $\sim 13^\circ$, рассеивая его на большую территорию. Поэтому фигура «бабочки» В. Г. Фаста, по нашей версии летящей с запада на восток, несколько несимметрична относительно предложенной траектории движения импактного материала за счет большей южной части площади поражения.

Использование информации о звуковых волнах. Для подтверждения неединственности болида и направления их полета привлечем данные нескольких барографов в Англии (рис. 3) и их обработку, представленные Ф. Уипплом [6]. Как видно, на

каждой станции при регистрации акустического сигнала самописцы дали разные линии. Но все эти записи имели общие черты, которые Ф. Уиппл отразил в обобщенной кривой, приведенной на рис. 4. Видно, что возмущение начинается со слабого увеличения давления, за которым следует его сильное уменьшение. После четырех слегка затухающих колебаний с периодом около 2 мин приходит сильная осцилляция, начинающаяся со значительного уменьшения давления. После трех быстрых и затухающих колебаний это воздействие стало менее заметным на фоне наложения на медленно затухающее первое воздействие. Но примерно в 5 ч 28,5 мин и в 5 ч 31 мин приходят еще два возмущения меньшей амплитуды.

Сам Ф. Уиппл объяснял первое воздействие прохождением болида в воздухе, второе – взрывом метеорита на земле. Поскольку теперь известно об отсутствии взрыва на земле, то первое воздействие обычно трактуют как исходные взрывы болида, а последующие – как электрические вспышки-разряды [2].

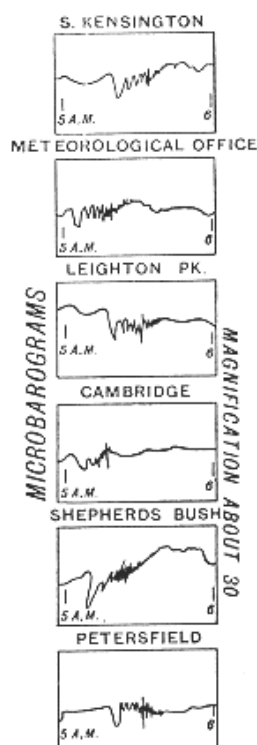


Рис. 3. Барограммы английских станций, зарегистрировавших распространявшиеся по воздуху волны от взрывов тунгусских болидов

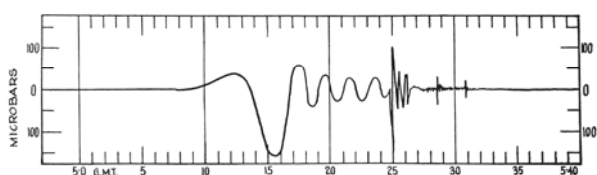


Рис. 4. Результирующая кривая, отражающая колебания давления звуковой волны от тунгусских взрывов

Между тем, приход сначала сильной волны низкого давления в первом и втором случае уже говорит о том, что силовые воздействия на атмосферу были направлены, главным образом, в сторону, противоположную от станции измерения, т. е. с запада на восток. Небольшая пришедшая первой волна повышенного давления тоже находит свое объяснение ввиду некоторого распространения взрывной волны на запад, как это уже отмечено в предыдущем разделе. Обычно проводимое сравнение с ядерным взрывом здесь приводит к существенному различию, поскольку от ядерного взрыва волна разрежения принципиально не может прийти впереди волны сжатия [7].

Таким образом, естественно предположить, что произошло 4 взрыва. Первый из них был самым мощным, судя по масштабу воздействия на атмосферу. Но после него последовало еще три взрыва меньшей мощности, последствия которых тоже можно проследить ввиду накопленных данных.

Итак, в статье изложены главные тезисы предполагаемого сценария тунгусских событий 1908 г. Здесь не проводилось его тщательное обоснование и объяснение различных сопровождавших физических эффектов. Это будет детально сделано в последующих статьях, специализированных по соответствующим физическим эффектам.

Здесь же главное отличие от доминирующей в настоящее время гипотезы состоит в разъединении событий 1908 г. в эпицентре взрыва на Подкаменной Тунгуске и наблюдаемых эффектов на Ангаре, Енисее и притоках Лены. Оно снимает необходимость «притягивания» осей поражения и вывала леса к траекториям наблюдаемых вторичных образований, а тогда картина событий будет становиться все более четкой.

Библиографические ссылки

1. Васильев Н. В. Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. М. : Русская панорама, 2004.
2. Гладышева О. Г. Тунгусская катастрофа: детали головоломки. СПб. : Наука, 2011.
3. Фаст В. Г. Статистический анализ параметров Тунгусского вывала // Проблема Тунгусского метеорита. Томск, 1967. Вып. 2. С. 40–61.
4. Фаст В. Г., Баранник А. П., Разин С. А. О поле направлений повала деревьев в районе падения Тунгусского метеорита // Вопросы метеоритики. Томск, 1976. С. 39–52.
5. Н. В. Васильев [и др.]. Показания очевидцев тунгусского падения (каталог) [Электронный ресурс]. Томск, 1981. Деп. в ВИНТИ 24.11.1981, № 10350-81. URL: www.tunguska.ru/obzor/catalog/.
6. Whipple F. J. W. The great Siberian meteor and the waves, seismic and aerial, which it produced // Quarterly J. of the Royal Meteorological Society. 1930. Vol. 56, № 236. P. 287–301.
7. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М. : Физматлит, 2008.

8. Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. М. : Академкнига, 2005.

9. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 5. Электричество и магнетизм. М. : Мир, 1977.

10. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л. : Изд-во Ленинград. ун-та, 1978.

11. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [Электронный ресурс]. URL: www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/.

12. Крайко А. Н. Краткий курс теоретической газовой динамики. М. : МФТИ, 2007.

13. Miyake T., Aida M. H-bond patterns and structure distributions of water octamer (H₂O)₈ at finite temperatures // Chemical Physics Letters. 2006. Vol. 427. P. 215–220.

14. Gregory J. K., Clary D. C., Liu K., Brown M. G., Saykally R. J. The Water Dipole Moment in Water Clusters // Science. 1997. Vol. 275, no. 5301. P. 814–817.

15. Флоренский К. П. [и др.]. Химический состав космических шариков из района Тунгусской катастрофы и некоторые вопросы дифференциации вещества космических тел // Геохимия. 1968. № 10. С. 1163–1173.

16. Glass B. P. Silicate spherules from Tunguska impact area: electron microprobe analysis // Science. 1969. Vol. 164, № 3879. P. 547–549.

17. Turco R. P. [et al.]. An analysis of the physical, chemical, optical and historical impacts of the 1908 Tunguska meteor fall // Icarus. 1982. Vol. 50, № 1. P. 1–52.

References

1. Vasiliev N. V. *Tungusskii meteorit. Kosmicheskii fenomen leta 1908 g.* (Tungus meteorite. Space phenomenon of summer 1908.). Moscow, Russkaya panorama Publ., 2004.

2. Gladysheva O. G. *Tungusskaya katastrofa: detali golovolomki* (Tungus catastrophe: the pieces of the puzzle). Sankt-Petersburg, Nauka Publ., 2008.

3. Fast V. G. *Statisticheskii analiz parametrov Tungusskogo vyvala. Problema Tungusskogo meteorita* (Statistical analysis of parameters for Tungus tree fall. Problem of Tungus meteorite). Tomsk, 1967, Issue 2, p. 40–61.

4. Fast V. G., Barannik A. P., Razin S. A. *O pole napravlenii povala derev'ev v raione padeniya Tungusskogo meteorita. Voprosy meteoritiki* (About direction field of tree fall in the region of Tungus meteorite falling. Meteoritics questions), Tomsk, 1976, p. 39–52.

5. Vasiliev N. V., Kovalevskiy A. F., Razin S. A., Epitektova L. E. *Pokazaniya ochevidtsev tungusskogo padeniya (katalog)* (Eyewitness testimonies of Tunguska fall (catalog)). Tomsk, 1981. Deposited at VINITI, 24.11.1981, № 10350-81. www.tunguska.ru/obzor/catalog/.

6. Whipple F. J. W. (1930) *The great Siberian meteor and the waves, seismic and aerial, which it produced*. Quarterly J. of the Royal Meteorological Society. 1930. Vol. 56, № 236, p. 287–301.

7. Zel'dovich Ya. B., Raizer Yu. P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavlenii* (Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena). Moscow, Fizmatlit Publ., 2008.

8. *Katastroficheskie vozdeistviya kosmicheskikh tel* (The catastrophic effects of cosmic bodies). Moscow, Akademkniga Publ., 2005.

9. Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M. *The Feynman Lectures on Physics: The Complete and Definitive Issue*. Vol. 2, Pearson PTR, 2005.

10. Yanovskii B. M. *Zemnoi magnetizm*. (Earth's magnetism). Leningrad University, 1978.

11. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Available at: www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/.

12. Kraiko A. N. *Kratkii kurs teoreticheskoi gazovoi dinamiki* (Short course of theoretical gas dynamics). Moscow, MFTI, 2007.

13. Miyake T., Aida M. *H-bond patterns and structure distributions of water octamer (H₂O)₈ at finite temperatures*. Chemical Physics Letters, 2006, vol. 427, p. 215–220.

14. Gregory J. K., Clary D. C., Liu K., Brown M. G., Saykally R. J. *The Water Dipole Moment in Water Clusters*. Science, 1997, vol. 275, no. 5301, p. 814–817.

15. Florenskii K. P., Ivanov A. V., Il'in N. P. et al. *Khimicheskii sostav kosmicheskikh sharikov iz raiona Tungusskoi katastrofy I nekotorye voprosy differentsiatsii veschestva kosmicheskikh tel*. Geokhimiya (The chemical composition of cosmic balls from the area of the Tunguska catastrophe and some questions of matter differentiation for celestial bodies. Geochemistry). 1968, № 10, p. 1163–1173.

16. Glass B. P. *Silicate spherules from Tunguska impact area: electron microprobe analysis*. Science. 1969, vol. 164, № 3879, p. 547–549.

17. Turco R. P., Toon O., Park C. et al. *An analysis of the physical, chemical, optical and historical impacts of the 1908 Tunguska meteor fall*. Icarus. 1982, vol. 50, № 1, p. 1–52.

РАЗДЕЛ
2

АВИАЦИОННАЯ
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ
ТЕХНИКА

УДК 621.396.67

СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ АНТЕННЫ

А. А. Алексеенко¹, Е. В. Бикеев¹, М. О. Дорофеев¹, М. В. Лукьяненко², М. Г. Матыленко¹

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: mathylenko@iss-reshetnev.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: sibgau-sau@mail.ru

Рассмотрены актуальные вопросы повышения качества связи и улучшения характеристик крупногабаритной трансформируемой антенны (КТА). Решить эти проблемы возможно только при высокой точности геометрии поверхности рефлектора антенны и его пространственного положения относительно облучателя. Для выполнения требований к точности геометрии КТА и её наведению в заданное положение при штатной эксплуатации необходима прецизионная система наведения (СН) КТА, которая должна обеспечивать заданную точность профиля отражающей поверхности рефлектора КТА относительно его теоретического профиля, а также точность его позиционирования относительно облучателя. С учетом задач, возложенных на СН КТА, проведен анализ требований к СН КТА, позволяющий определить основные технические требования к системе и её элементам. Определены основные подходы и принципы построения подобной системы, а также проработаны варианты её состава. Рассмотрены способы и методы управления геометрией КТА.

Ключевые слова: крупногабаритная трансформируемая антенна, система наведения антенны, крупногабаритный рефлектор, геометрические характеристики рефлектора, погрешности наведения, точность поверхности рефлектора.

THE GUIDANCE SYSTEM OF LARGE FLEXIBLE ANTENNA

A. A. Alekseenko¹, E. V. Bikeev¹, M. O. Dorofeev¹, M. V. Luk'janenko², M. G. Matylenko¹

¹JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation
E-mail: mathylenko@iss-reshetnev.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: sibgau-sau@mail.ru

The actual problems of improvement of quality of communication and large flexible antennas (LFA) characteristics are considered. It is possible to solve these problems on condition that high precision of antenna reflector surface shape and its space attitude with respect to a feeder. A precision guidance systems of LFA are necessary to meet the requirements to LFA shape and its pointing to a given position during orbit operation. The guidance system should provide a given accuracy of a profile of reflecting surface of LFA reflector with respect to a theoretical profile as well as a positioning precision relative to a feeder. Considering the tasks that the guidance system of LFA performs, the analysis of requirements to the guidance system of LFA is fulfilled that allows the main technical requirements to the system and its elements to be determined. The main approaches and principles of designing of such systems are specified as well as alternatives of its structure are studied. Methods and techniques of LFA shape control are considered.

Keywords: large flexible antenna, antenna guidance system, large reflector, reflector shape properties, guidance error, reflector shape precession.

Анализ современного состояния космической отрасли показывает перспективность развития широкополосной связи, что связано с созданием космических аппаратов (КА), имеющих в своём составе КТА с рефлектором большого размера (диаметром более 8 м), и глобальной зоной покрытия.

Особую актуальность имеют крупногабаритные трансформируемые бортовые рефлекторы и антенные

системы, обладающие принципиально новыми качествами и обеспечивающие существенное повышение уровня предоставления информационных услуг конечным потребителям спутниковой связи, а именно, гарантированное раскрытие крупногабаритных антенн на орбите, высокая точность ориентации, сохранение геометрических и радиотехнических параметров при длительном сроке активного существования

КА. Не менее важной является задача уменьшения массы конструкции КТА [1].

Ввиду больших габаритов КТА затруднена экспериментальная отработка в наземных условиях. Отработка облучателя, штанги рефлектора и самого рефлектора выполняется раздельно, что приводит к большим погрешностям взаимного расположения облучателя и рефлектора. Погрешности расположения конструкций ведут к погрешностям наведения, деформации главного луча и уменьшению коэффициента усиления КТА.

Для отработки раскрытия рефлектора в наземных условиях с контролем точности его радиоотражающей поверхности после раскрытия требуется система обезвешивания, которая по сложности конструкции и стоимости не уступает самому рефлектору. Поэтому экспериментальная отработка вопросов точности геометрии радиоотражающей поверхности рефлектора в полном объеме нецелесообразна [2].

В общем виде погрешность наведения КТА можно представить следующими составляющими:

- погрешность определения положения и формы рефлектора;
- погрешность управления положением и формой рефлектора;
- погрешность наведения КТА за счет ориентации корпуса КА.

Повышение качества связи и улучшение характеристик подобных КТА возможно только при высокой точности геометрии поверхности рефлектора антенны и его пространственного положения относительно облучателя. Для выполнения требований к точности геометрии КТА и ее наведению в заданное положение при штатной эксплуатации необходима прецизионная СН КТА, которая должна обеспечивать заданную точность профиля отражающей поверхности рефлектора КТА относительно его теоретического профиля, а также точность его позиционирования относительно облучателя. Это позволит осуществлять прием и передачу высокочастотных сигналов и формировать требуемую диаграмму направленности. Учитывая задачи, возложенные на СН КТА, необходимо определить основные подходы и принципы построения подобной системы, а также проработать варианты ее состава. По выполнению задач СН КТА можно условно разделить на подсистемы измерения и управления.

Подсистема измерения должна иметь в своем составе:

- прибор, работающий по принципу 3D-камеры, позволяющий определять пространственные координаты некоторого количества контрольных элементов (КЭ) с заданной точностью и осуществлять визуальный контроль на этапе раскрытия рефлектора;
- КЭ, являющиеся пассивными отражателями на основе световозвращающих пленок;
- алгоритмы определения пространственного положения и формы рефлектора.

Подсистема измерения осуществляет визуальный контроль рефлектора КТА, определение его текущих геометрических характеристик и подготовку исходных данных для орбитальной юстировки рефлектора.

Подсистема управления должна иметь в своем составе:

- устройство регулировки положения рефлектора (УРПР);
- устройство поднастройки формы рефлектора (УПФР);
- алгоритмы определения положения и формы рефлектора.

Измерение пространственных координат некоторого количества КЭ, расположенных на поверхности рефлектора, позволяет определить его линейное и угловое положение в системе координат КА, а также оценить форму поверхности рефлектора по отклонениям измеренных координат КЭ от их теоретических значений. В свою очередь, информация о положении и форме крупногабаритного рефлектора КТА позволяет сформировать управляющее воздействие, необходимое для корректировки его геометрии с помощью управляющих элементов СН КТА.

Требования к геометрии КТА подразумевают совпадение положения фокуса, вписанного в радиоотражающую поверхность параболоида вращения (ПВ), с фазовым центром облучателя и совпадение положения оптической оси ПВ со своим теоретическим положением с некоторой заданной точностью.

Функциональная схема СН КТА представлена на рис. 1.

Функционирование КТА требует выполнения следующих условий:

- расстояние между фокусом рефлектора и фазовым центром облучателя не должно превышать некоторого значения R ;
- угловое положение фокальной оси рефлектора должно быть близко к номинальному, чтобы углы поворота фокальной оси в двух взаимно перпендикулярных плоскостях не превышали некоторого значения α ;
- точность профиля отражающей поверхности рефлектора, определяемая среднеквадратичным отклонением (СКО) отражающей поверхности относительно теоретически обоснованной поверхности ПВ, должна быть не хуже некоторого значения σ .

Для определения текущей геометрии рефлектора КТА на КА очевидным является использование современных методов геодезического контроля антенн, широко применяемых при создании наземных антенн и космических радиотелескопов.

Проведенный анализ материалов позволяет сделать следующие выводы:

1. Для определения текущих геометрических характеристик КТА необходимы измерения пространственных координат контрольных точек (КТ) поверхности рефлектора, положение и количество которых должно быть оптимизировано, исходя из требований к точности измерения.

2. Учитывая прозрачность материала сетеполотна рефлектора, а также возможные помехи, создаваемые солнцем, звездами и бликами от элементов конструкции КА, попадающих в поле зрения измерительной аппаратуры, в местах положения КТ необходимо размещение КЭ, обеспечивающих отражение света в обратном направлении.

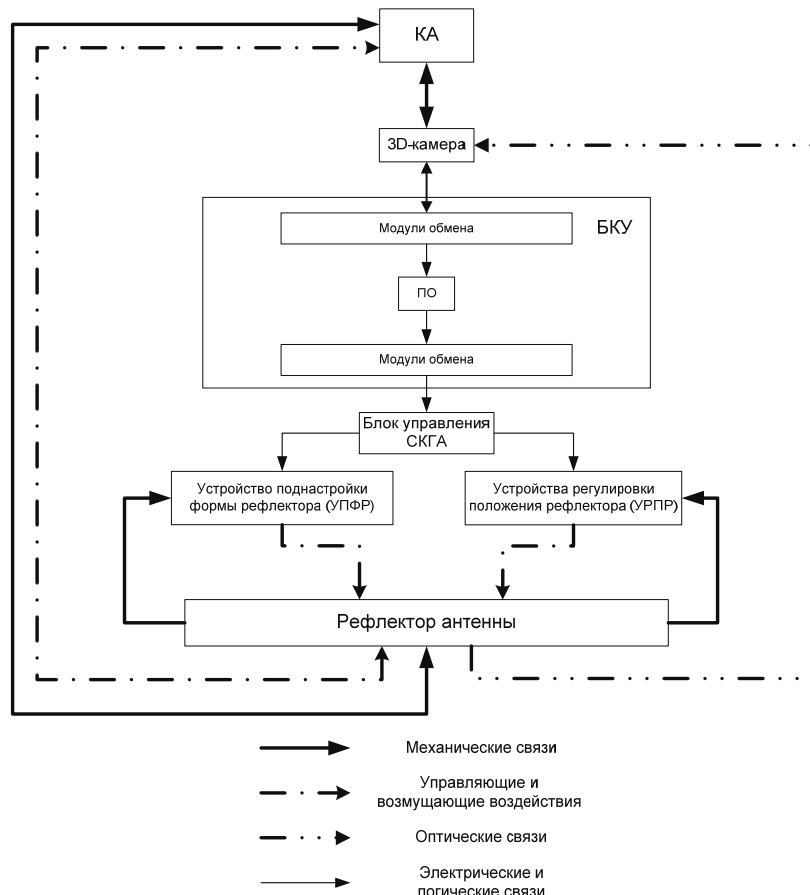


Рис. 1. Функциональная схема СН КТА

3. КЭ должны иметь пассивное, световозвращающее исполнение, поскольку размещение активных КЭ является очень сложной технической проблемой.

4. Подсистема измерения должна иметь собственную осветительную систему, мощности которой должно быть достаточно для обеспечения требуемого уровня соотношения сигнал/шум.

5. Для определения пространственных координат КТ поверхности рефлектора необходимо измерение углового положения КЭ и расстояния до него.

6. Наиболее распространенными бесконтактными системами определения геометрии крупногабаритных конструкций во многих отраслях промышленности являются системы, построенные на измерениях лазерных теодолитов, лазерных сканеров и 3D-камер. Преимуществом сканирующих измерительных приборов является более высокая точность по сравнению со статическими приборами. Однако исходя из расчетов ожидаемых деформаций конструкции антенны, источником наибольших искажений геометрических параметров рефлектора являются температурные деформации вследствие неравномерного солнечного освещения конструкции. Температурные деформации являются периодическими, имеющими период обращения КА по орбите. Принимая во внимание количество КЭ, размещаемых на рефлекторе, их измеренные координаты будут принадлежать различным деформированным состояниям рефлектора, имеющим между собой значительные различия. Исходя из выше-

изложенного, подсистема измерения должна быть построена на основе статического прибора типа 3D-камеры [3].

7. Для получения достоверных сведений об отклонениях профиля рефлектора измерительный прибор должен быть расположен на основании, имеющем высокую стабильность положения относительно системы контроля (СК) КА.

8. Для выполнения задач визуального контроля КТА измерительный прибор должен иметь возможность создавать фотоснимки элементов конструкции антенны, попадающие в его поле зрения. Такими возможностями обладают фотокамеры на основе ПЗС-матрицы.

Для реализации подсистемы измерения были разработаны алгоритмы определения геометрических характеристик КТА на основе измерений координат КЭ, определено оптимальное с точки зрения точности измерения и эффективности управления количество и расположение КЭ и сформированы требования к составным частям подсистемы измерения.

Положение рефлектора в базовой СК КА определяется положением СК, в которой отражающая поверхность описывается каноническим уравнением ПВ. Реализуется данная СК построением СК по трем КТ. Положение СК трех точек известно как в СК вписанного параболоида (ВП), так и в базовой СК КА. Исходя из этого, находится взаимное положение СК ВП и базовой СК КА.

СКО отражающей поверхности рефлектора находится из вычисленных кратчайших расстояний от КТ до поверхности ВП.

Оптимальное количество КЭ определяется исходя из габаритов рефлектора и предъявляемых требований к точности его отражающей поверхности. Например, равномерное расположение 96 КЭ обеспечивает требуемую точность определения положения рефлектора диаметром 48 м и требуемую точность определения СКО отражающей поверхности рефлектора, а именно: погрешность измерения углового положения рефлектора в базовой СК КА не более 45 угловых секунд и погрешность измерения положения фокуса рефлектора в базовой СК КА не более 14 мм.

КЭ выполнен на базе световозвращающей плёнки алмазного типа космического назначения. Для осуществления измерений КЭ выбран прибор в виде моноблока, устанавливаемый снаружи корпуса КА и функционирующий в условиях космического пространства. В приборе используется матрица, построенная на лавинных фотодиодах (SPAD-матрица). Каждый пиксель матрицы состоит из фотодиода и построенной на КМОП-структуре схемы синхронизации (CMOS-timing).

Общее искажение отражающей поверхности рефлектора на орбите можно представить в виде суммы из трех составляющих:

- смещение рефлектора как жесткого тела;
- искажение поверхности за счет деформаций элементов силового каркаса рефлектора;
- искажение поверхности за счет деформаций формообразующей структуры.

Компенсации отклонения формы поверхности и положения рефлектора с целью обеспечения требуемой диаграммы направленности рефлектора реализуется орбитальной юстировкой рефлектора. Под орбитальной юстировкой понимается набор управляющих воздействий, приводящих текущую геометрию рефлектора к геометрии с требуемыми характеристиками. Орбитальная юстировка может проводиться как однократно, после раскрытия рефлектора, так и периодически, для компенсации отклонений, накопленных вследствие деградации материала, или периодических, вследствие температурных деформаций [4; 5].

Под управлением формой рефлектора понимается совокупность управляющих воздействий УПФР, приводящих форму радиоотражающей поверхности рефлектора к заданной с требуемой точностью. Точность поверхности характеризуется величиной СКО измеренных КТ относительно идеальной поверхности.

Управление формой рефлектора возможно при воздействии либо на элементы его силового каркаса (телескопические спицы), либо на элементы его формообразующей структуры (ФОС), состоящей из симметричных фронтальной и тыльной сетей, соединенных вантами. Осуществление необходимого управления поверхностью рефлектора за счет регулировки спиц является достаточно трудной задачей, так как, воздействуя на одну или несколько спиц, влияние этого воздействия проявляется в других местах поверхности, где корректировка ее формы не нужна. При воздействии на ФОС управление формой представляет собой

точечную регулировку радиоотражающей поверхности рефлектора, которая является более реализуемой и простой в разработке алгоритма управления и в процессе работы.

Наземная отработка раскрытия рефлектора показала, что наибольшие отклонения от теоретической формы поверхности рефлектора наблюдаются в местах, близких к краям рефлектора (в зоне расположения периферийного шнура). Следовательно, наибольший вклад в искажение формы отражающей поверхности рефлектора вносит уменьшение натяжения периферийного шнура фронтальной сети ФОС. Исходя из этого, для возможности управления натяжением периферийного шнура необходимо располагать, как минимум, по одному КЭ в центре каждого сегмента рефлектора возле периферийного шнура.

УПФР имеет следующий состав:

- устройство натяжения периферийного шнура (УНПШ);
- устройство точечной регулировки формы рефлектора (УТРФР).

Основной функцией УНПШ является поддержание формы рефлектора путем натяжения периферийного шнура. Длина и натяжение периферийного шнура определяют форму рефлектора, которая должна оставаться расчётной. Для сохранения требуемой формы шнур должен быть натянут с определенным усилием. УТРФР предназначено для регулировки длин оттяжек ФОС в местах расположения КЭ. Алгоритм работы УНПШ представлен на рис. 2.

Исследование алгоритма управления формой рефлектора проводилось с помощью математического моделирования, которое заключалось в применении управляющих воздействий (ход длин оттяжек шнуров вантовой структуры) на деформированное состояние формы рефлектора с дальнейшей оценкой результатов этих воздействий. Управляющие воздействия определялись как расстояния от КТ до ВП. Затем, если СКО отражающей поверхности рефлектора превышало заданное, проводили повторное управление.

Под управлением положением рефлектора понимается совокупность управляющих воздействий УРПР, приводящих положение рефлектора (угловое и линейное) в его теоретическое положение с заданной точностью. Точность управления положением рефлектора определяется отклонением фокальной оси антенны от своего номинального положения и расстоянием от фокуса до фазового центра облучателя.

Для управления положением рефлектора было рассмотрено несколько вариантов состава УРПР:

- одно двухступенное поворотное устройство (ДПУ);
- одно ДПУ и одно одноступенное поворотное устройство;
- три ДПУ;
- два ДПУ и одно одноступенное линейное устройство;
- шестиступенное устройство (Гексапод) [6].

Пространственное положение рефлектора определяется тремя линейными координатами и тремя угловыми координатами (углами Эйлера). Следовательно, в идеальном случае управление положением рефлек-

тора реализуется по всем шести степеням свободы. В противном случае, как это видно по результатам моделирования, ошибки управления увеличиваются. Каждый вариант состава УРПР имеет то или иное количество степеней свободы относительно своей СК. Определяющей задачей для СН КТА является корректровка угловых и линейных смещений рефлектора, обеспечивающая заданные радиочастотные характеристики (РХ) антенны. Обеспечение РХ осуществляется компенсацией линейных и угловых смещений рефлектора относительно некоторой базовой системы координат КА либо решением задачи минимизации отклонения фокальной оси антенны от ее заданного положения. Состав УРПР зависит от выбора одного из подходов к обеспечению РХ антенны, а также от предъявляемых требований к точности управления пространственным положением рефлектора.

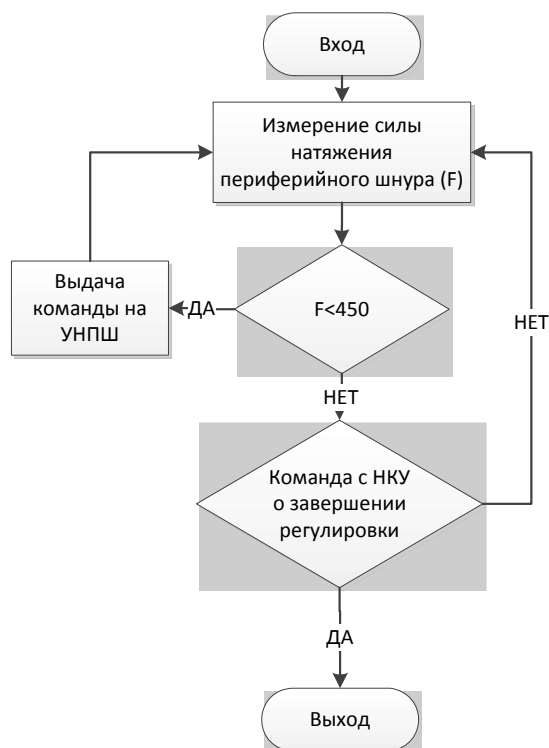


Рис. 2. Алгоритм управления натяжением периферийного шнура

В результате проделанной работы были определены основные подходы и принципы построения СН КТА, а также проработаны варианты ее состава. Кроме того, рассмотрены способы и методы управления геометрией КТА. Проведенный анализ позволяет определить основные технические требования к системе и ее элементам.

Библиографические ссылки

1. Пономарев С. В., Халиманович В. И. Задача компьютерного моделирования при создании крупногабаритных трансформируемых рефлекторов // Фун-

даментальные и прикладные проблемы современной механики : материалы 5 Всерос. науч. конф. (3–5 окт. 2006, г. Томск). С. 38–42.

2. Бушинский В. А., Клишев О. П., Матырев А. И. Исследование влияния упругих колебаний крупногабаритных элементов конструкции космического аппарата на искажение геометрических характеристик рефлектора // Космонавтика и ракетостроение. 2007. № 2. С. 102–108.

3. Выбор приборного состава системы определения геометрии крупногабаритной трансформируемой антенны / Г. П. Титов, М. Г. Матыленко, Е. В. Бикеев, М. О. Дорофеев // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-космич. систем акад. М. Ф. Решетнева (10–12 ноября 2011, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. С. 98–99.

4. Пат. № 2418346. Российская Федерация. Зонтичная антенна космического аппарата / Тестоедов Н. А., Халиманович В. И., Величко А. И. и др. Оpubл. 2009.

5. Пат. № 2370864. Российская Федерация. Зонтичная антенна космического аппарата / Халиманович В. И., Величко А. И., Шипилов Г. В., Романенко А. В. и др. Оpubл. 2008.

6. Пат. № WO2011089198. Шестистержневая конструкция / Патентообладатель SCHWAB MARTIN (Германия).

References

1. Ponomarev S. V., Khalimanovich V. I. *Materialy 5 Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii: Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoy mekhaniki* (In Proc. Of the 5th All-Russian conference: Fundamental and practical issues of modern mechanics). Tomsk, 3–5 Oct, 2006. p. 38–42.

2. Bushinskiy V. A., Klishev O. P., Matyrev A. I. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2007, no. 2, p. 102–108.

3. Titov G. P., Matylenko M. G., Bikeev E. V., Dorofeev M. O. *Reshetnevskie chteniya: materialy XV Mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pamyati gener. konstruktora raket.-kosmich. sistem akad. M. F. Reshetneva* (In proc. of the 15th international scientific conference “Reshetnevskie chteniya”). Krasnoyarsk, 10–12 of Nov., 2011, p. 98–99.

4. Testoev N. A., Khalimanovich V. I., Velichko A. I., Lekanov A. V., Shipilov G. V. *Zontichnaya antenna kosmicheskogo apparata* [Umbrella antenna spacecraft]. Patent RF, no. 2418346, 2009.

5. Khalimanovich V. I., Velichko A. I., Shipilov G. V., Romanenko A. V. et al. *Zontichnaya antenna kosmicheskogo apparata* [Umbrella antenna spacecraft]. Patent RF, no. 2370864, 2008.

6. SCHWAB MARTIN, Patent WO2011089198.

© Алексеенко А. А., Бикеев Е. В., Дорофеев М. О., Лукьяненко М. В., Матыленко М. Г., 2014

УДК 621.182.233

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА РАСХОДА НА ЕГО СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Е. Н. Беляев¹, А. И. Коломенцев¹, Л. Б. Насименто², В. П. Назаров³

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Российская Федерация, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4.
E-mail: kaf202@mai.ru

²Технологический институт аэронавтики
Бразилия, 12228-900, г. Сан-Жозе-дос-Кампос, пл. Маршала Эдуардо Гомеса, 50. E-mail: ips@ita.br
³Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: dla@sibsau.ru

Статья посвящена теоретическому анализу влияния геометрических и механических параметров регуляторов расхода прямого действия, применяемых в ЖРД, на их статические и динамические характеристики. Исследование проведено с помощью математической модели в сосредоточенных параметрах. Показано, что расширению области по перепаду давления на регуляторе расхода, в которой регулятор обладает положительным статизмом, способствует треугольная форма золотниковых отверстий, что особенно важно для многорежимных ЖРД. При такой форме золотниковых отверстий гидродинамическая сила, зависящая от величины расхода и перепада давления на этих отверстиях, толщины кромки золотника, оказывает меньшее влияние на статизм регулятора. Динамические свойства регулятора расхода, установленного в технической системе, во многом определяются площадями золотника и демпфирующих отверстий.

Ключевые слова: регулятор, статизм, гидродинамическая сила, золотник.

INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS OF A FLOW REGULATOR ON ITS STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS

E. N. Beliaev¹, A. I. Kolomentsev¹, L. B. Nascimento², V. P. Nasarov³

¹Moscow Aviation Institute (national research university)
4, Volokolamskoe sh., Moscow, 125993, Russian Federation
E-mail: kaf202@mai.ru

²Technological Institute of Aeronautics
50, Marechal Eduardo Gomes sq., Sao Jose dos Campos, 12228-900, Brazil
E-mail: ips@ita.br

³Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation, E-mail: dla@sibsau.ru

This article is dedicated to a theoretical analysis of the influence of geometrical and mechanical parameters of the direct action flow regulator used in LRE on its static and dynamic characteristics. The investigation was conducted using a lumped-parameter mathematical model. It was showed, that the region dependently of the pressure drop in flow regulator, which the static characteristic is positive, is expanded when using the triangular geometry for the orifices of regulation, which is very important, specially, for multi-regimes LRE. For this geometric form orifice, the hydraulic force, which depends of the flow rate and the pressure drop in these orifices, and the thickness of the slide valve, have less influence in the positive behavior of the static characteristic of the regulator. The dynamic characteristics of the flow regulator, calculated in the technical system, are widely defined by the area of the piston and the area of the damping orifices.

Keywords: regulator, static characteristic, hydraulic force, slide valve.

Регуляторы расхода, применяемые в ЖРД, разделяются на регуляторы прямого и непрямого действия. В современных ЖРД широкое применение нашли регуляторы расхода прямого действия. Они используются для поддержания, как в двигателях РД253 и РД120, или для контролируемого изменения расхода, как в двигателях РД170, РД180, РД191, в каналах управления их тягой. В некоторых случаях они ис-

пользуются как стабилизаторы расхода. Так, в двигателе РД301 установлены два регулятора, один из них – в канале управления тягой, а второй выполняет функции стабилизатора расхода. Он установлен в магистрали на входе в тракт охлаждения камеры сгорания (КС) и после запуска двигателя вследствие прогрева компонента топлива в рубашке охлаждения КС происходит увеличение гидравлических потерь давления

в ней. По мере их увеличения происходит перераспределение перепада давления между регулятором расхода и трактом охлаждения КС, и таким образом происходит сохранение необходимой величины расхода компонента топлива для охлаждения КС.

Исследованию работы регуляторов расхода посвящено немного работ, среди них следует выделить работы [1–6]. В этих работах приводятся общие данные по регуляторам прямого действия, рассматриваются их статические и динамические характеристики, приводятся основные уравнения, описывающие динамику работы регуляторов, но в них не показано влияние основных конструктивных параметров на статические и динамические характеристики регуляторов. В данной статье на примере малорасходного регулятора представлено влияние основных конструктивных параметров на его статические и динамические характеристики.

На рис. 1 приведена схема регулятора прямого действия, а на рис. 2 и 3 приведены его статические характеристики. Основные конструктивные характеристики этого регулятора расхода следующие:

- площадь золотника $5,0 \text{ см}^2$;
- жесткость пружины $20,0 \text{ кг/см}$;
- площадь демпфирующих отверстий $0,0353 \text{ см}^2$;
- форма золотниковых отверстий треугольник ;
- толщина кромки золотника $0,06 \text{ см}$.

Номинальная величина расхода через регулятор составляет $\sim 0,6 \text{ кг/с}$ при перепаде давления на нём $2,5 \text{ МПа}$.

Современные ЖРД, как правило, многорежимные, поэтому очень важно, чтобы регулятор расхода обладал статическими и динамическими характеристиками, обеспечивающими устойчивую работу двигателя в широком диапазоне изменения его параметров с заданной точностью.

Система уравнений, описывающая работу регулятора расхода, достаточно подробно изложена в [1–3; 5]. При исследовании влияния геометрических параметров регулятора расхода на его статические и динамические характеристики использована математическая модель, изложенная в [1].

Основным уравнением регулятора расхода, описывающим его работу, является уравнение перемещения золотника, которое записывается в следующем виде:

$$m_{\text{пр}} \cdot d^2 h / dt^2 + R_{\text{пр}} \cdot dh / dt + K_{\text{пру}} \cdot h = F_1(p_1 - p_2) - P_{\text{пру}} + P_{\text{гд}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса; $R_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент трения; $K_{\text{пру}}$ – жесткость пружины; F_1 – площадь золотника; $P_{\text{пру}}$ – усилие предварительного натяжения пружины; $P_{\text{гд}}$ – гидродинамическая сила; p_1 – давление на входе регулятора; p_2 – давление внутри регулятора; h – ход золотника.

Это уравнение устанавливает баланс сил, действующих на золотник. Из этого уравнения следует, что наряду с влиянием площади золотника, жесткости пружины, приведенных перемещаемой массы и коэффициента трения, определенный вклад в баланс сил вносит гидродинамическая сила. Эта сила связана с падением давления в золотниковых отверстиях ни-

же, чем давление во внутренней полости регулятора p_2 . В результате чего появляется сила (названная гидродинамической), направленная в сторону закрытия золотниковых отверстий.

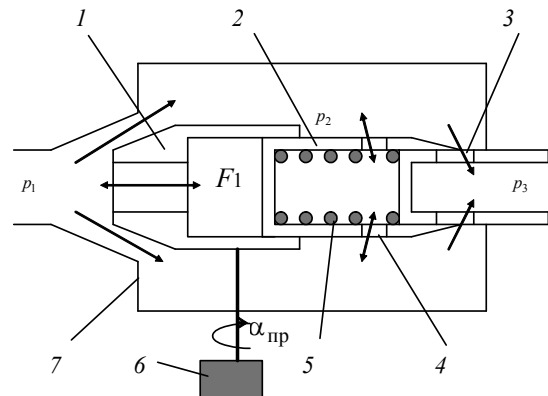


Рис. 1. Схема регулятора расхода:
1 – дроссель регулятора; 2 – золотник; 3 – перекрываемые золотником отверстия; 4 – демпфирующие отверстия; 5 – пружина; 6 – привод дросселя; 7 – корпус; p_1 – давление на входе регулятора; p_2 – давление внутри регулятора; p_3 – давление на выходе регулятора; F_1 – площадь золотника; $\alpha_{\text{пр}}$ – угол привода дросселя

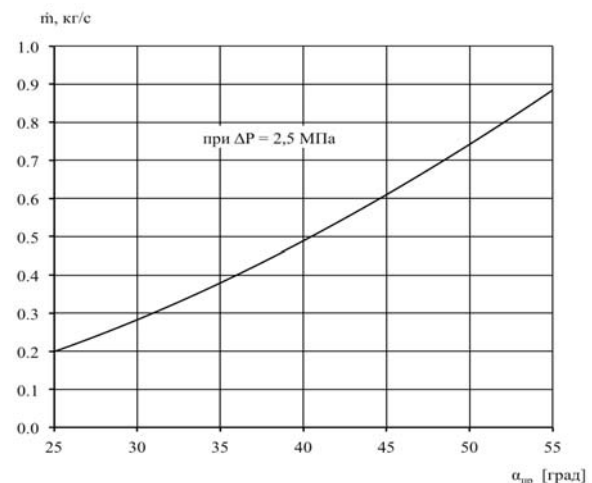


Рис. 2. Настроенная характеристика

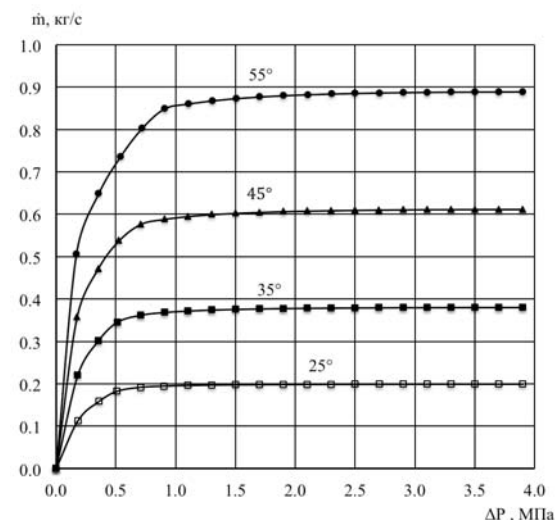


Рис. 3. Нагрузочная характеристика

На рис. 4 приведено изменение проходной площади золотниковых отверстий ($F_{\text{зол}}$) от перемещения золотника при различной форме отверстий. Суммарная проходная площадь золотниковых отверстий и ход золотника для всех форм одинаков.

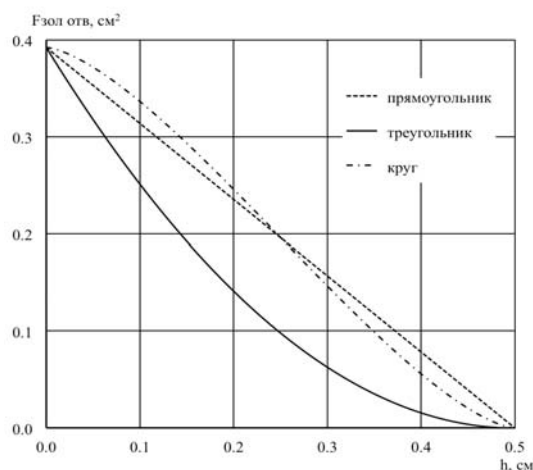


Рис. 4. Зависимость площади золотниковых отверстий при их различной форме от перемещения золотника

Нагрузочная характеристика регулятора расхода при разных формах золотниковых отверстий представлена на рис. 5. Расход через регулятор на этом рисунке приведен в разных масштабах ($\dot{m}_1$ от 0,595 до 0,62 кг/с, а $\dot{m}_2$ от 0 до 0,7 кг/с) для сравнения и детального рассмотрения нагрузочной характеристики, так как при гидравлических испытаниях регулятора сложно, а чаще и невозможно обеспечить необходимую точность экспериментального определения расхода для таких малорасходных регуляторов.

На рис. 5 видно, что при треугольной форме золотниковых отверстий диапазон перепада давления, в котором нагрузочная характеристика имеет положительный статизм, значительно шире по сравнению с круглыми и прямоугольными отверстиями. Как известно, наличие отрицательного статизма, когда с увеличением перепада давления на регуляторе расход через него уменьшается, может быть причиной неустойчивой работы двигателя [3].

Поэтому на всех последних современных ЖРД при проектировании регуляторов расхода выбирают форму золотниковых отверстий треугольную.

На рис. 6 приведена нагрузочная характеристика регулятора расхода и зависимость гидродинамической силы, действующей на кромку золотника при различной её толщине. На этом рисунке видно, что с уменьшением толщины кромки золотника расширяется диапазон перепада давления, в котором статизм регулятора положителен, что напрямую связано с величиной гидродинамической силы.

Величина этой силы зависит от толщины кромки золотника, перепада давления на золотниковых отверстиях и расхода компонента через регулятор. Два последних обстоятельства характеризуют величину скорости потока в золотниковых отверстиях, а следова-

тельно, и разницу между давлением внутри регулятора p_2 и давлением, действующим на кромку золотника.

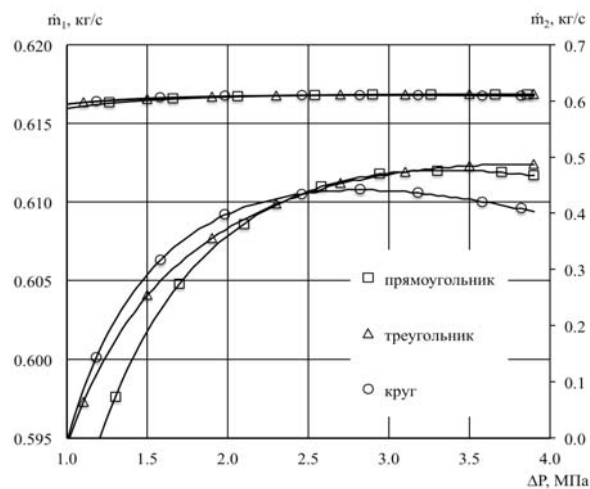


Рис. 5. Нагрузочная характеристика регулятора при различных формах золотниковых отверстий

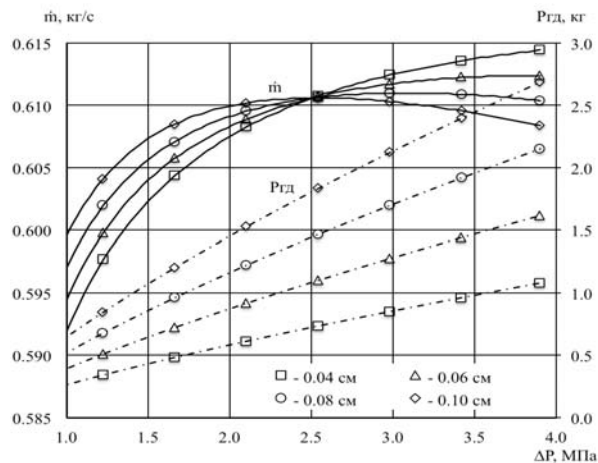


Рис. 6. Нагрузочная характеристика регулятора и зависимость гидродинамической силы при разной толщине кромки золотника

Чаще всего отрицательный статизм у регулятора расхода проявляется при одновременной реализации большого перепада давления на регуляторе в сочетании с большим расходом компонента топлива через регулятор (правый верхний угол на нагрузочной характеристике регулятора, рис. 3).

При небольших перепадах давления на золотниковых отверстиях кромка самого золотника, перекрывающего эти отверстия, может быть выполнена очень тонкой. Толщина кромки лимитируется её прочностными свойствами.

На рис. 7 приведена нагрузочная характеристика регулятора расхода при различной площади золотника. Из этого рисунка видно, что с увеличением площади золотника диапазон перепада давления, в котором нагрузочная характеристика приближается к горизонтальной, расширяется. Следует отметить, что с увеличением площади золотника увеличиваются габариты регулятора и его масса.

На рис. 8 приведена нагрузочная характеристика регулятора расхода при различной жесткости пружины.

Жесткость пружина довольно сильно влияет на нагрузочную характеристику регулятора. При меньшей жесткости пружины регулятор начинает поддерживать расход с меньшего перепада давления на нём, нагрузочная характеристика приближается к горизонтальной, но при этом появляется отрицательный статизм.

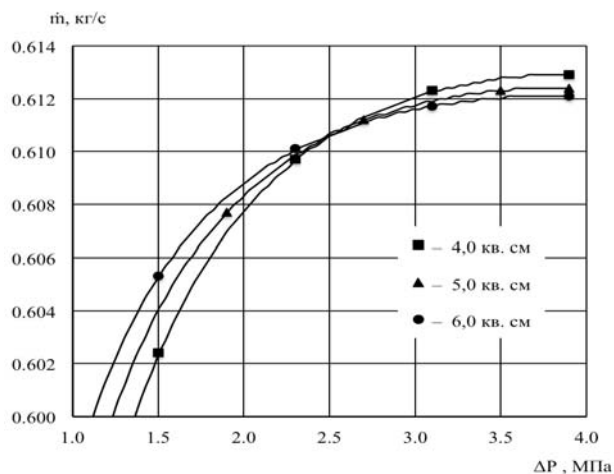


Рис. 7. Нагрузочная характеристика регулятора расхода при различной площади золотника

В динамике регулятор расхода может поддерживать заданную величину расхода при относительно медленных возмущениях давления как на входе, так и на его выходе. В качестве критерия, характеризующего динамические свойства регулятора расхода, можно рассматривать отношение величины приращения давления на выходе из регулятора к величине приращения возмущающего воздействия давления на его входе (коэффициент усиления регулятора расхода). При проведении исследований на входе в регулятор расхода задавались синусоидальные колебания давления с различными частотами и амплитудой 0,1 МПа.

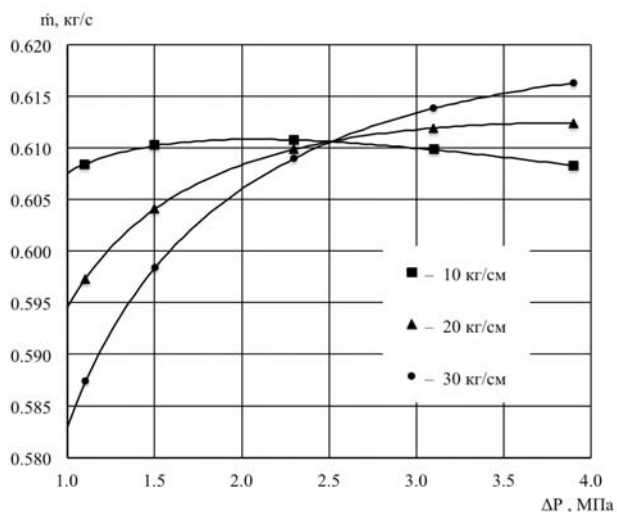


Рис. 8. Нагрузочная характеристика регулятора расхода при разной жесткости пружины

В данной статье приведены результаты исследования динамики регулятора в области частот от 0 до 20 Гц, так как система уравнений с сосредоточенными параметрами, которая использовалась при проведении исследований, не позволяет проанализировать более высокую область частот [2; 6].

На рис. 9 показано изменение коэффициента усиления регулятора при введении синусоидальных возмущений различной частоты на его входе при разной площади золотника.

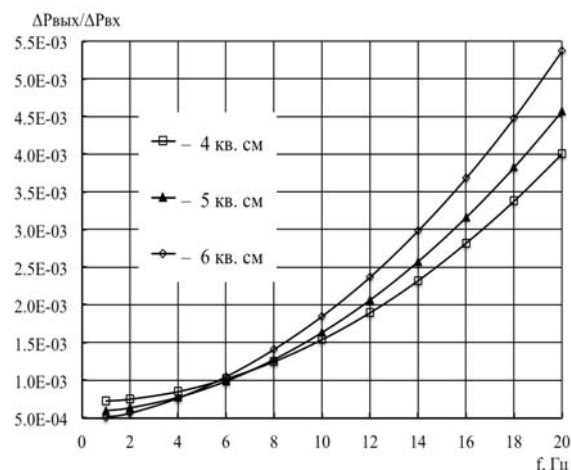


Рис. 9. Влияние площади золотника на коэффициент усиления регулятора расхода

Площадь золотника достаточно сильно влияет на коэффициент усиления регулятора расхода, так как при увеличении площади золотника возрастает сила, воздействующая на золотник, направленная на перемещение золотника в новое положение, которое обеспечивает стабилизацию расхода на исходном уровне. Вместе с тем увеличение площади золотника приводит к увеличению приведенных перемещаемой массы и коэффициента трения [3], а это, в свою очередь, снижает быстродействие регулятора.

На рис. 10 приведено влияние площади демпфирующих отверстий на коэффициент усиления регулятора расхода на разных частотах.

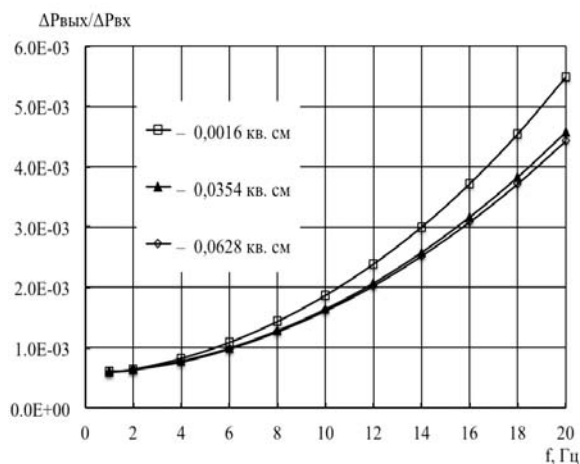


Рис. 10. Влияние площади демпфирующих отверстий на коэффициент усиления регулятора

Само название этих отверстий говорит о их роли в регуляторе. На статические характеристики регулятора эти отверстия влияния не оказывают. Они влияют на скорость перемещения золотника при возникновении возмущений, и при их определённой величине они выполняют стабилизирующую роль в динамике поддержания расхода в системе, в которой установлен регулятор расхода.

На представленном рисунке видно, что если площадь демпфирующих отверстий очень маленькая, то золотник перемещается медленно (гидравлический катаракт) и не успевает в полной мере парировать входящие возмущения. В то же время, начиная с определённой площади демпфирующих отверстий, их эффективность уменьшается.

Следует отметить, что при уменьшении площади демпфирующих отверстий возрастают приведенные перемещаемая масса и коэффициент трения, которые, так же как и увеличение площади золотника, приводят к уменьшению быстродействия регулятора расхода.

Проведенными исследованиями показано, что получение нагрузочной характеристики регулятора расхода с положительным статизмом в области заданного рабочего перепада давлений возможно при определенном сочетании его основных конструктивных параметров.

Впервые подтверждено теоретически, что расширению области по перепаду давления, в которой статизм регулятора будет положительным, способствует треугольная форма золотниковых отверстий. Это позволяет ЖРД работать в более широком диапазоне изменения их тяги.

Динамические свойства регулятора расхода, установленного в технической системе, во многом определяются соотношением между площадью золотника и площадью его демпфирующих отверстий.

Библиографические ссылки

1. Беляев Е. Н., Черваков В. В. Математическое моделирование ЖРД. М. : Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. 280 с.
2. Беляев Е. Н., Чванов В. К., Черваков В. В. Математическое моделирование рабочего процесса жид-

костных ракетных двигателей : учебник / под ред. В. К. Чванова. М. : Изд-во МАИ, 1999. 228 с.

3. Гликман Б. Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1974. 396 с.

4. Зенин Е. С., Меньшикова О. М., Федотчев В. А. Математическое моделирование регуляторов ЖРД // Полет. 2013. № 5. С. 20–24.

5. Е. В. Лебединский [и др.]. Компьютерные модели жидкостных ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 2009. 375 с.

6. Шевяков А. А. [и др.]. Автоматическое управление ракетными двигателями. М. : Машиностроение, 1978. 290 с.

References

1. Belyaev E. N., Chervakov V. V. *Matematicheskoe modelirovanie ZhRD* (Mathematical modeling of LPRE). Moscow, MAI-PRINT Publ., 2009, 280 p.
2. Belyaev E. N., Chvanov V. K., Chervakov V. V. *Matematicheskoe modelirovanie rabocheho processa zhidkostnyh raketnyh dvigatej* (Mathematical modeling of the work process in liquid-propellant rocket engine), edited V. K. Chvanova. Moscow, MAI Publ., 1999, 228 p.
3. Glikman B. F. *Avtomaticheskoe regulirovanie zhidkostnyh raketnyh dvigatelej* (Automatic regulation of liquid-propellant rocket engine). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 396 p.
4. Zenin E. S., Men'shikova O. M., Fedotchev V. A. [Mathematical model of regulators of LPRE]. *Polet*. 2013, no. 5, p. 20–24.
5. Lebedinsky E. V., Mosolov S. V., Kalmykov G. P. et al. *Komp'yuternye modeli zhidkostnyh raketnyh dvigatelej* (Computer models of liquid-propellant rocket engine). Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 375 p.
6. Sheviakov A. A., Kalnin V. M., Naumenkova N. V. et al. *Avtomaticheskoe upravlenie raketnymi dvigatejami* (Automatic control of rocket engines). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 290 p.

© Беляев Е. Н., Коломенцев А. И.,
Насименто Л. Б., Назаров В. П., 2014

УДК 621.3.019.3

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ОБЖИМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

И. С. Васильев¹, С. Б. Сунцов¹, С. В. Ефремов¹, В. С. Ким²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: vasilyev_is@sibmail.com

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30. E-mail: kim_vs@rambler.ru

В ходе испытаний обжимных электрических соединений получен ряд характеристик. На основе результатов испытаний выполнен расчет переходного электрического сопротивления нового типа электрических соединительных элементов бортовой кабельной сети современных космических аппаратов. Проведен учет причин возникновения переходного сопротивления для реальных конструкций обжимных соединительных элементов. Результаты расчета сравнены с данными измерений переходных сопротивлений. Предлагается использовать полученные данные для построения модели старения обжимных электрических контактов, применимой к новым конструктивным решениям.

Ключевые слова: испытания, обжимные электрические соединения, бортовая кабельная сеть, надежность, полуэмпирическая модель.

TESTING OF CRIMPED ELECTRIC CONNECTIONS IN ON-BOARD DC HARNESS OF SPACECRAFT FOR DETERMINATION OF THEIR PROPERTIES

I. S. Vasilyev¹, S. B. Suntsov¹, S. V. Efremov¹, V. S. Kim²

¹ JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation
E-mail: vasilyev_is@sibmail.com

²Tomsk National Research Polytechnic University
30, Lenin Av., Tomsk, 634050, Russian Federation E-mail: kim_vs@rambler.ru

Some performances have been obtained as the result of testing of crimped electrical connections. On the basis of test results performance calculate transient electrical resistance of the new type of electric connection items implemented in on-board DC harness of modern spacecrafts. The causes of appearance of transient resistance in actual designs of crimped connection items were taken into account. The calculation results are compared to the transient resistance measurements. It is proposed to use the obtained data when building a model of crimped electrical connections ageing, applicable to new design solutions.

Keywords: tests, crimped electrical connections, on-board DC harness, reliability, semiempirical model.

Проведение испытаний технического устройства является обязательной частью процесса изготовления продукции. Испытания можно разделить на несколько основных групп [1]:

- предварительные испытания;
- предъявительские испытания;
- приемосдаточные испытания;
- периодические испытания;
- типовые испытания.

Все испытания учитывают влияние внешних воздействующих факторов (ВВФ) и включают ряд методов контроля, направленных на мониторинг изменения характеристик. Проведение испытаний позволяет подтвердить соответствие качества изготавливаемой продукции и допустить ее дальнейшую эксплуатацию. Для вновь разрабатываемых изделий, а также

при необходимости эксплуатации в более жестких условиях, проводят дополнительный вид испытаний на определение надежности изделия. Эти испытания более длительны по времени и требуют большего объема выборки испытываемых образцов. Они позволяют определить максимальный ресурс изделия и свести к минимуму вероятность возникновения нештатных ситуаций в пределах срока активного существования (САС). Особое значение такие испытания приобретают в случае штучных или мелкосерийных изделий, к которым относятся изделия космического назначения. В отличие от других видов испытаний, испытание на надежность является разовым, но его результаты распространяются на все изделия данного конструктивного исполнения.

В настоящее время ОАО «ИСС» является лидером в России по объему и качеству изготавливаемых космических аппаратов (КА). Достижение такого высокого результата возможно лишь при комплексном подходе к проектированию, изготовлению и испытанию продукции. На протяжении многих лет в ОАО «ИСС» постоянно проводятся испытания изделий и материалов с целью определения как качества изготовленной продукции, так и степени изменений в материалах, используемых при изготовлении КА под воздействием ВВФ. Существенное место в обеспечении длительного САС КА занимают испытания на надежность как отдельных элементов, так и целых блоков каждого изделия.

КА является сложным многокомпонентным техническим устройством, включающим множество систем. Одной из таких систем является бортовая кабельная сеть (БКС) КА, которая выполняет связующую функцию между бортовыми системами, обеспечивая электропитание и обмен информацией. Фактически, обеспечение надежности БКС является базовым фактором для обеспечения штатного функционирования всего КА. В свою очередь, надежность функционирования БКС зависит от надежности всех ее элементов, среди которых наиболее уязвимыми являются электрические соединители.

В начале 2000-х гг. ОАО «ИСС» одним из первых в России применило новый тип электрических соединителей с извлекаемыми обжимными контактами и обжимные срутки в БКС КА. Это позволило повысить технологичность производства и сократить время изготовления БКС. При заданных условиях эксплуатации надежность данных обжимных элементов обеспечивает САС не менее 15 лет. К сожалению, период летной эксплуатации обжимных соединительных элементов пока недостаточен для того, чтобы на его основе сделать вывод об их реальном максимальном ресурсе. С целью оценки реального ресурса новых соединительных элементов и возможности применения их в более жестких условиях, в ОАО «ИСС» проводятся сравнительные испытания на старение обжимных и традиционных паяных соединений. Эти испытания позволяют также собрать данные, необходимые для построения полуэмпирической модели, применимой к новым конструктивным решениям. В данной работе представлены результаты теоретического

описания характеристик обжимных контактов в сравнении с данными экспериментальных измерений.

При изготовлении обжимных соединений проводятся контрольные испытания на падение напряжения, на прочность при растяжении и металлографическое исследование [2].

Результаты данных испытаний для 6 различных образцов обжимных соединений приведены в табл. 1 [3]. Результаты испытаний механических и электрических характеристик показывают, что обжимные соединения полностью удовлетворяют существующим требованиям [2].

Расчет переходного сопротивления обжимного контакта. Одной из основных характеристик электрического контакта является величина переходного сопротивления. Проведем расчет исходного переходного сопротивления, учитывающий реальные условия изготовления обжимных соединений. Такой расчет необходим для задания начальных условий при моделировании изменения переходного сопротивления контактов под воздействием условий эксплуатации.

Рассчитаем необходимую величину усилия обжатия P_k [4], которая соответствует номерам позиции ручки переключателя обжимного инструмента и геометрическим параметрам обжимаемых материалов:

$$P_k = 1,05 \cdot \sigma_s \cdot \left[1 + \frac{1}{3} \cdot f \cdot \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{d} \right) \cdot l_0 \right] = 1078 \text{ Н/мм}^2, \quad (1)$$

где σ_s – предел текучести, МПа (для медного сплава $\sigma_s = 340$ МПа [5]); f – коэффициент сухого трения (для медного сплава $f = 1,35$ [6]); l_0 – длина области хвостовика контакта, мм, на которую рабочей частью обжимной матрицы прикладывается обжимное усилие ($l_0 = 1,9$ мм); d – внешний диаметр хвостовика контакта, мм ($d = 1,73$ мм [7]); S – толщина стенки хвостовика контакта, мм ($S = 0,53$ мм, определяется согласно [7]).

Обжимной инструмент создает обжимное усилие одновременно в 8 точках в 4 областях по периметру хвостовика контакта в соответствии с рис. 1, где 1 – это электрический контакт соединителя; 2 – токопроводящие жилы обжимаемого провода; 3 – контрольное отверстие; 4 – изоляция провода; l_0 – длина участка хвостовика контакта, на которое прикладывается обжимное усилие; l_{np} – длина участка, с которого происходит контрольное измерение падения напряжения согласно [2].

Таблица 1

Результаты контрольных испытаний для образцов обжимных контактов соединителей

№ образца	Падение напряжения в образцах, мВ	Величина испытательного тока, А [2]	Продольное усилие, Н	Металлография
	Не более 4 мВ [2]		Не менее 45 Н [2]	Степень пустот не более 10 % [2]
1	1,4	5	54,63	–
2	1,7	5	53,29	–
3	2,1	5	52,00	–
4	1,8	5	–	3,55
5	1,4	5	–	6,4
6	2,0	5	–	4,4

Известно [8], что электрический ток протекает в зоне контакта не по всей кажущейся площади контакта, а через так называемые области а-пятен, являющихся точками непосредственного металлического контакта двух поверхностей и имеющих величину электрического сопротивления стягивания R_c . Теоретически переходное электрическое сопротивление $R_{пер}$ в области обжатия можно представить как сумму параллельных сопротивлений стягивания R_c n -го числа а-пятен (рис. 2).

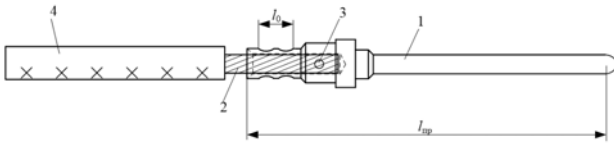


Рис. 1

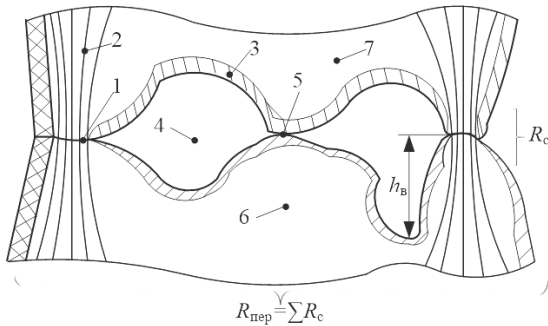


Рис. 2

На рис. 2: 1 – это области а-пятен с непосредственным металлическим контактом, имеющие сопротивление стягивания; 2 – линии тока; 3 – поверхностная окисная пленка; 4 – области отсутствия контакта; 5 – области квазиметаллического контакта; 6 – металл токопроводящей жилы; 7 – металл хвостовика контакта; h_b – максимальная теоретическая высота микровыступов контактных поверхностей.

Рассчитаем характеристики контактирующих поверхностей. Известно, что общее сопротивление электрического контакта $R_{к.общ}$ является суммой двух сопротивлений [9]:

– собственное электрическое сопротивление $R_{l,пр}$ соединяемых материалов, измеренное на длине $l_{пр}$, соответствующей требованиям [2];

– сопротивление $R_{пер}$ в зоне перехода «хвостовик контакта – обжимаемый провод», которое представляет собой сумму сопротивлений стягивания R_c .

Величину $R_{к.общ}$ можно определить из закона Ома, зная падение напряжения и испытательный ток (см. табл. 1). Теоретическое сопротивление на длине измеряемого участка $R_{l,пр}$ рассчитаем, зная геометрические параметры обжимаемых контактов и проводов. Величину $R_{пер}$ найдем как разницу $R_{к.общ}$ и $R_{l,пр}$. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Так как $R_{пер}$ фактически представляет собой сумму параллельных сопротивлений стягивания R_c , соответственно, зная величину давления F_k [МПа/мм²], полученную после преобразования обжимного усилия P_k

из (1) и используя значение твердости по Бринеллю медного сплава в МПа/мм², можно рассчитать теоретическое количество точек а-пятен в области обжатия [10]:

$$R_{пер} = \sum R_c = \frac{\rho \cdot k}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot HB}{N \cdot F_k}} \text{ [Ом]}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление меди, Ом·м ($\rho = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м); k – коэффициент преобразования удельного сопротивления для медного проводника сечением 1 мм² ($k = 10^6$); HB – твердость медного сплава по Бринеллю.

Таблица 2

Результаты расчета электрических сопротивлений обжимных контактов соединителей

№ образца	Величина сопротивления $R_{к.общ}$, Ом	Расчетная величина сопротивления $R_{l,пр}$, Ом	Переходное сопротивление i -контакта $R_{пер}$, Ом
1	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$
2	$3,4 \cdot 10^{-4}$		$2,37 \cdot 10^{-4}$
3	$4,2 \cdot 10^{-4}$		$3,17 \cdot 10^{-4}$
4	$3,6 \cdot 10^{-4}$		$2,57 \cdot 10^{-4}$
5	$2,8 \cdot 10^{-4}$		$1,77 \cdot 10^{-4}$
6	$4,0 \cdot 10^{-4}$		$2,97 \cdot 10^{-4}$

Из (2) найдем число а-пятен в области обжатия N :

$$N = \frac{\pi \cdot k \cdot \rho^2 \cdot HB}{4 \cdot R_{пер}^2 \cdot F_k}. \quad (3)$$

Согласно [10], выражение (3) можно представить в виде

$$R_{пер} = \frac{\rho \cdot k}{2 \cdot N \cdot a_n} \text{ [Ом]}. \quad (4)$$

Тогда теоретический средний радиус а-пятна в области обжатия a_n

$$a_n = \frac{\rho \cdot k}{2 \cdot N \cdot R_{пер}} \text{ [мм]}. \quad (5)$$

Используя выражение (4), определим среднюю величину сопротивления стягивания R_c одного а-пятна для i -го образца контакта:

$$R_c = \frac{\rho \cdot k}{2 \cdot a_n} \text{ [Ом]}. \quad (6)$$

Согласно [9], для $R_{пер}$ можно записать:

$$R_{пер} = \frac{0,12 \cdot \rho \cdot k \cdot E \cdot h_b}{P_k \cdot (1 - \mu)} \text{ [Ом]}, \quad (7)$$

откуда можно определить среднюю высоту h_b микровыступов на контактной поверхности:

$$h_b = \frac{R_{пер} \cdot P_k \cdot (1 - \mu)}{0,12 \cdot \rho \cdot k \cdot E} \text{ [мм]}, \quad (8)$$

где E – модуль упругости, ГПа (для медного сплава $E = 120$ ГПа [5]); P_k – прилагаемое обжимное усилие, Н/мм²; μ – коэффициент Пуассона (для медного сплава $\mu = 0,34$ [5]).

Результаты расчетов теоретических параметров а-пятен в области обжатия для 6 образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета характеристик контактной поверхности обжимных контактов соединителей

№ образца	Количество а-пятен	Средний радиус а-пятен, мм	Средняя площадь а-пятна, мм ²	Сопротивление стягивания R_c одного а-пятна, Ом	Средняя высота микровыступов h_v , мм
1	2341	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,355 \cdot 10^{-3}$	0,415	$5,0 \cdot 10^{-4}$
2	1306	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,427 \cdot 10^{-3}$	0,310	$6,7 \cdot 10^{-4}$
3	730	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$4,340 \cdot 10^{-3}$	0,232	$8,9 \cdot 10^{-4}$
4	1111	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,854 \cdot 10^{-3}$	0,286	$7,3 \cdot 10^{-4}$
5	2341	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,355 \cdot 10^{-3}$	0,415	$5,0 \cdot 10^{-4}$
6	832	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$3,810 \cdot 10^{-3}$	0,248	$8,4 \cdot 10^{-4}$

Таблица 4

Величина электрического сопротивления обжимных сростков $R_{к.общ}$ в зависимости от числа термоциклов

№ образца	$R_{к.общ}$, Ом							$R_{к.общ}$, %, на 622 цикле к циклу 0
	Цикл 0	Цикл 103	Цикл 209	Цикл 300	Цикл 404	Цикл 531	Цикл 622	
Ср1	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-4}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$4,45 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	-0,930
Ср2	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$4,361 \cdot 10^{-4}$	$4,359 \cdot 10^{-4}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$4,35 \cdot 10^{-4}$	$4,35 \cdot 10^{-4}$	-0,685
Ср3	$4,34 \cdot 10^{-4}$	$4,312 \cdot 10^{-4}$	$4,308 \cdot 10^{-4}$	$4,314 \cdot 10^{-4}$	$4,34 \cdot 10^{-4}$	$4,30 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^{-4}$	-1,15
Ср4	$4,31 \cdot 10^{-4}$	$4,27 \cdot 10^{-4}$	$4,26 \cdot 10^{-4}$	$4,27 \cdot 10^{-4}$	$4,28 \cdot 10^{-4}$	$4,28 \cdot 10^{-4}$	$4,25 \cdot 10^{-4}$	-1,39
Ср5	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-4}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,37 \cdot 10^{-4}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$	$4,36 \cdot 10^{-4}$	-1,13

Измерение электрического сопротивления обжимных контактов. В ОАО «ИСС» проводятся испытания обжимных сростков, соединяющих провода в кабелях-типопредставителях, с целью определения допустимых условий их эксплуатации при максимально возможном САС. Испытания на надежность направлены на контроль изменения электрического сопротивления в области обжатия сростка и провода. Условия эксплуатации имитируются термоциклированием в термовакuumной камере в диапазоне квалификационных температур от -110 до $+120$ °С при давлении 10^{-5} Па. Образцы обжимных сростков постоянно находятся под токовой нагрузкой. В настоящее время проведено 622 цикла изменения температуры. Контроль изменения электрических характеристик производился примерно через 100 термоциклов. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Для наглядности средние значения электрического сопротивления $R_{к.общ}$ испытуемых образцов представлены в виде графиков. Пример графика зависимости электрического сопротивления $R_{к.общ}$ по 5 образцам от количества термоциклов показан на рис. 3.

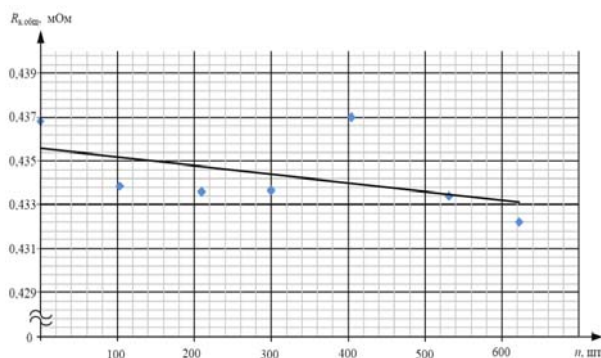


Рис. 3

Как видно из табл. 4, среднее уменьшение контактного сопротивления в образцах по итогам проведенного этапа испытаний составило порядка 1 %, что указывает на высокую устойчивость обжимных электрических соединений к воздействию знакопеременных температур в условиях вакуума в течение длительного времени.

Результаты контрольных операций по определению механических и электрических характеристик обжимных электрических контактов показывают, что обжимные соединения полностью удовлетворяют существующим требованиям [2]. Испытания обжимных электрических контактов в условиях, приближенных к условиям эксплуатации, показали устойчивость характеристик контактной области обжимных сростков к влиянию внешних факторов.

Результаты расчета сопротивления обжимного контакта находятся в качественном согласии с данными измерений и в пределах одного порядка значений. Необходимо отметить, что отличия (менее 30 %) расчетных значений $R_{к.общ}$ для разных образцов в табл. 2 обусловлены различием конструкционного исполнения соединительных элементов, допусками в длине $\Delta l_{пр} = (\pm 3-5)$ мм, с которой происходит измерение падения напряжения, разным типом обжимаемых проводов, величина поперечного сечения которых отличается в два раза. В табл. 4 приведены измеренные значения $R_{к.общ}$ для образцов обжимных сростков и проводов одного типа и сечения. Как видно из табл. 4, разброс значений $R_{к.общ}$ до старения (цикл 0) между образцами не более 3 %.

В целом можно констатировать, что результаты расчета неплохо согласуются с измерениями величины $R_{к.общ}$. Измеренные значения в табл. 4 систематически завышены по сравнению с расчетными в табл. 2 в пределах 50 %. Это может быть вызвано тем, что в расчете не учитывается влияние оксидных пленок

и структурных изменений токопроводящего металла при обжимке на величину сопротивления. Таким образом, для повышения точности модели необходимо учитывать структурные и геометрические параметры обжимных соединений.

Результаты расчета количества контактных точек, средней площади а-пятен и сопротивления стягивания R_c а-пятна в области обжатия отражают состояние обжимных соединительных элементов на стадии изготовления. Для построения модели изменения характеристик контакта необходимо провести расчет изменения площади а-пятен в ходе эксплуатации. Такая модель позволит прогнозировать изменение переходного сопротивления новых конструктивных решений обжимных соединений, выполненных из различных металлов, и оценивать их максимально возможный ресурс с меньшими экономическими затратами.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ РВ 15.307-2002. Система разработки и постановки на производство. Военная техника. Испытания и приемка серийных изделий. Основные положения. 2004. 32 с.
2. ECSS-Q-ST-70-26C. Гарантирование космической продукции. Обжимка высоконадежных электрических соединений / Европейская Кооперация по Космической стандартизации. 2008. 41 с.
3. Васильев И. С., Ким В. С., Ефремов С. В. Надежность электрических соединений в бортовой кабельной сети перспективных космических аппаратов // Наукоеведение : сетевой журн. 2013. № 3. URL: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-3-13-technics>.
4. Пат. № 2366049. Российская Федерация. Способ опрессовки кабельных наконечников методом радиального прессования / Леонтьев И. В., Гусев Л. Г., Кузьмин В. В. Оpubл. 27.08.2009, Бюл. № 24.
5. Третьяков А. В., Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. 2-е изд. М. : Металлургия, 1973. 224 с.
6. Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. Сухое трение. М. : Изд-во Академии наук СССР, 1956.
7. Детальная спецификация ESCC № 3401 005. Контакты, электрические, обжимные для соединителей 3401/002. 5-е изд. Июнь. 2009. 18 с.
8. Хольм Р. Электрические контакты. М. : Изд-во иностранной литературы, 1961.
9. Бондаренко И. Б., Гатчин Ю. А., Иванова Н. Ю., Шилкин Д. А. Соединители и коммутационные устройства : учеб. пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с.
10. Сафонов А., Сафонов Л. Радиочастотные электрические соединители. Вопросы теории и состояния

развития производства // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 5.

References

1. GOST RV 15.307-2002. Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo. Voennaja tehnika. Ispytanija i priemka serijnyh izdelij. Osnovnye polozhenija [GOST RV 15.307-2002. System development and putting into production. Military equipment. Tests and acceptance of serial products . Key provisions]. 2004. 32 p.
2. ECSS-Q-ST-70-26C. Garantirovanie kosmicheskoy produkcii. Obzhimka vysokonadezhnyh jelektricheskij soedinenij. Evropejskaja Kooperacija po Kosmicheskij standartizacii [ECSS-Q-ST- 70 -26C. Guaranteeing space products . Swage highly electrical connections. European Cooperation for Space Standardization]. 2008. 41 p.
3. Vasilyev I. S., Kim V. S., Efremov S. V. [Reliability of the electrical connections onboard cabling advanced spacecraft]. *Naukovedeni*. 2013. no. 3. (In Russ.) Available at: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-3-13-technics>.
4. Leont'ev I. V., Gusev L. G., Kuz'min V. V. *Sposob opressovki kabel'nyh nakonechnikov metodom radial'nogo pressovanija* [Method of crimping ferrules by radial compression]. Patent RF, no. 2366049, 2009.
5. Tret'jakov A. V., Zjuzin V. I. *Mehanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* (The mechanical properties of metals and alloys by pressure treatment). 2nd ed. Moscow, Metallurgy Publ., 1973. 224 p.
6. Kragel'skij I. V., Shhedrov V.S. *Razvitie nauki o trenii. Suhoe trenie* (Development of the science of friction. Dry friction). Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1956.
7. *Detal'naja specifikacija ESCC № 3401 005. Kontakty, jelektricheskie, obzhimnye dlja soedinitelej 3401/002* [Detailed specification ESCC № 005 3401. Contacts, electrical crimp connectors for 3401/002]. 5th ed. June 2009. 18 p.
8. Hol'm R. *Elektricheskie kontakty* (Electrical contacts). Moscow, Izdatel'stvo inostrannoj literatury Publ., 1961.
9. Bondarenko I. B., Gatchin Ju. A., Ivanova N. Ju., Shilkin D. A. *Soediniteli i kommutacionnye ustrojstva* (Connectors and switchgear). Proc. allowance. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Information Technologies, 2007. 151 p.
10. Safonov A., Safonov L. [RF connectors. The theory and the state of development of production]. *Tehnologii v jelektronnoj promyshlennosti*. 2010, no. 5.

© Васильев И. С., Сунцов С. Б.,
Ефремов С. В., Ким В. С., 2014

УДК 629.78.064.5

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ НА МИКРОСПУТНИКАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С. В. Губин, Ю. А. Шепетов, Е. А. Должикова

Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского «ХАИ»
Украина, 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17. E-mail: gubinsv@d4.khai.edu

Представлены зависимости изменения потребной массы и стоимости в удельных характеристиках системы энергоснабжения космического аппарата класса микроспутник дистанционного зондирования Земли от углов расположения неориентируемых панелей солнечных батарей для различных параметров орбиты (высоты и местного времени прохождения восходящего узла, которое определяется углом между плоскостью орбиты спутника и направлением на Солнце). Полученные результаты дают возможность оценить изменение удельной массы и удельной стоимости системы электроснабжения для различных углов установки панелей и определить наиболее рациональную геометрию фотоэлектрических батарей.

Ключевые слова: космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, система энергоснабжения.

RATIONAL PHOTOVOLTAIC BATTERIES MOUNTING ON THE EARTH REMOTE SENSING MICROSATELLITE

S. V. Gubin, Yu. A. Shepetov, E. A. Dolzhukova

National aerospace university named after N. E. Zhukovskiy "KhAI"
17, Chkalova str., Kharkov, 61070, Ukraine
E-mail: gubinsv@d4.khai.edu

This paper presents the changing dependence of the required weight and required cost in the specific characteristics of microsatellite power supply system for the Earth remote sensing from the deployment angles of non-oriented solar panels for the different orbital parameters (orbital altitude and local transit time of orbit ascending node, which is determined by the angle between the orbit plane and the direction to the Sun). The obtained results make it possible to estimate the change of power supply system specific weight and specific cost for different deployment angles of the solar panels and determine the most rational geometry of photovoltaic batteries.

Keywords: spacecraft, Earth remote sensing, power supply system.

Космические средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются одним из основных перспективных направлений развития космических систем. Космические системы ДЗЗ интенсивно развиваются и становятся неотъемлемой частью информационного обеспечения многих направлений развития экономики государств [1].

Современные тенденции в области ДЗЗ, разработка и запуск мини- и микроспутников, активное внедрение спутниковых данных в работу государственных учреждений и высшей школы, развитие перспективных программ космического мониторинга, повышающие требования в части детальности и оперативности космической съемки, ставят задачу более детального исследования отдельных систем КА [2].

Учитывая высокую интенсивность развития и внедрения в работу космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли, актуальность приобретает проектирование и разработка систем электроснабжения (СЭС) космических аппаратов данного класса, а также оптимизация их по массе с ограничением по стоимости и надежности.

В соответствии с выполняемыми задачами рассматриваемый класс космических аппаратов (КА) имеет следующие особенности: орбиты солнечно-синхронные, т. е. направление ПОС (угол между плоскостью орбиты спутника и направлением на Солнце) всегда практически постоянно; из-за небольших размеров КА панели фотоэлектрических батарей (БФ), как правило, неориентируемые; одна из осей КА преимущественно ориентирована в нади́р, формируя местную вертикаль.

На этапе проектирования представляет интерес зависимость потребной массы СЭС, при ограничении стоимости и высокой надежности СЭС, от методов размещения неподвижных панелей солнечных батарей относительно местной вертикали КА для различных параметров орбиты (высота и местное время прохождения восходящего узла). Учитывая высокую надежность современных комплектующих элементов силовой электроники, входящих в СЭС КА, в задачу проектирования входит рациональное расположение батарей фотоэлектрических для стабильного за виток коэффициента использования и мощности при минимальной массе и стоимости.

Для того чтобы оценить потребную массу и стоимость СЭС космического аппарата, проведем анализ рациональной установки БФ для штатной работы СЭС в удельных параметрах мощности фотоэлектрической батареи и емкости химической батареи (БХ). Для этого решения большинство вариантов расположения панелей БФ можно свести к конусу с углом раскрытия от 0° до 180° . При угле раскрытия 0° имеем цилиндрическую поверхность, ось цилиндра направлена на центр Земли. При угле раскрытия 180° имеем плоскость, перпендикулярную направлению на центр Земли [3]. Поэтому в качестве рабочей модели геометрии БФ для дальнейших расчетов был выбран конус, поверхность которого покрыта фотоэлектрическими элементами. Основными варьируемыми параметрами были угол между плоскостью орбиты спутника и направлением на Солнце (ПОС – угол β) и угол раскрытия конуса (2γ). Исходя из параметров орбиты космического аппарата (высота и местное время прохождения восходящего узла, которым определяется угол ПОС) и угла установки панелей, был рассчитан коэффициент использования солнечной батареи за виток:

$$K_{\text{исп}} = \frac{1}{T_{\text{вит}}} \int_0^{T_{\text{вит}}} K_{\Sigma \text{осв}}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $T_{\text{вит}}$ – длительность витка, мин; $K_{\Sigma \text{осв}}$ – суммарный коэффициент освещенности всей фотоэлектрической батареи в каждый момент времени на витке; τ – единица времени.

Суммарный коэффициент освещенности определяется выражением:

$$K_{\Sigma \text{осв}}(\tau) = \frac{1}{S_{\text{бок}} S_{\text{бок}}} \int K_{\text{осв}} dS, \quad (2)$$

где $S_{\text{бок}}$ – площадь боковой поверхности конуса; $K_{\text{осв}}$ – мгновенное значение коэффициента освещенности для единичного участка площади на поверхности конуса, он равен $\cos \Omega$ (рис. 1), где Ω – это угол между направлением на Солнце (вектор $\vec{S}$) и вектором нормали к плоскости произвольного единичного элемента на поверхности конуса (вектор $\vec{N}$); dS – единица площади поверхности конуса:

$$dS = \frac{r \cdot d\varphi \cdot dr}{\sin \gamma}, \quad (3)$$

где r – радиальная координата участка dS ; φ – угловая координата вектора участка dS относительно оси x .

Площадь освещенного участка в каждый момент времени ($S_{\text{осв}}$) найдем с помощью выражения

$$S_{\text{осв}} = \int_0^{R+\varphi_{\text{кр}}} \int_{-\varphi_{\text{кр}}}^{\varphi_{\text{кр}}} \frac{RdRd\varphi}{\sin \gamma}, \quad (4)$$

где $\varphi_{\text{кр}}$ – угол раскрытия для конического сектора освещенной части конуса; R – радиус основания конуса.

Для каждого угла α (угол между осью x и вектором направления на Солнце $\vec{S}$) значение $\varphi_{\text{кр}}$ находится из условия $\cos \Omega = 0$. Его можно определить как образующую вдоль поверхности конуса, для которой вектор нормали $\vec{N}$ перпендикулярен направлению на Солнце:

$$\varphi_{\text{кр}} = \arccos(\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma). \quad (5)$$

С учетом неравномерности освещенности эффективная освещенная площадь (условный эквивалент площади, поглощающий ту же энергию при условии нормального падения на него светового потока) составит

$$S_{\text{осв.эфф}}(\tau) = \int_0^{R+\varphi_{\text{кр}}} \int_{-\varphi_{\text{кр}}}^{\varphi_{\text{кр}}} \frac{RdRd\varphi}{\sin \gamma} \cdot \cos \Omega(\tau), \quad (6)$$

С учетом выражений (3)–(6) интегральный коэффициент освещенности площади поверхности конуса ($K_{\Sigma \text{осв}}$)

$$K_{\Sigma \text{осв}}(\tau) = \frac{S_{\text{осв.эфф}}(\tau)}{S_{\text{бок}}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{бок}}$ – площадь боковой поверхности конуса.

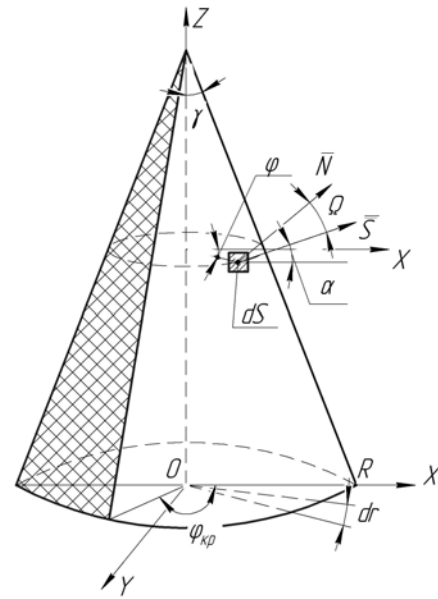


Рис. 1. Расчетная модель геометрии БФ

В результате расчетов были получены зависимости коэффициента использования солнечного излучения от варьируемых параметров: угла между плоскостью орбиты спутника и направлением на Солнце (ПОС – угол β) и угла раскрытия конуса (2γ). Для отображения полученных результатов в дальнейшем использовался угол γ , т. е. половина полного угла раскрытия. Эти два значения являются определяющими количества солнечной энергии, поступающей на единицу площади.

На рис. 2 приведен результат расчета ожидаемого максимального коэффициента использования солнечного излучения для различных значений угла γ при высоте орбиты 300 км. Значения γ варьируются в пределах 0° – 90° . Максимальное значение коэффициента использования солнечного излучения составляет 0,32–0,33 и достигается в крайних положениях плоскости орбиты КА относительно Солнца (0° и 90°) и крайних значениях угла установки панелей (плоскость или цилиндр), при соотношениях $\beta = 0^\circ$ и $\gamma = 90^\circ$ и наоборот. Минимальное значение $K_{\text{исп}}$ для любых γ наблюдается в пределах $40^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ независимо от высоты и варьируется в пределах 0,22–0,23.

Чтобы посчитать необходимую массу БФ и БХ, сначала найдем мощность, генерируемую БФ:

$N_{\text{БФ}}(\tau) = K_{\Sigma \text{сов}}(\tau) \cdot S_{\text{бок}} \cdot E \cdot \eta_{\text{БФ}}$, (8)
где E – солнечная постоянная ($E = 1360 \text{ Вт/м}^2$); $\eta_{\text{БФ}}$ – коэффициент полезного действия фотоэлектрической батареи; $S_{\text{бок}}$ – площадь боковой поверхности конуса (условно принимаем как 1 м^2).

Тогда среднюю мощность нагрузки за виток можно принять как

$$N_{\text{БФ ср}} = \frac{1}{T_{\text{вит}}} \cdot \int_0^{T_{\text{вит}}} N_{\text{БФ}}(\tau) d\tau. \quad (9)$$

Циклограмма нагрузки на борту КА редко носит четко детерминированный характер. Как правило, для больших промежутков времени включение потребителей происходит с нечеткой логикой по конкретной задаче на данное время функционирования. Поэтому по закону больших чисел с некоторым допущением можно принять в качестве циклограммы нагрузки постоянное значение ($N_{\text{БФ ср}}$). Тогда поток мощности через накопитель ($N_{\text{БХ}}$) равен разности мощностей генератора и текущего значения мощности нагрузки (которое было принято как константа ($N_{\text{БФ ср}}$)):

$$N_{\text{БХ}}(\tau) = N_{\text{БФ i}} - N_{\text{БФ ср}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{БФ i}}$ – мощность БФ в определенный момент времени.

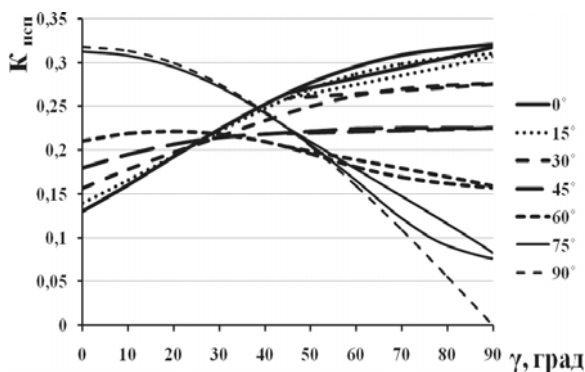


Рис. 2. Изменение максимального значения коэффициента использования солнечного излучения для различных значений угла ПОС

Проинтегрировав по времени выражение (6), получим зависимость от времени текущей заряженности аккумулятора:

$$W_{\text{БХ}}(\tau) = \int_0^{\tau} N_{\text{БХ}}(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Минимально необходимую для нормальной работы СЭС электрохимическую емкость БХ (А·ч) с учетом рабочего напряжения аккумуляторной батареи определим по формуле

$$Q_{\text{БХ min}} = \frac{W_{\text{БХ max}} - W_{\text{БХ min}}}{U_{\text{раб}} \cdot 60}, \quad (12)$$

где $W_{\text{БХ max}}$ – максимальное значение емкости БХ за виток; $W_{\text{БХ min}}$ – минимальное значение емкости БХ за виток; $U_{\text{раб}}$ – напряжение БХ.

$Q_{\text{БХ min}}$ не учитывает необходимого запаса на деградацию емкости БХ в процессе работы, а также ограниченные возможности реальной БХ воспринимать большие величины зарядного тока.

Рекомендуемое значение максимального зарядного тока для литий-ионных аккумуляторов составляет величину $0,5C$.

Среднее значение зарядного тока на освещенном участке:

$$I_{\text{зар. ср}} = \frac{Q_{\text{БХ min}}}{T_{\text{осв}}}, \quad (13)$$

где $T_{\text{осв}}$ – длительность освещенного участка на витке.

Тогда необходимый коэффициент запаса по емкости K_Q , обеспечивающий приемлемые значения зарядного тока, определяем из условия

$$\frac{I_{\text{зар. ср}} \cdot 1 \text{ ч}}{K_Q \cdot Q_{\text{БХ min}}} = 0,5. \quad (14)$$

С учетом выражения (14)

$$K_Q = \frac{1}{T_{\text{осв}} \cdot 0,5C}. \quad (15)$$

Соответственно, установленная емкость БХ берется с учетом коэффициента запаса:

$$Q_{\text{БХ уст}} = K_Q \cdot Q_{\text{БХ min}}. \quad (16)$$

Массу СЭС космического аппарата составляют масса БХ, масса БФ и масса управляющего и коммутационного оборудования. Удельные характеристики этих элементов были приняты на основе данных [4], где представлены доступные для приобретения образцы. Для определения массы и стоимости БФ за основу был взят солнечный элемент NanoPower Solar P100U-A/B, масса которого составляет 0,059 кг, размеры 82,5 мм×98 мм, установленная мощность 2,3 Вт, КПД_{БФ} 30 %. Принятые расчетные удельные характеристики – 0,03 кг/Вт, 46610 у. е./кг [5]. Для определения массы и стоимости БХ, управляющего и коммутационного оборудования за основу была взята аккумуляторная батарея для микроспутников NanoPower P31U Power Supply. Масса батареи 0,095 кг, общая масса 0,2 кг, установленная емкость 5,2 А·ч [6].

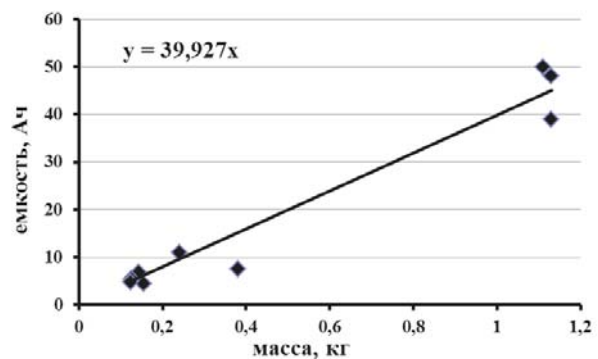


Рис. 3. Зависимость изменения емкости химических батарей от массы

Дополнительно был также проведен анализ аккумуляторов фирмы SAFT космического назначения. Результаты представлены в виде графика (рис. 3).

В результате проведенного анализа была получена величина удельной емкости $q_{уд}$ для единичного аккумулятора 40 А·ч/кг. На основе имеющихся данных рассчитана масса аккумуляторной батареи ($M_{БХ}$):

$$M_{БХ} = \frac{Q_{БХ\text{ уст}}}{q_{уд}} \cdot n, \quad (17)$$

где $q_{уд}$ – удельная величина емкости химической батареи; n – количество аккумуляторов.

Принятые расчетные удельные характеристики – удельная масса 0,007 кг/Вт, удельная стоимость 16500 у. е./кг.

Массу управляющего и коммутационного оборудования определили следующим образом:

$$M_{уп,ком} = N_{БФ\text{ max}} \cdot m_{уп,ком. уд}, \quad (18)$$

где $N_{БФ\text{ max}}$ – максимальная мощность БФ за виток; $m_{уп,ком. уд}$ – удельная масса управляющего и коммутационного оборудования.

В дальнейшем все рассчитанные значения массы и стоимости были отнесены к средней мощности нагрузки.

Главной задачей расчетов было определить зависимость изменения массы и стоимости СЭС космического аппарата класса микроспутник для дистанционного зондирования Земли от параметров орбиты космического аппарата, в частности, угол между плоскостью орбиты спутника и направлением на Солнце и угла установки панелей [7].

В результате проведенных расчетов были получены следующие зависимости массы от угла установки панелей на высоте орбиты 300 км. Для наглядности полученных результатов при построении графиков использовалось удельное значения массы (кг/Вт).

Из полученных графиков (рис. 4) можно сделать вывод, что основной вклад в массу всей системы энергоснабжения космического аппарата делает масса БФ, а наиболее незначительной является масса БХ. При угле между плоскостью орбиты спутника и направлением на Солнце 45° суммарная масса СЭС остается практически постоянной независимо от угла установки панелей и варьируется в пределах 0,1–0,12 кг/Вт. При $\beta = 0^\circ$ масса максимальна при установке панелей под углом 0° и достигает значения 0,16 кг/Вт, а при $40^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ изменяется в пределах 0,09–0,1 кг/Вт. Если угол ПОС = 90° , то с точки зрения массы наиболее выгодным является положение солнечных батарей под углом $0^\circ \leq \gamma \leq 55^\circ$. В этих пределах масса СЭС варьируется от 0,06 до 0,1 кг/Вт, при дальнейшем увеличении угла установки БФ ее масса, а следовательно, и масса всей СЭС резко возрастает. На рис. 5 приведен график изменения суммарной массы СЭС от угла установки панелей (γ) для различных значений угла ПОС. Угол β варьировался в пределах 0° – 90° . Минимальная масса СЭС (0,06–0,065 кг/Вт) наблюдается при соотношениях крайнего положения плоскости орбиты относительно Солнца ($\beta = 90^\circ$) и крайнего значения угла установки панелей ($\gamma = 0^\circ$).

Значительному увеличению массы соответствуют углы установки солнечных батарей 55° – 90° при $75^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$. Масса системы энергоснабжения

микроспутника изменяется в пределах 0,09–0,16 независимо от углов β и γ .

С учетом стоимости NanoPower Solar P100U-A/B (2750 у. е.) и стоимости NanoPower P31U Power Supply (3300 у. е.) были оценены затраты на систему энергоснабжения для различных значений углов между плоскостью орбиты и направлением на Солнце и углов установки солнечных батарей (рис. 6). Также была получена зависимость изменения стоимости СЭС с учетом стоимости запуска от угла установки панелей для различных значений угла ПОС (рис. 6).

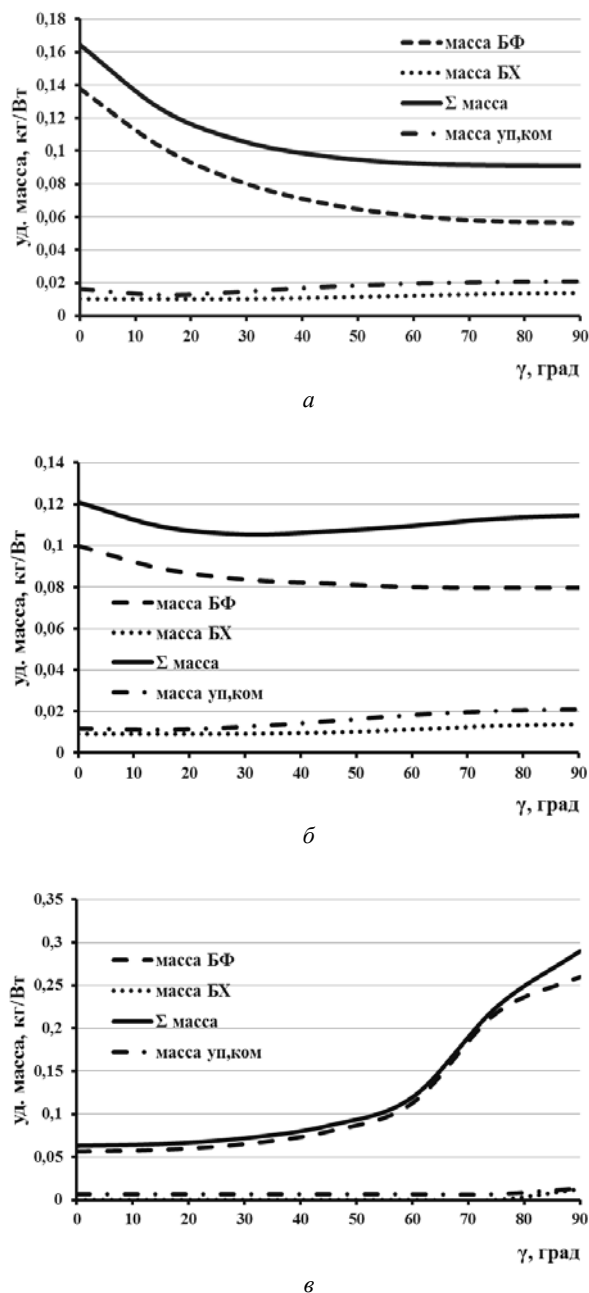


Рис. 4. Изменение массы СЭС в зависимости от различных значений угла установки: а – при ПОС 0° ; б – при ПОС 45° ; в – при ПОС 90°

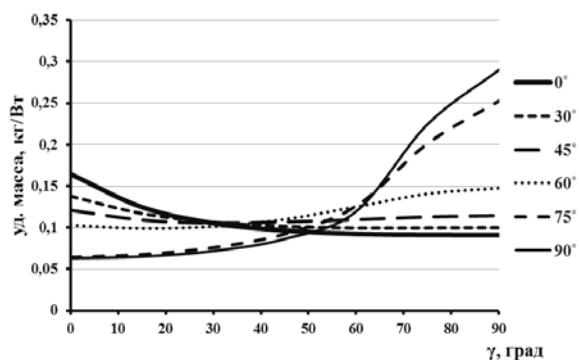


Рис. 5. Изменение массы СЭС в зависимости от различных значений угла установки для разных значений угла между плоскостью орбиты спутника и направлением на Солнце

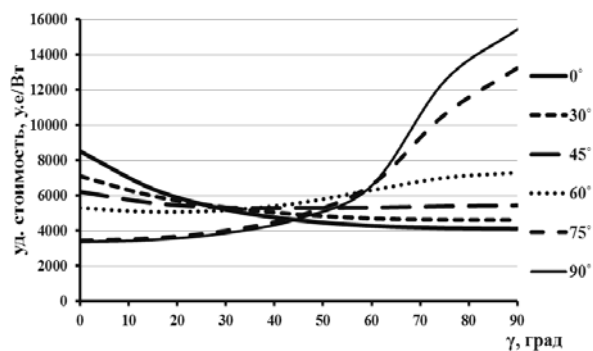
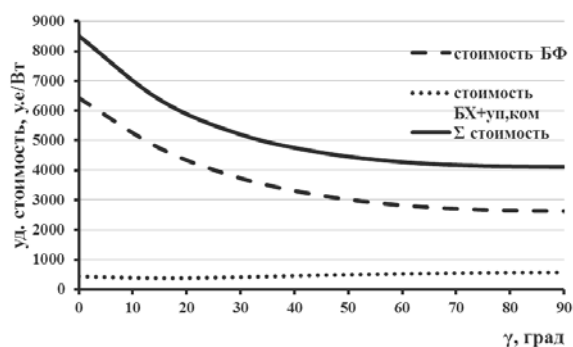
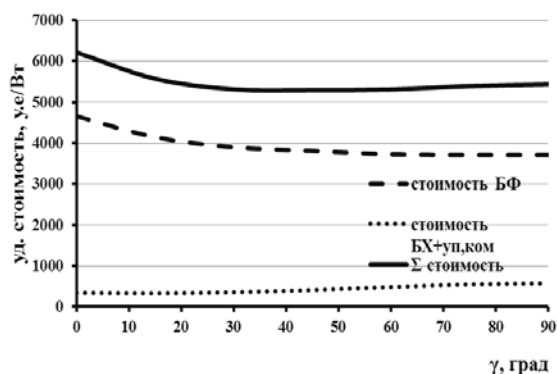


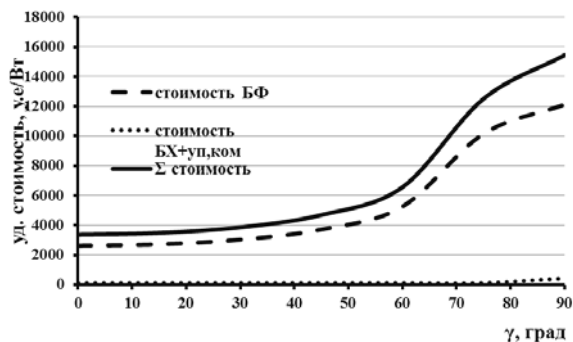
Рис. 7. Изменение стоимости СЭС в зависимости от различных значений угла установки для разных значений угла ПОС



а



б



в

Рис. 6. Изменение стоимости СЭС в зависимости от различных значений угла установки: а – при ПОС 0°; б – при ПОС 45°; в – при ПОС 90°

Полученные графики (рис. 5, 6) повторяют предыдущие результаты и еще раз подтверждают, что стоимость СЭС для $0^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$ варьируется в пределах 4000–8500 у. е. независимо от угла установки панелей. Минимальная (3300–3600 у. е.) и максимальная (13000–14500 у. е.) стоимость достигается при крайних значениях: $\beta = 90^\circ - \gamma = 0^\circ$ и $\beta = 90^\circ - \gamma = 90^\circ$ соответственно.

Представленная методика дает возможность рассчитать ожидаемое значение максимального коэффициента использования солнечного излучения для различных значений высоты орбиты, угла установки БФ (угол γ) и местного времени прохождения восходящего узла, определяемого углом ПОС (угол β). На основе полученных результатов были определены необходимые для нормальной работы СЭС мощность фотоэлектрической батареи и емкость химической батареи, в соответствии с которыми получены графики изменения массы и стоимости СЭС космического аппарата ДЗЗ для различных значений углов γ и β .

Масса и стоимость СЭС КА были рассчитаны для различных значений угла установки панелей БФ (0° – 90°) и угла между плоскостью орбиты спутника и направлением на Солнце (0° – 90°). Полученные данные позволяют сделать вывод, что при угле ПОС, равном 45° , суммарная масса СЭС остается практически постоянной независимо от угла установки панелей и варьируется в пределах 0,1–0,12 кг/Вт. При $\beta = 0^\circ$ масса максимальна при установке панелей под углом 0° и достигает значения 0,16 кг/Вт, а при $40^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ изменяется в пределах 0,09–0,1 кг/Вт. Если угол ПОС 90° , то с точки зрения массы наиболее выгодным является положение солнечных батарей под углом $0^\circ \leq \gamma \leq 55^\circ$. В этих пределах масса СЭС варьируется от 0,06 до 0,1 кг/Вт, при дальнейшем увеличении угла установки БФ значительно увеличивается ее масса, а следовательно, и масса всей СЭС.

Графики, отображающие зависимость удельной стоимости СЭС от угла установки панелей для различных значений угла ПОС, повторяют полученные результаты для массы и иллюстрируют, что минимальная стоимость СЭС (3300–3600 у. е.) возможна при условии установки солнечных батарей под углом 0° и угле ПОС 90° .

Библиографические ссылки

References

1. Макаров А. Л. Управление процессом съемки поверхности Земли с помощью спутников // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 3 (100). С. 101–109.
2. Данные исследований поверхности Земли космических аппаратов RapidEye [Электронный ресурс]. URL: <http://www.blackbridge.com/rapideye/solutions/index.htm> (дата обращения: 28.10.2013).
3. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Аналитическая геометрия : учебник для вузов. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. 224 с.
4. The one-stop-shop for all your CubeSat and nanosat systems [Electronic resource]. URL: <http://cubesatshop.com/> (date of visit: 28.10.2013).
5. NanoPower Solar P100U-A/B [Electronic resource]. URL: <http://cubesatshop.com/index.79> (дата обращения: 28.10.2013).
6. NanoPower P31U Power Supply [Electronic resource]. URL: <http://cubesatshop.com/index.68> (дата обращения: 28.10.2013).
7. Шепетов Ю. А., Должикова Е. А. Оценка рационального угла раскрытия панелей солнечных батарей с точки зрения максимума энергорихода // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 4 (101). С. 89–94.

1. Makarov A. L. *Aviazhihno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*. 2013, no. 3 (100), p. 101–109.
2. *Dannue issledovaniy poverchnosti Zemli kosmicheskikh apparatov RapidEye* (earth remote sensing datas from RapidEye satelittes). Available at: <http://www.blackbridge.com/rapideye/solutions/index.htm> (accessed: 28 October 2013).
3. Ilin V. A., Poznyak E. G. *Analiticheskaya geometriya* (Analytical geometry), Moscow, 2004. 224 p.
4. The one-stop-shop for all your CubeSat and nanosat systems. Available at: <http://cubesatshop.com/> (accessed: 28 October 2013).
5. NanoPower Solar P100U-A/B. Available at: <http://cubesatshop.com/index.79> (accessed : 28 October 2013).
6. NanoPower P31U Power Supply. Available at: <http://cubesatshop.com/index.68> (accessed : 28 October 2013).
7. Shepetov Yu. A., Dolzhukova K. A. *Aviazhihno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya*. 2013, no. 4 (101), p. 89–94.

© Губин С. В., Шепетов Ю. А.,
Должикова Е. А., 2014

УДК 629.7.05

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ УПРАВЛЯЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ НА СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ

А. А. Денисова, О. В. Тверяков, Ю. А. Бритова

Научно-производственный центр «Полус»
Российская Федерация, 634050, г. Томск, просп. Кирова, 56в
E-mail: polus@online.tomsk.net

Динамическая точность космических аппаратов с аппаратурой дистанционного зондирования Земли (в том числе малых) существенно зависит от уровня силовых и моментных возмущений, действующих со стороны работающих бортовых электромеханических устройств – инерционных исполнительных органов систем ориентации на базе управляющих двигателей-маховиков. С целью минимизации виброактивности и измерения возмущающих сил и моментов, обусловленных остаточным дисбалансом вращающегося ротора-маховика управляемых двигателей-маховиков, разработан силоизмерительный стенд для инструментального контроля сил и моментов. Предложена методика определения возмущающих моментов, основанная на использовании экспериментально определяемых значений вибрационных сил.

Ключевые слова: снижение виброактивности, управляемые двигатели-маховики, датчики силы, силоизмерительный стенд, контроль возмущающих сил и моментов.

DEVELOPMENT OF DISTURBANCE MOMENTS DEFINITION METHOD FOR WORKING REACTION FLYWHEELS ASSEMBLIES INSTALLED ON THE SPECIAL FORCES MEASURING STAND

A. A. Denisova, O. V. Tveryakov, J. A. Britova

Scientific industrial centre "Polyus"

56v, Kirov pr., Tomsk, 634050, Russian Federation

E-mail: polus@online.tomsk.net

Instrumental inspection of vibration disturbance forces and moments generated by reaction wheels is an actual technical problem. Dynamic accuracy of the space vehicle for the Earth observation and small space vehicle depend on the level of vibration disturbance forces and moments generated by working onboard devices such as reaction wheels. To reducing of vibration disturbances and to check disturbance forces and moments caused by the unbalance of rotating parts of reaction flywheels the special force measuring stand has been developed. The stand consists of the measurement module, converting and recording parts. Stand operation principle is based on real-time measuring the projections of forces created by working reaction wheel on three orthogonal axes X , Y , Z . The special method of calculating the disturbance moments using values of the forces obtained experimentally has been proposed. The method of determining disturbance moments implemented in specially designed software of the stand is proposed.

Keywords: *reducing of vibration disturbances, reaction wheels, force sensors, force measuring stand, check disturbance forces and moments.*

Снижение уровня вибрационного воздействия от работающих на борту космических аппаратов электромеханических приводных устройств, в том числе управляемых двигателей-маховиков (УДМ), содержащих вращающиеся части, является актуальной технической задачей, обусловленной ужесточением вводимых предприятиями – разработчиками космических аппаратов ограничений.

Минимизация виброактивности, под которой понимаются механические воздействия в виде сил и моментов, требует проведения как комплексных теоретических исследований на проектном этапе, включая компьютерное моделирование и инженерный анализ конструкции, так и экспериментальных измерений, направленных на изучение характера и уровня вибраций, создаваемых в процессе работы прибора, на выяснение неизбежных отличий реальной конструкции от «идеальной» модели с целью уточнения и совершенствования последней [1].

Для экспериментального определения создаваемых УДМ возмущающих сил и моментов в ОАО «НПЦ «Полус» разработан и изготовлен силоизмерительный стенд, состоящий из измерительного модуля и аппаратно-регистрирующей части.

Принцип работы стенда основан на измерении сил по трем ортогональным осям X , Y , Z , создаваемых работающими УДМ в реальном режиме времени.

Измерительный модуль представляет собой платформу с шестью трехкомпонентными датчиками силы, установленную на виброизолированный фундамент, конструктивно обеспечивающий контроль вибрационных воздействий с частотами не ниже 3 Гц.

Аппаратно-регистрирующая часть стенда образована измерительными усилителями заряда и 32-канальным анализатором вибрационных, акустических сигналов LMS SCADAS Mobile (Бельгия).

Для калибровки и поверки измерительных усилителей, управления процессом измерений, осуществления сервисных функций, преобразования получаемых с датчиков силы данных, выполнения частотного анализа и преобразования Фурье использован персональный компьютер с предусмотренным служебным программным обеспечением, также разработанным фирмой LMS [2].

Испытываемый УДМ закрепляется на платформе при помощи специальных приспособлений и крепежа с заданным моментом затяжки, исключающего возможные повреждения посадочных мест УДМ. Закрепление УДМ производится таким образом, чтобы оси приборной системы координат OX и OY (лежащие в плоскости вращения маховика) совпадали с соответствующими осями платформы.

Определение значений силомоментных характеристик УДМ основано на измерении электрических сигналов с выходов датчиков силы, прямо пропорциональных силам сжатия и растяжения, создаваемым работающим в различных режимах УДМ и действующим в точках его крепления к платформе. Эти сигналы в реальном масштабе времени передаются в измерительный тракт, усиливаются и поступают в анализатор, где происходит их согласование и аналого-цифровая обработка. Далее оцифрованные сигналы поступают в компьютер и сохраняются на его жестком диске в виде массива данных. Таким образом, оператор получает значения вибрационных сил, генерируемых УДМ.

Однако на практике необходимо иметь информацию о возмущающих моментах, действующих относительно осей OX , OY , OZ приборной системы координат, а также значения статического и динамического дисбалансов, которые позволяли бы проводить экспресс-оценку качества выполнения технологической

операции уравнивания роторной системы УДМ на завершающей стадии изготовления и приемки.

Для расчета значений возмущающих моментов предложена методика, основанная на положении о равновесии пространственной системы сил и связывающая геометрические размеры, конфигурацию расположения датчиков и значения регистрируемых сил.

Согласно схеме расположения датчиков силы (рис. 1), применяемых в измерительном модуле (датчики 261A13 фирмы РСВ), уравнения для вычисления суммарных проекций сил, действующих вдоль осей приборной системы координат, имеют вид

$$\begin{aligned} F_x &= F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} + F_{5x} + F_{6x}; \\ F_y &= F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} + F_{5y} + F_{6y}; \\ F_z &= F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z} + F_{5z} + F_{6z}, \end{aligned} \quad (1)$$

а уравнения для вычисления суммарных моментов, действующих относительно осей приборной системы координат,

$$\begin{aligned} M_x &= a(F_{4z} + F_{3z} - F_{1z} - F_{6z}); \\ M_y &= b(F_{6z} + F_{4z} - F_{3z} - F_{1z}) + c(F_{5z} - F_{2z}); \\ M_z &= a(F_{1x} + F_{6x} - F_{4x} - F_{3x}) + \\ &+ b(F_{3y} + F_{1y} - F_{4y} - F_{6y}) + c(F_{2y} - F_{5y}), \end{aligned} \quad (2)$$

где F_{ix} , F_{iy} , F_{iz} – проекции вибрационной силы на оси системы координат стенда, регистрируемые соответствующими датчиками силы; M_x , M_y , M_z – амплитудные значения возмущающих моментов; a , b , c – расстояния, определяющие положение проекций геометрических центров датчиков силы относительно осей системы координат стенда в плоскости XOY .

В результате расчета по формулам (2) получены зависимости возмущающих моментов, генерируемых УДМ, при различных частотах вращения ротора (рис. 2).

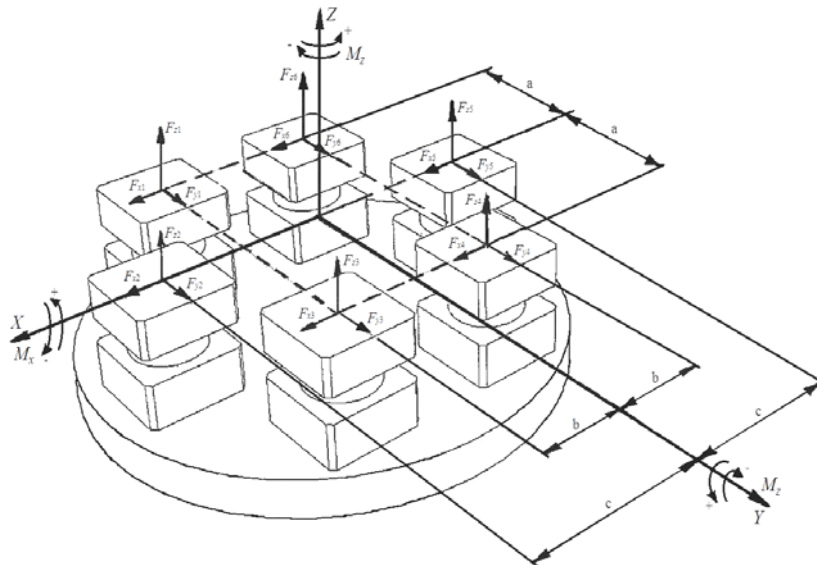


Рис. 1. Схема расположения датчиков на установочной платформе силоизмерительного стенда

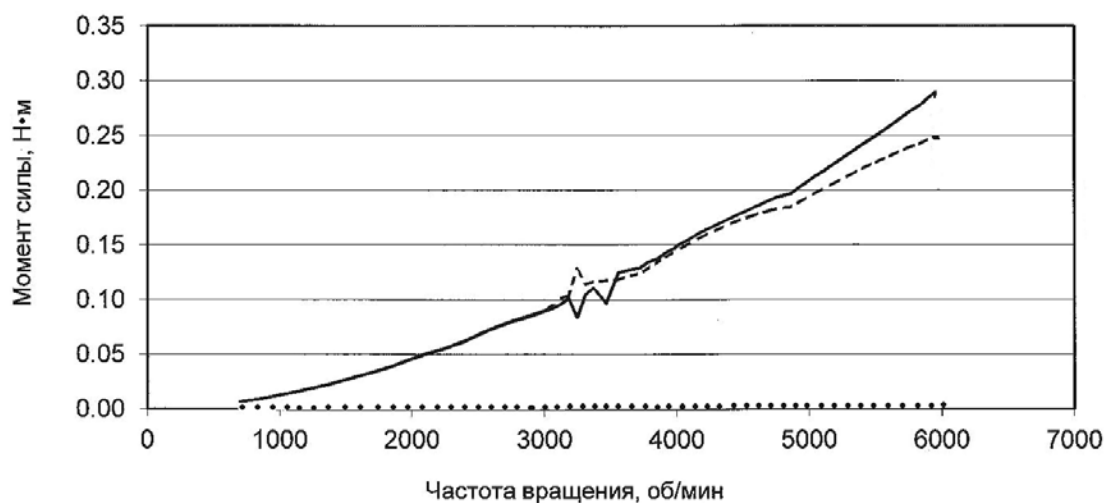


Рис. 2. Зависимость моментов сил, действующих по осям
X (—), Y (---), Z (.....)

При определении моментов были использованы значения сил, действующих вдоль осей OX , OY , OZ работающего УДМ, полученные экспериментально на силоизмерительном стенде.

Из графика (рис. 2) следует, что суммарные значения амплитуд моментов сил по осям OX и OY практически совпадают между собой, что соответствует увеличению центробежных сил ротора-маховика с остаточным дисбалансом по мере роста частоты вращения. Момент по оси OZ отсутствует. В диапазоне частот 3100–3600 об/мин имеются отклонения амплитуд моментов сил. Выявление источника этих отклонений требует дополнительных исследований. Предварительное предположение – отклонения вызваны вибрацией наружных колец шарикоподшипников.

Предложенная методика, реализованная в программном обеспечении разработанного стенда, позволяет получать объективные данные о значениях возмущающих моментов, генерируемых УДМ, а также с их помощью определять значения статического и динамического дисбалансов вращающихся частей УДМ.

Таким образом, внедрение экспериментального контроля возмущающих моментов создает предпосылки для повышения точности балансировки на этапе изготовления и совершенствования разрабатываемых

приборов. Это делает силоизмерительный стенд эффективным инструментом, необходимым при создании электродвигателей-маховиков с минимальной виброактивностью.

Библиографические ссылки

1. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики. В 2 т. СПб.: Лань, 2004. 736 с.
2. Рекламный каталог инженерных решений от компании LMS International (Бельгия). 163 с.

References

1. Butenin N. V., Lunts Ya. L., Merkin D. R. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki* (Theoretical mechanics course). Two volumes. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2004. 736 p.
2. The LMS International (Belgium) engineering products advertising catalogue, 163 p.

© Денисова А. А., Тверяков О. В.,
Бритова Ю. А., 2014

УДК 620.17

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

А. А. Кишкин¹, И. П. Колчанов², А. В. Делков¹, А. А. Ходенков¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: spsp99@mail.ru

²ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52

Анализируется возможность повышения чувствительности метода контроля герметичности изделий ракетно-космической техники с применением гелиевых масс-спектрометрических течеискателей. Рассматривается теоретическая постановка задачи по пространственному позиционированию источника негерметичности по значениям проекций градиента концентраций пробной среды в специально подготовленной атмосфере в зоне объекта исследования.

Ключевые слова: контроль герметичности, течеискание, локализация утечки, диффузия.

THE PROBLEM OF INCREASING THE SENSITIVITY OF LOCAL CONTROL METHODS FOR TIGHTNESS PRODUCTS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

A. A. Kishkin¹, I. P. Kolchanov², A. V. Delkov¹, A. A. Hodenkov¹

¹ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: spsp99@mail.ru

² JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation

Tightness is one of the most important factors of safety, efficiency and persistence in the rocket and space technology. Mass spectrometer leak detection method is mostly used in the spacecraft production. This article describes the possibility of increasing the sensitivity of the method of leak test of rocket and space technology using helium mass spectrometer leak detectors. Theoretical formulation of the problem on the spatial positioning of the source of leaks from the values of the projections of the concentration gradient in a test environment in a specially prepared area of the object is explored. Concentration field of leak will be concentric semicircles when there are no any incoming flows in testing area. If concentration field is known, it is possible to solve the problem of localization of leaks with the gradient of this field. This article has covered mathematical model of the concentration field and localization leaks algorithm. Problems and prospects of the proposed method are evaluated.

Keywords: tightness test, leak detection, leak localization, diffusion.

Одним из важнейших факторов обеспечения безопасности, работоспособности и сохранности изделий ракетно-космической техники (РКТ) является герметичность, определяющая способность конструкции препятствовать проникновению через нее жидкости и газа.

Повышенные требования предъявляются к герметичности агрегатов с высокотемпературной средой, систем токсичных, пожаро- и взрывоопасных веществ, изделий длительного хранения в заправленном состоянии, а также агрегатов и систем космических аппаратов (КА) с регламентированными сроками активного существования [1; 2].

Абсолютная герметичность неосуществима, так как все конструкционные материалы обладают определенной проницаемостью. Технически значимыми источниками негерметичности изделий РКТ являются течи в виде неплотностей разъемных стыков, микротрещин и микропор основного материала или сварных и паяных соединений, вызывающие утечки рабочих веществ из замкнутых полостей конструкций агрегатов и систем, определяющие уровень качества их изготовления и регламентируемые нормами герметичности.

Существует постоянная тенденция к ужесточению норм герметичности, вызванная необходимостью дальнейшего увеличения гарантированных сроков хранения и эксплуатации ампулизованных изделий и КА.

Таким образом, усложняются задачи производства, так как известно, что с целью исключения случаев выявления дефектов на конечной стадии изготовления изделий РКТ структура технологического процесса должна предусматривать проведение соответствующих проверок на возможно ранних этапах с установлением норм герметичности более жестких, чем нормы на этапе окончательной их сборки. Эквивалентные диаметры искомых микротечей при этом составляют доли микрометров.

Очевидно, что ограничивающими факторами в ужесточении норм являются технологические возможности обеспечения герметичности при изготовлении и чувствительность используемых методов и средств контроля этого параметра.

При этом чувствительность применяемых методов контроля характеризуется минимальной степенью негерметичности, гарантированно выявляемой при испытании.

Из известных методов течеискания, обладающих высокой чувствительностью, наиболее применяемым в производстве изделий РКТ является масс-спектрометрический метод.

Данный метод основан на обнаружении пробного газа, проникающего через течи контролируемого объекта, в смеси газов, поступающих на вход в вакуум-камеру масс-спектрометрического анализатора, посредством их ионизации в ионном источнике камеры и последующего разделения ионов газов по отношению массы к заряду под действием электрического и магнитного полей. Для селективного определения величины потока пробного газа в масс-спектрометрических газоанализаторах (течеискателях) используется эффект зависимости радиуса траектории ионизированных частиц в постоянном магнитном поле от ускоряющего напряжения и атомной массы газа [3].

Нижний предел чувствительности современных масс-спектрометрических гелиевых течеискателей – $5 \cdot 10^{-13}$ м³ Па/с.

Технологический процесс испытаний в общем виде представляет собой сложную техническую систему (объект испытаний – контрольная среда (пробное вещество) – индикаторное средство – испытательное оборудование), которая включает ряд отдельных процессов: подготовку объекта к испытаниям, заполнение его контрольной средой (пробным веществом) или вакуумирование, транспортировку пробного вещества от дефекта до индикатора, регистрацию параметров испытания [4].

При контроле герметичности в общем случае приходится решать две задачи: определение (преимущественно вакуумными методами) общей степени герметичности сборочной единицы, а при превышении установленной нормы – локализацию течи, т. е. выявление зоны и, по возможности, конкретного места дефекта. Вследствие малых размеров дефектов, вызывающих течи, процесс их обнаружения является трудоемким [4].

Следует отметить, что минимальный порог чувствительности способов, применимых для локализации течей, выше порога чувствительности способов определения степени суммарной негерметичности, и это обстоятельство в ряде случаев приводит к невозможности обнаружения конкретного дефекта и его устранения.

Таким образом, задачей высокочувствительного течеискания является выявление негерметичных участков контролируемых поверхностей изделий (далее –

объекта испытаний) по величине утечки пробного газа на уровне чувствительности применяемых методов контроля.

В качестве пробного газа применяют гелий. Он безопасен в работе, хорошо проникает через течи, у него низкая адсорбируемость.

Преимущества методов поиска течей с использованием гелия с точки зрения промышленности следующие [5]:

- предельный уровень утечки (натекания), который можно определить, удовлетворяет всем практическим задачам отрасли;

- анализ суммарной утечки (общего натекания) в изделии, поиск отдельных течей, возможность определения микроскопических течей.

Возможна перенастройка течеискателей для использования в качестве пробного газа и других газов, например, аргона или азота, но при этом чувствительность прибора ухудшается на 2–3 порядка и исключается возможность проведения испытаний при атмосферном давлении в воздушной среде [2].

Быстрое развитие масс-спектрометрии в мире за последние 30 лет привело к тому, что эта технология применяется практически во всех аналитических задачах, связанных с контролем герметичности объектов испытаний.

Использование методов контроля герметичности с помощью гелиевых масс-спектрометрических течеискателей эффективно и дает высокую надежность испытаний, а также гарантирует возможность удовлетворения требований по стандарту EN/ISO 9000 к методам промышленного контроля герметичности.

Современные гелиевые масс-спектрометрические течеискатели обеспечивают возможность автоматизации процедур поиска течи. Результаты испытаний можно задокументировать, определить параметры, использовать в автоматизированных процедурах расчетов, сохранить (создать электронный архив).

Текущее состояние отечественных методик локального высокочувствительного течеискания складывалось в конце 80-х гг. прошлого столетия, что также учитывалось авторами настоящей работы при выборе направления исследований.

Ряд разновидностей масс-спектрометрического метода, предназначенного для поиска мест течей и определения потока через них, приводится в государственном стандарте [6].

При поиске дефектов герметичности всех видов сборочных единиц изделий РКТ, работающих под воздействием внутреннего давления, при испытаниях которых на суммарную негерметичность имелось превышение установленной нормы, основным является способ шупа [7].

Реакция течеискателя и, соответственно, чувствительность контроля герметичности зависят от степени приближения шупа к контролируемой поверхности и от скорости перемещения шупа. Максимальная чувствительность испытания равна чувствительности течеискателя и достигается в том случае, если остановить шуп над течью. Рекомендуемое расстояние от среза шупа до контролируемой поверхности 0,5 мм [8].

Известно [2], что определение в динамическом режиме мест негерметичности способом шупа возможно с чувствительностью $1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ и что проведение контроля герметичности в статическом режиме позволяет снижать порог чувствительности способа до значения $5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

Возможность достижения большей чувствительности связано как с изменением испытательной схемы контрольного прибора (например, в случае подсоединения шупа к выходу из высоковакуумного насоса течеискателя порог чувствительности прибора возможно довести до значения $6,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$) [2], так и с изменением условий испытаний, например, можно воспользоваться способом аккумуляирования (накопления) пробного газа в той зоне объекта испытаний, где ведется поиск течи [6].

Однако установлено [2], что предельные возможности исследуемого в работе способа реализации масс-спектрометрического метода течеискания лимитируются уровнем и стабильностью фона системы «шуп – замкнутый объем», а также временем накопления концентрации пробного газа, зависящим от характеристик замкнутого объема.

При статическом, наиболее чувствительном режиме испытаний в указанном методе величина утечки определяется по изменению концентрации гелия, регистрируемой газоанализатором с пробоотборником, в различных точках (зонах) вблизи контролируемой поверхности объекта испытаний (его части), помещаемого в замкнутый объем (чехол, локальную камеру и т. п.) [7].

Описание способа. При выборе направления исследований в качестве аналогов объекта исследований рассматривались известные методы статических испытаний, применяемых для выявления негерметичных участков контролируемой поверхности.

В результате, исходя из условий технологичности испытаний, за прототип был принят способ течеискания шупом при атмосферном давлении, краткое описание которого приводится в [9].

На рис. 1 изображена схема применения масс-спектрометрического метода при контроле локальной герметичности объекта 3 с помощью гелиевого течеискателя 1 способом шупа 2 при атмосферном давлении [10].

Процесс проведения испытаний состоит в следующем. Объект и необходимые средства испытаний размещают в замкнутом объеме (в камере или боксе), величина утечки определяется по изменению концентрации гелия в пространстве замкнутого объема, регистрируемой контрольным прибором – течеискателем со шупом с возможностью пространственного позиционирования шупа. Для реализации преимуществ статического режима испытаний из замкнутого объема перед началом проведения замеров удаляется гелийсодержащий воздух, а для получения минимальной концентрации гелия в пространстве замкнутого объема проводится заполнение испытательного объема гелийнесодержащим воздухом и регистрируется остаточное значение концентрации пробного газа (гелия) в атмосфере объема.

Затем в тестируемый объект подают гелий (test gas) [10]. При наличии малых дефектов герметичности в объекте пробный газ через дефекты (течи) начинает вытекать из объекта и поступать в атмосферу замкнутого объема.

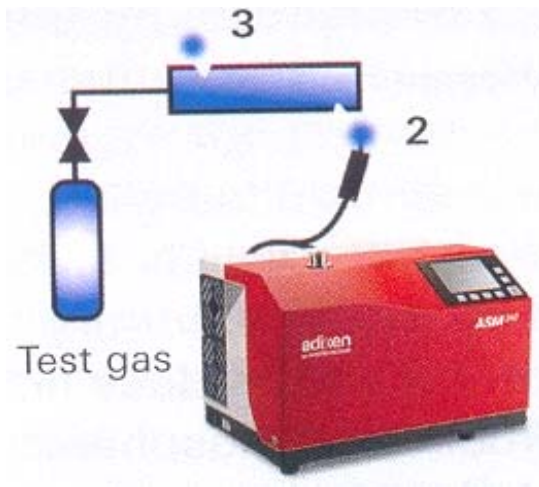


Рис. 1. Схема определения мест утечки гелия из объекта в атмосферу щуповым способом с помощью гелиевого течеискателя

Цель тестирования – обнаружение этих течей и оценка величины интенсивности утечек пробного газа из объекта по изменению его концентрации в локальных зонах испытательного объема.

С этой целью значения концентрации гелия измеряются в разных точках испытательного объема вблизи поверхности тестируемого объекта для построения поля распределения концентраций.

Для получения сведений о местоположении утечки и величине ее интенсивности полученные характеристики поля обрабатываются с применением математического аппарата уравнения диффузии. При этом величина интенсивности утечки с наибольшей точностью определяется известным способом накопления пробного газа в зоне утечки, например, под чехлом [6].

Величины обнаруженных утечек сравнивают с допустимыми значениями через соотношения посредством эталонов для их оценки и устранения дефектов.

Анализ математической модели. Для построения математической модели представленной схемы проанализируем нестационарное уравнение диффузии в замкнутой области.

В качестве расчетной модели будем рассматривать истечение пробного газа из дефекта (течи) с поверхности испытываемого аппарата в окружающее пространство. Поверхность представим плоскостью XU . Тогда положение течи на поверхности будет однозначно определяться двумя координатами на плоскости.

Рассмотрим картину утечки пробного газа через дефект в поверхности исследуемого объекта и поставим задачу локализовать этот дефект. Пусть на плоскости XU имеется течь с координатами (x_T, y_T) . Истечение происходит в объем параллелепипеда со сторонами a, b, h (рис. 2).

Обозначим $c(x, y, z)$ концентрацию диффундирующего вещества (пробного газа) в точке (x, y, z) в момент времени t . В основе вывода уравнения для концентрации лежит закон Фика, согласно которому масса частиц, протекающих за единицу времени через элемент поверхности ds , равна [11]

$$-D \frac{\partial c}{\partial n} ds, \quad (1)$$

где n – нормаль к ds в сторону потока частиц; $D = D(x, y, z)$ – коэффициент диффузии.

Подсчет баланса массы частиц в произвольно фиксированном объеме V с учетом притока частиц через его поверхность S и наличия источников и стоков частиц приводит к уравнению диффузии в частных производных [12]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div}(D \text{ grad } c). \quad (2)$$

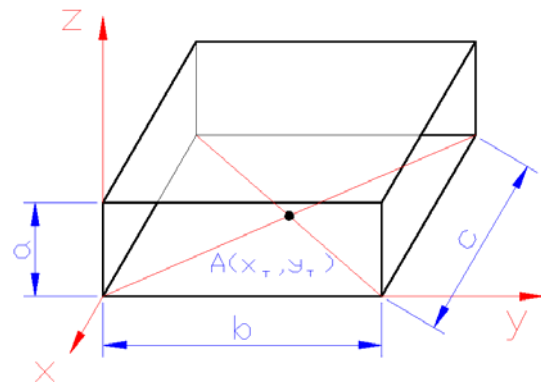


Рис. 2. Расчетная схема моделируемого процесса

При постоянном коэффициенте диффузии (что можно предположить для изотермического случая в рамках решаемой задачи) получим

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \text{div}(\text{grad } c) + Q(x_T, y_T, t), \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] + Q(x_T, y_T, t),$$

где x_T, y_T – координаты точки течи; Q – величина утечки в пространство над объектом. Так как решение задачи зависит от времени, пробный газ накапливается в пространстве над объектом, то величина утечки будет также зависеть от времени t .

В качестве граничных и начальных условий для этого уравнения в рассматриваемом случае можно указать:

– равенство концентрации в области в начальный период времени и на границах области в любой момент времени фоновому значению концентрации (для рассматриваемой задачи с учетом предварительной очистки атмосферы от гелия его фоновую концентрацию можно принять равной нулю, $c_\phi = 0$)

$$\begin{aligned} c|_{t=0} &= c_\phi, & c|_{x=0} &= c|_{x=a} = c_\phi, \\ c|_{y=0} &= c|_{y=b} = c_\phi, & c|_{z=0} &= c|_{z=h} = c_\phi; \end{aligned} \quad (4)$$

– равенство нулю производной по концентрации на границе области (отсутствие утечки вещества через границу испытательной камеры, граница является непроницаемой):

$$\begin{aligned}\frac{\partial c}{\partial x}\bigg|_{x=0} &= \frac{\partial c}{\partial x}\bigg|_{x=a} = 0, \\ \frac{\partial c}{\partial y}\bigg|_{y=0} &= \frac{\partial c}{\partial y}\bigg|_{y=b} = 0, \\ \frac{\partial c}{\partial z}\bigg|_{z=0} &= \frac{\partial c}{\partial z}\bigg|_{z=h} = 0.\end{aligned}\quad (5)$$

Решение указанного дифференциального уравнения параболического типа в частных производных позволит при известных параметрах течи установить скалярное поле концентраций в исследуемой области. Аналитические методы решения уравнения диффузии в стационарном случае в специализированной литературе представлены достаточно широко (см., например, [13]).

В случае отсутствия тепловой конвекции и внешних набегающих потоков поверхности уровня скалярного поля концентраций будут иметь вид полусфер с центром в источнике утечки (рис. 3).

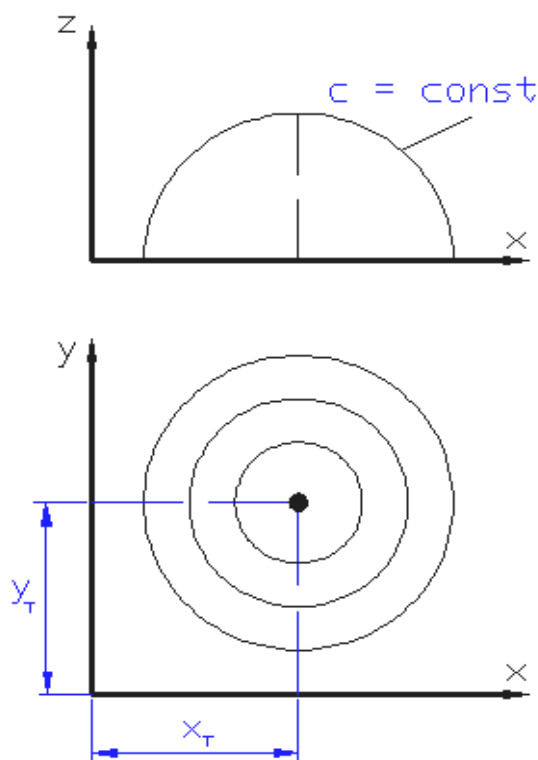


Рис. 3. Линии уровня стационарного распределения концентрации в плоскостях XY и XZ (концентрационное поле)

Таким образом, при известном положении и величине утечки можно однозначно установить концентрационное поле для пробного газа. Для нескольких источников суммарное поле определяется суперпозицией. При учете факторов наличия переменного ко-

эффициента диффузии, конвективных потоков наиболее рационально для получения поля концентраций использовать численные методы.

Алгоритм локализации течи. Для методов контроля герметичности при локализации течи в рамках описанной математической модели стоит обратная задача решения дифференциального уравнения диффузии – при известном поле концентраций найти источник течи и определить ее интенсивность. Поле концентраций пробного газа можно получить замерами пространственно ориентированным щупом.

При известном поле концентраций задачу локализации течи можно решить при помощи нахождения градиента поля (рис. 4). Градиент концентрации будет направлен к источнику течи, а его величина будет зависеть от интенсивности утечки. Модуль градиента будет определяться приращением концентрации по трем направлениям:

$$\text{grad}(c) = \frac{\partial c}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial c}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial c}{\partial z} \vec{k}. \quad (6)$$

Для нахождения градиента поля в общем случае достаточно измерить концентрацию в трех точках (не лежащих в одной плоскости), чтобы найти компоненты приращения концентрации по трем направлениям. Для обеспечения точности вычислений число точек измерения может быть увеличено.

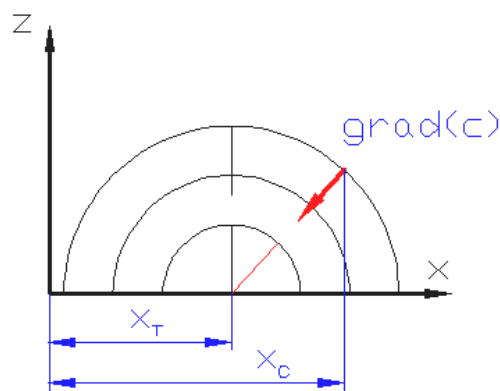


Рис. 4. Положение вектора градиента в поле концентраций

При известном градиенте поля положение течи можно найти из соотношения

$$x_c = x_T + r \cos \Theta, \quad (7)$$

где x_c – координата по x точки, в которой производился замер концентрации; Θ – угол наклона вектора градиента с осью x .

Координата y ищется аналогично. Для удобства вычислений три точки измерений лучше располагать на взаимно перпендикулярных осях, пересекающихся в одной точке. Установив положение источника течи, можно определить его интенсивность.

Данный алгоритм пригоден для локализации течей в случае наличия одного источника. При большем числе источников задача локализации рассматривается как суперпозиция нескольких решений.

Проблемы и перспективы способа. Для испытательного объема конечных размеров уравнение диффузии необходимо рассматривать в параболической форме, с учетом времени протекания процесса. Это обусловлено влиянием атмосферного давления в граничных плоскостях испытательного объема на скорость выделения пробного газа в замкнутый объем.

Поэтому процесс испытаний осложнен необходимостью замера времени измерений и его пересчета на время для идеального случая.

Идеальный случай стационарного уравнения можно рассматривать, если принять границы области бесконечными (условия вакуума при отсутствии тепловой конвекции и внешних набегающих потоков). В этих условиях поверхности уровня этого поля будут иметь вид полусфер с центром в источнике утечки. При наличии значительных скоростей истечения газа поверхности уровня имеют вид гиперболоидов, вытянутых вдоль оси z .

Для анализа такой картины распределения необходимо уравнение диффузии решать совместно с уравнением движения пробного газа в исследуемой области.

Проведенный эксперимент показал, что и при малой величине утечки пробного газа из течи объекта при наличии в пространстве замкнутого объема сил, движущих газовые потоки, поток пробного газа будет отклоняться и смешиваться с другими потоками, обусловленными факторами локального газовыделения, и задавать нестабильность регистрируемому выходному сигналу течеискателя (рис. 5), настроенного на максимальную чувствительность.

На графике (рис. 5) вертикальная линия, ограниченная стрелками, – амплитуда вероятного разброса значений сигнала вследствие остаточной нестабильности фона системы «щуп – замкнутый объем». Горизонтальная прямая линия на графике – условный браковочный порог.

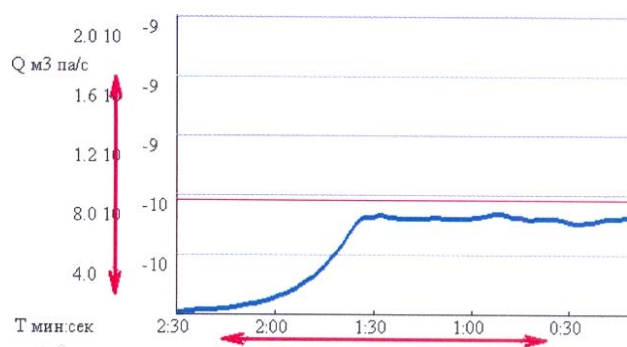


Рис. 5. Графическое отображение натекания пробного газа в вакуум-камеру анализатора (реакция течеискателя на микротечь)

При наличии в испытательном объеме неоднородного поля распределения температур необходимо учитывать и его влияние на коэффициент диффузии. Соответственно, в схеме испытаний необходимо предусмотреть замер температур в различных точках объема.

Указанные особенности усложняют математическую модель диффузии в пространстве испытательного объема.

Решение можно найти численными методами [14] с введением дополнительных граничных условий и применением аппарата программного обеспечения испытаний. При этом нестабильность характеристик применяемого контрольного оборудования должна быть сведена к минимуму [15].

Таким образом, установлено следующее. При известном поле концентрации пробного газа возможно решить задачу локализации течи в специально подготовленной атмосфере через нахождение градиента для этого поля. В отсутствие набегающих потоков и при пренебрежимо малой величине течи изолинии поля концентраций будут являться концентрическими полукругностями с центром в источнике пробного газа. Градиент поля концентраций можно найти замерами концентраций пространственно ориентированным щупом течеискателя не менее чем в трех различных точках исследуемой области.

Предполагая наличие на контролируемой поверхности объекта нескольких микротечей, поток через каждую из которых меньше чувствительности существующих средств контроля, работы по снижению потерь от дефектов герметичности возможно проводить в направлении повышения эффективности метода локального течеискания, заключающегося в учете влияния на достоверность определения величин потоков течей условий отбора пробного вещества в анализатор течеискателя и в оценке точностных характеристик применяемого контрольного оборудования.

Библиографические ссылки

1. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В. А. Афанасьев [и др.] ; под ред. Н. В. Холодкова. М. : Изд-во МАИ, 1994. 412 с.
2. Гардымов Г. П., Парфенов Б. А., Пчелинцев А. В. Технология ракетостроения : учеб. пособие. СПб. : Специальная литература, 1997. 320 с.
3. Гурвич А. К., Ермолов И. Н., Сажин С. Г. Неразрушающий контроль. Кн. 1. Общие вопросы / под ред. В. В. Сухорукова. М. : Высш. шк., 1992. 416 с.
4. Технология производства жидкостных ракетных двигателей : учебник / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков, А. С. Филимонов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 380 с.
5. Белокур И. П., Коваленко В. А. Дефектоскопия материалов и изделий. Киев : Техника, 1989. 192 с.
6. ГОСТ 28517–90. Контроль неразрушающий. Масс-спектрометрический метод течеискания. Общие требования. М. : Стандартинформ, 2005.
7. Технология производства космических аппаратов : учебник для вузов / Н. А. Тестоедов [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., Красноярск. 2009. 352 с.
8. Шешин Е. П. Вакуумные технологии : учеб. пособие. Долгопрудный : Изд. дом «Интеллект», 2009. 504 с.
9. Тарасевич Р. М. Методы и средства проверки герметичности узлов, отсеков и систем летательных аппаратов : учеб. пособие. М. : МАИ, 1974. 145 с.

10. The Vacuum Technology Book Volume II. Germany, publ. Pfeiffer Vacuum GmbH, 2013. URL: <http://www.norm.gr/documents/Vacuum-Technology-Book-II-Part-2.pdf> (дата обращения: 5 December 2013).

11. Романовский Р. К. Лекции по уравнениям математической физики. Уравнения колебаний и диффузии : учеб. пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2004. 102 с.

12. Дмитриев Е. А. Явления переноса массы в примерах и задачах : учеб. пособие. М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. 120 с.

13. Мартинсон Л. К., Малов Ю. И. Дифференциальные уравнения математической физики : учебник для студентов вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1996. 368 с.

14. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. М. : Мир, 1985. 384 с.

15. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник. В 2 кн. / под ред. В. В. Клюева. М. : Машиностроение, 1986. Кн. 1. 488 с; кн. 2. 352 с.

References

1. Afanasev V. A. [et al.] *Eksperimental'naya otrabotka kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* (Experimental verification of spacecraft). Edited by Kholodkov N. V. Moscow, MAI publ., 1994. 412 p.

2. Gardymov G. P., Parfenov B. A., Pchelincev A. V. *Tekhnologiya raketostroeniya* (Rocket technology). St. Petersburg, Spetsial'naya literatura publ., 1997. 320 p.

3. Gurvich A. K., Ermolov I. N., Sazhin S. G. *Nerazrushayushchiy kontrol'. Kn. 1. Obshhie voprosy* (Non-destructive testing. Book 1. Common questions). Edited by V.V. Suhorukov. Moscow, Higher School Publ., 1992. 416 p.

4. Moiseev V. A., Tarasov V. A., Kolmykov V. A., Filimonov A. S. *Tekhnologiya proizvodstva zhidkostnykh raketnykh dvigateley* (Technology of production of liquid rocket engines). Moscow, MSTU Publ., 2008. 380 p.

5. Belokur I. P., Kovalenko V. A. *Defektoskopiya materialov i izdeliy* (Flaw detection of materials and products). Kiev, Technology Publ., 1989. 192 p.

6. GOST 28517-90. *Kontrol' nerazrushayushchiy. Mass-spektrometricheskii metod techeiskaniya. Obshchie trebovaniya* (Nondestructive testing. Mass spectrometry leak detection. General requirements). Moscow, Standartinform, 2005.

7. Testodov N. A. [et al.] *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* (Production technology of spacecraft.). Krasnoyarsk, SibSAU Publ., 2009. 352 p.

8. Sheshin E. P. *Vakuumnye tehnologii* (Vacuum technology). Dolgoprudnyy, Intellect Publ., 2009. 504 p.

9. Tarasevich R. M. *Metody i sredstva proverki germetichnosti uzlov, otsekov i sistem letatel'nykh apparatov* (Methods and tools for leak testing nodes, compartments and aircraft systems). Moscow, MAI, 1974. 145 p.

10. The Vacuum Technology Book Volume II. Germany, publ. Pfeiffer Vacuum GmbH, 2013. : Available at: <http://www.norm.gr/documents/Vacuum-Technology-Book-II-Part-2.pdf> (accessed 5 December 2013).

11. Romanovskij R. K. *Lektsii po uravneniyam matematicheskoy fiziki. Uravneniya kolebaniy i diffuzii* (Lectures on Differential Equations. Fluctuations and the diffusion equation). Omsk, OmGTU Publ., 2004. 102 p.

12. Dmitriev E. A. *Yavleniya perenosy massy v primerakh i zadachakh* (Mass transfer phenomena in the examples and problems). Moscow, Publ. MUCTR of D.I. Mendeleev, 2005. 120 p.

13. Martinson L. K., Malov Ju. I. *Differentsial'nye uravneniya matematicheskoy fiziki* (Differential equations of mathematical physics). Moscow, MG TU Publ., 1996. 368 p.

14. Farlou S. *Uravneniya s chastnymi proizvodnymi dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Partial Differential Equations for Scientists and Engineers). Moscow, Mir Publ., 1985. 384 p.

15. *Pribory dlya nerazrushayushhego kontrolja materialov i izdelij. Spravochnik*. (Instruments for nondestructive testing of materials and products. Handbook), edited by V. V. Kljuev. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986.

© Кишкин А. А., Колчанов И. П.,
Делков А. В., Ходенков А. А., 2014

УДК 629.78.054:621.396.018

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛИС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОГИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. А. Недорезов¹, А. В. Пичкалев¹, С. С. Красненко¹, О. В. Непомнящий²

¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: nd@iss-reshetnev.ru

²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79. E-mail: 2955005@gmail.com

Описаны способ и устройство для микропрограммной отработки и испытаний радиоэлектронной аппаратуры, основанные на эмуляции логики функционирования объекта испытаний в программируемых логических

интегральных схемах. Рассмотрены способы программной и аппаратной имитации отсутствующих составляющих процесса испытаний. Исследованы особенности разработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с применением технологий имитации аппаратуры. Описан подход к разработке программного обеспечения для поддержки процесса автоматизации отработки и испытаний составляющих космических аппаратов. Предложен инновационный метод мутационного тестирования радиоэлектронной аппаратуры с применением моделирования на основе программируемых логических интегральных схем и языков описания аппаратуры.

Ключевые слова: отработка, испытания, радиоэлектронная аппаратура, моделирование, эмуляция, ПЛИС, наземный отладочный комплекс.

APPLICATION FPGA FOR MODELLING OF LOGIC OF FUNCTIONING OF SPACECRAFT ONBOARD RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

D. A. Nedorezov¹, A. V. Pichkalev¹, S. S. Krasnenko¹, O. V. Nepomnuashy²

¹JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"

52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation

E-mail: nd@iss-reshetnev.ru

²Siberian federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. E-mail: 2955005@gmail.com

The way and the device for microprocessor working off and tests of the radio-electronic equipment, the logicians of functioning of object of tests based on FPGA are described. Software and hardware methods of imitation of test process missing parts are considered. Development features of spacecraft onboard radio-electronic equipment with hardware emulation technologies are investigated. The approach to working out of the software for maintenance of process of automation of working off and tests of making space vehicles is described. The innovational method of Hardware mutation testing with apply of field-programmable gate arrays and hardware description languages is offered.

Keywords: debug, test, radio-electronic equipment, modeling, emulation, FPGA, terrestrial debugging complex.

В современных условиях в отечественной космической промышленности крайне актуальным становится вопрос обеспечения надежности. Для предотвращения и парирования нештатных ситуаций и отказов в ходе эксплуатации космических аппаратов (КА) необходимо особое внимание и уделять наземной отработке и испытаниям, в первую очередь, в области космического приборостроения. В то же время все более жесткие требования предъявляются к срокам выпуска готовой продукции, ввиду чего особенно острой становится проблема скорейшего получения бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и ее лабораторных прототипов для отработки и испытаний ввиду большого объема работ, проводимых разными подразделениями разработчиков. Средством преодоления данных проблем является моделирование объектов отработки и их частей.

Современные методы моделирования РЭА можно условно разделить на программные, аппаратные и аппаратно-программные.

Программные методы дают широкие возможности для математического моделирования самых разнообразных процессов. Но надежность такого моделирования определяется точностью алгоритмов используемых моделей, которые можно проверить только путем длительной эксплуатации и сравнения с функционированием реальной аппаратуры. Процесс мало того, что длительный, так еще и не слишком предсказуемый. Усугубляется это еще и тем, что операционные системы, которые обеспечивают работу программных

сред моделирования, как правило, не поддерживают так называемое реальное время в составе отработочного комплекса, добавляя нюансы собственного функционирования в особенности его работы.

Аппаратные средства, способные функционировать на такой же высокой скорости, как и испытываемая аппаратура, не имея переменной составляющей, не предоставляют необходимой гибкости при конфигурировании. Особенно это сказывается при обнаружении «незадокументированных возможностей» отрабатываемой РЭА, когда срочно требуется поменять условия экспериментальной отработки и изменить условия моделирования.

Наибольшее распространение получили аппаратно-программные средства. Причем среди всех методов моделирования наметилась тенденция на создание многофункциональных сред, позволяющих максимально охватывать процессы отработки и испытаний РЭА. Это обусловлено потребностью в максимальной совместимости составных частей испытаний, что минимизирует трудозатраты и ускоряет отработку.

Также современная отработочная система должна включать хорошо развитое средство формализации логики – максимально простой и функциональный язык описания алгоритмов управления процессом отработки или испытаний. А аппаратная часть, в свою очередь, должна быть как можно более гибкой.

Всем вышеперечисленным условиям отвечает разработанная в ОАО «ИСС» технология, применяемая в наземном отладочном комплексе радиоэлектронной

аппаратуры (НОК РЭА) (рис. 1) – программно-технической системе реального времени, которая включает моделирование объектов обработки и испытаний [1]. В основе технологии моделирования лежит обеспечение функционирования программного обеспечения (ПО) в реальном процессорном модуле РЭА с имитацией для него реальных условий эксплуатации в составе КА. Это достигается эмуляцией обмена в реальном времени по каналам ввода-вывода, через которые объект испытаний соединен с окружающей средой.

Специальная аппаратура отладочного комплекса имитирует процесс штатной эксплуатации [2]. В ее состав входят модули цифрового ввода-вывода, цифроаналоговые преобразователи, аналогово-цифровые преобразователи, специализированные интерфейсные контроллеры, устройства коммутации сигнала, осциллографы, СВЧ-генераторы и т. д. Причем все это оборудование изготовлено в международных магистрально-модульных стандартах PCI или CompactPCI/PCI-X и выпускается серийно, что исключает проблемы совместимости. Высокоскоростные каналы, которые невозможно эмулировать программно, реализуются в специализированных устройствах, содержащих в своем составе программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

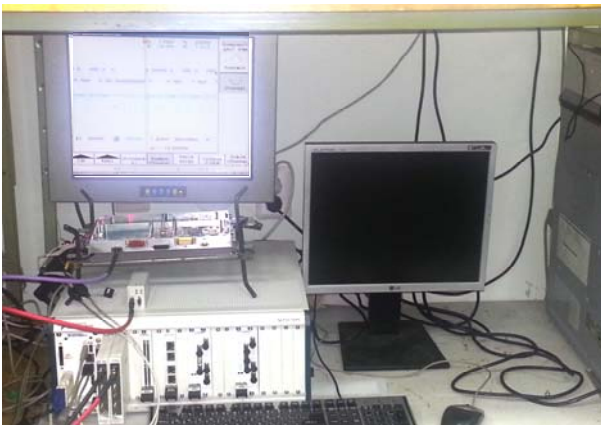


Рис. 1. Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов

Основным вычислительным и управляющим ядром системы является промышленный или персональный компьютер, функционирующий под управлением автоматизированной системы обработки информации и управления (АСОИУ) [3; 4]. АСОИУ комплекса реализована в среде графической разработки ПО National Instruments LabVIEW. Такой подход позволяет выполнять разработку архитектуры и ПО испытательного комплекса, а также выполнять реконфигурацию встроенных однокристальных систем на базе программируемых логических интегральных схем. Таким образом, осуществляется адаптация испытательного комплекса на уровне аппаратных средств для решения текущих задач.

Реконфигурируемая аппаратная часть реализуется на ПЛИС. Логические емкости этих микросхем позволяют реализовывать сложнейшие устройства, мик-

ропроцессорные системы на кристалле, счетчики, таймеры, генераторы импульсов, измерители частотно-временных параметров и импульсных последовательностей, аппаратные вычислительные и коммуникационные устройства и др.

Использование IP-ядра реальной ПЛИС РЭА для эмуляции обмена по соответствующему интерфейсу позволяет попутно провести своеобразное макетирование схемы до изготовления реальных аппаратных средств, что выявляет возможные ошибки как исходных данных на проект ПЛИС, так и их интерпретации разработчиком проекта.

Таким образом, при использовании специальных модулей с ПЛИС в качестве базы для интерфейсов испытательного комплекса остается только формализовать логику поведения объекта контроля. И тогда специальные программные отработочные испытания на базе реализуемых в НОК РЭА математических моделей функциональных блоков, интерфейсных модулей, внешних устройств и приборов, обеспечивающие проверки на все предполагаемые ситуации, способны имитировать различные ситуации работы РЭА для исследования всевозможных отказов, в том числе и проводить анализ ее поведения в различных аварийных ситуациях в процессе эксплуатации КА.

Простота разработки и эффективность НОК РЭА достигаются не только особенностями аппаратной части испытательных комплексов, но и упрощением разработки специального программного обеспечения для них. Данное ПО разрабатывается как на стандартных языках высокого уровня (C++, Pascal и т. п.), так и в LabVIEW. Это позволяет привлекать к разработке ПО как профессиональных программистов, так и непосредственно самих разработчиков РЭА и в значительной мере облегчает их взаимодействие между собой.

Код, разработанный, например, на языке C++, может быть вызван как функция в LabVIEW. Также ПО текстовых языков может взаимодействовать с LabVIEW через файловый обмен. Кроме того, программисты могут разрабатывать типовые конфигурации кодов, которые будут дорабатываться инженерами-конструкторами, обладающими большим пониманием аппаратной части НОК и объектов контроля. Таким образом, происходит поднятие уровня интеграции разработки еще на ступень вверх. Программисты создают объекты, из которых другие инженеры смогут создавать ПО собственной разработки [5].

В состав LabVIEW входит набор функций для работы с ПЛИС (LabVIEW FPGA) и для работы в режиме реального времени (LabVIEW Real time). То есть система объединяет в себе средства разработки ПО высокого уровня, средства программирования ПЛИС и средства реализации режима реального времени. Программное обеспечение делится в этом случае на две составляющих: host и target. Host – управляющая программа, служащая интерфейсом между пользователем и ПЛИС; этот программный модуль располагается в памяти управляющей электронно-вычислительной машины. Target – программный модуль, реализуемый в ПЛИС и управляемый из host. В host реализуется

часть ПО, которая не требует реального времени, работает под управлением обычной операционной системы и реализует основной алгоритм программы. В target же реализованы алгоритмы, к которым предъявляются требования реальных промежутков времени [6].

Поскольку конфигурирование ПЛИС осуществляется при помощи формализованных языков описания аппаратуры, т. е. фактически на языках программирования, следовательно, появляется возможность применения в процессе отработки и испытаний РЭА технологий, традиционно применяемых для тестирования ПО. Для проверки качества тестов и анализа покрытия ими различных некорректных ситуаций используются различные подходы, среди которых можно выделить разрабатываемый метод мутационного тестирования, который основан на включении в код программы на языке описания аппаратуры соответствующих изменений (программных мутаций) [7]. Результаты этих изменений происходят при использовании мутационных операторов, имитирующих типичные ошибки программистов или воздействие окружающей среды на ПЛИС. Такими мутациями могут быть, например, использование неправильной операции или имитация тиристорного эффекта при воздействии ионизирующего облучения. В разрабатываемый код Р вносят изменения (мутации), т. е. искусственно создают программы-мутанты Р1, Р2, Р3 и т. д. Затем программа Р и ее мутанты тестируются на одном и том же наборе тестов. Если на этом наборе тестов подтверждается правильность программы Р и выявляются все ошибки в программах-мутантах, то набор тестов соответствует мутационному критерию, а программа Р объявляется правильной. Если в некоторых мутантах не были выявлены все мутации, то набор тестов рассматривается как недостаточный и требует расширения.

Задачи моделирования высокоскоростной аппаратуры разрешимы и с применением других аппаратно-программных средств, имитирующих логику функционирования разрабатываемой аппаратуры. Например, можно применить микроконтроллеры, также функционирующие на аппаратных скоростях. Но микроконтроллеры все же обладают меньшей гибкостью и не в состоянии изменять структуру как ПЛИС. Микроконтроллеры содержат неконфигурируемые аппаратные составляющие, которые могут стать избыточными при испытаниях, в то же время может не хватить нужных элементов. В ПЛИС же возможно реализовать только те устройства, которые необходимы для стоящих задач.

Технология НОК РЭА является современным решением, позволяющим проводить качественные испытания и отработку бортовой РЭА для КА. Технология применена на практике при создании испытательных комплексов для аппаратуры бортовых комплексов управления всех современных спутников ОАО «ИСС».

Библиографические ссылки

1. Пичкалев А. В. Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения : материалы X Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2010. С. 515–516.

2. Магистрально-модульная система для отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры / С. С. Красненко, Д. А. Недорезов, В. Б. Кашкин, А. В. Пичкалев // Вестник СибГАУ. 2013. № 2 (48). С. 133–136.

3. А. с. о регистрации программы для ЭВМ № 2012660356. Автоматизированная проверка работоспособности модуля релейной коммутации сигнала с регистром изолированного цифрового ввода PCI-7256 / Д. А. Недорезов, А. В. Пичкалев ; дата рег. 16.11.2012.

4. А. с. о регистрации программы для ЭВМ № 2013617243. Автоматизированная проверка работоспособности модуля цифрового ввода-вывода PCI-7396 / Д. А. Недорезов, А. В. Пичкалев ; дата рег. 06.08.2013.

5. Непомнящий О. В., Алекминский С. Ю. Проблемы верификации проекта при сквозном проектировании вычислительных систем на кристалле // Нано- и микросистемная техника/ 2010. № 9 (122). С. 4–7.

6. Недорезов Д. А. Разработка программного обеспечения для испытательных комплексов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Интеллектуальный потенциал XXI века – ступени познания : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. / Центр развития научного сотрудничества. Новосибирск, 2012. С. 182–187.

7. Непомнящий О. В., Хныкин А. В., Мамбеталиев Н. А. Однокристалльные вычислительные системы ответственного применения // Исследования наукограда. 2013. № 2 (4) С. 54–57.

References

1. Pichkalev A. V. [The terrestrial debugging complex for onboard radio-electronic equipment]. *Materialy 10 Mezhdunarodnoj nauchoj konferencii "Reshetnevskie chtenija"* (Proceedings 10th International scientific conference "Reshetnev readings"). Krasnoyarsk, 2010, p. 515–516.

2. Krasnenko S. S., Nedorezov D. A., Kashkin V. B., Pichkalev A. V. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 2 (48), p. 133–136.

3. Nedorezov D. A., Pichkalev A. V. Certificate of software registration № 2012660356, 16th November 2012.

4. Nedorezov D. A., Pichkalev A. V. Certificate of software registration №2013617243, 6th August 2013.

Nepomnyashcy O. V., Alekminsky S. U. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. Moscow, 2010, no. 9 (122), p. 4–7.

5. Nedorezov D. A. [Software development for terrestrial debugging complexes of onboard radio-electronic equipment]. *Intellectual'nyj potencial XXI veka – stupeni poznaniya: materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* (Proceedings 10th International scientific conference "Intellectual potential of the 21st century – level of cognition"). Novosibirsk, 2012, p. 182–187.

6. Nepomnyashcy O. V., Hnukin A. V., Mambetaliev N. A. *Issledovaniya Naukograda*. 2013, no. 2 (4), p. 54–57.

© Недорезов Д. А., Пичкалев А. В.,
Красненко С. С., Непомнящий О. В., 2014

УДК 629.78.018:681.5

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕПЛО ВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А. В. Шевляков¹, И. А. Выхристюк¹, А. Г. Верхогляд¹, В. И. Халиманович², В. В. Христич²

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН)
Российская Федерация, 630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41.
E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

² ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52
E-mail: office@iss-reshetnev.ru

Тепловакуумные испытания являются важной составляющей предполетной отработки космических аппаратов. Представлена система управления тепловыми потоками при проведении тепловакуумных испытаний с количеством контрольных точек до 750 и управляющих воздействий до 380 (каналов). Она обеспечивает анализ нештатных ситуаций и автоматическое управление алгоритмом испытаний, контролирует температуру различных точек изделия в диапазоне от -150 до $+150$ °C. Представлен разработанный алгоритм автоматического вывода испытываемого объекта на заданное температурное распределение. Результаты опытных испытаний алгоритма свидетельствуют о его работоспособности.

Ключевые слова: космический аппарат, предполетные испытания, тепловакуумные испытания, автоматизация.

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF HEAT FLUXES AT THERMOVACUUM TESTING OF SPACECRAFTS

A. V. Shevlyakov¹, I. A. Vykhristyuk¹, A. G. Verkhoglyad¹,
V. I. Khalimanovich², V. V. Hristich²

¹Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (TDI SIE SB RAS),
41, Russkaya str., Novosibirsk, 630058, Russian Federation
E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

²JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev"
52, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662971, Russian Federation
E-mail: office@iss-reshetnev.ru

Thermovacuum tests are an important component for preflight of spacecrafts working off. Control system of heat fluxes at thermovacuum tests with quantity of control points up to 750 and operating influences up to 380 (channels) is reported. This system provides the analysis of emergency situations and automatic control of testing algorithm, as well as, supports the temperature of article various points in the range from -150 up to $+150$ °C. Algorithm for automatic obtaining specified temperature distribution is presented. Results of pilot tests of algorithm testify to its working capacity.

Keywords: spacecraft, preflight tests, thermovacuum test, automation.

Современная стратегия экспериментальной отработки космических аппаратов (КА) основывается преимущественно на наземной отработке систем и частей КА. При этом имитация штатных условий эксплуатации производится в наиболее полном возможном объеме [1]. Тепловакуумные испытания (ТВИ) являются важной составляющей предполетной отработки КА [2]. Во время ТВИ имитируются такие условия космоса, как вакуум, солнечный поток, резкие перепады температуры по поверхности КА.

Современные системы для проведения ТВИ имеют возможность использования сотен устройств подвода

мощности (УПМ) и датчиков температуры, что делает необходимым автоматизацию задачи получения определенного температурного режима на испытываемом КА.

Представленная система предназначена для проведения различных тепловакуумных испытаний с количеством контрольных точек до 750 и управляющих воздействий до 380 (каналов). Работы по разработке автоматизированной системы велись в рамках создания горизонтальной вакуумной установки ГВУ-600 для ОАО «ИСС» имени академика М. Ф. Решетнева». Система осуществляет автоматическое управление ходом испытаний в крупноразмерной горизонтальной

вакуумной камере ГВУ-600 с объёмом более 600 м³ (рис. 1), обеспечивает анализ нештатных ситуаций и автоматическое управление алгоритмом испытаний, контролирует температуру различных точек изделия в диапазоне от –150 до +150 °С, позволяет проводить в автоматическом режиме один из видов тепловакуумных испытаний: термобалансные или термостатические.

Термобалансные испытания подразумевают подачу постоянной мощности независимо от температуры либо релейное управление мощностью в заданном температурном диапазоне.

Термостатические (термоциклические) тепловакуумные испытания заключаются в последовательном выводе испытываемого КА на определенные температурные режимы (ТР) и поддержание заданных ТР в течение требуемого времени. Под температурным режимом подразумевается такое состояние объекта, при котором температура, измеряемая в контролируемых точках, существенно не меняется со временем.



Рис. 1. Крупноразмерная горизонтальная вакуумная камера ГВУ-600 с объёмом более 600 м³

Задача получения заданного температурного режима. Сложность проведения испытаний заключается в том, что любой источник тепла в общем случае оказывает влияние на любую точку объекта, вызывая изменение температуры на ней. Поэтому практически невозможно перейти к конечному числу одноконтурных регуляторов.

В общем случае существует N управляемых УПМ и T датчиков, фиксирующих температуру в интересующих точках испытываемого изделия. Влияние изменения подводимой мощности на изменение температуры в каждой точке неизвестно.

$F(n_1, n_2, \dots, n_N) = (t_1, t_2, \dots, t_T)$ – неизвестная зависимость ТР от значений подводимых мощностей.

Входными данными являются: исходный ТР $(t_1^{[0]}, t_2^{[0]}, \dots, t_T^{[0]})$, исходное значение подводимых мощностей $(n_1^{[0]}, n_2^{[0]}, \dots, n_N^{[0]})$, требуемый ТР $(\tilde{t}_1^{[L]}, \tilde{t}_2^{[L]}, \dots, \tilde{t}_T^{[L]})$ и точность δt получения ТР. Искомым является вектор значений подводимых мощностей $(n_1^{[L]}, n_2^{[L]}, \dots, n_N^{[L]})$, при котором получается ТР $(t_1^{[L]}, t_2^{[L]}, \dots, t_T^{[L]})$, отличающийся от требуемого не более чем на величину δt в каждой контролируемой точке:

$$F(n_1^{[L]}, n_2^{[L]}, \dots, n_N^{[L]}) = (t_1^{[L]}, t_2^{[L]}, \dots, t_T^{[L]}), \\ \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad |\tilde{t}_i^{[L]} - t_i^{[L]}| \leq \delta t.$$

Алгоритм управления тепловыми потоками. Решение задачи основано на нахождении приращения F в текущей точке, при изменении мощности на каждом УПМ на известную величину $\Delta n_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}$, и вычислении вектора коэффициентов $(k_1, k_2, \dots, k_N)$ в предположении, что F локально линейна, а точнее, что

$$F(n_1 + k_1 \Delta n_1, n_2 + k_2 \Delta n_2, \dots, n_N + k_N \Delta n_N) - F(n_1, n_2, \dots, n_N) = \\ = k_1 \cdot (F(n_1 + \Delta n_1, n_2, \dots, n_N) - F(n_1, n_2, \dots, n_N)) + \\ + k_N \cdot (F(n_1, n_2, \dots, n_N + \Delta n_N) - F(n_1, n_2, \dots, n_N)). \quad (1)$$

Реализация алгоритма состоит в последовательном изменении мощности на каждом УПМ на известную величину и ожидании выхода системы на ТР. Для ожидания ТР используется три параметра – время ожидания реакции системы, время ожидания баланса и допуск на баланс. Время реакции системы определяет интервал, в течение которого после изменения мощности не контролируется выход на ТР. Допуск на баланс задает минимальное отклонение температуры в любой контролируемой точке за время, меньшее времени ожидания баланса, при котором констатируется температурная нестабильность системы. Ожидание ТР заканчивается, если за время ожидания баланса температура во всех точках изменилась на величину, не превышающую допуска на баланс.

После получения ТР для текущего УПМ мощность на нем возвращается в исходное состояние и меняется мощность следующего. В результате этого процесса получается набор ТР:

$$F(n_1^{[0]} + \Delta n_1, n_2^{[0]}, \dots, n_N^{[0]}) = (t_1^{[1]}, t_2^{[1]}, \dots, t_T^{[1]}) \\ \dots \\ F(n_1^{[0]}, n_2^{[0]} + \Delta n_N, \dots, n_N^{[0]}) = (t_1^{[N]}, t_2^{[N]}, \dots, t_T^{[N]}), \quad (2)$$

где $t_j^{[i]}$ – температура, зарегистрированная на j -м датчике при изменении мощности на i -м УПМ. Из (1) и (2) получаем систему из T уравнений с N неизвестными:

$$\begin{pmatrix} t_1^{[1]} - \tilde{t}_1^{[L]} & t_1^{[2]} - \tilde{t}_1^{[L]} & \dots & t_1^{[N]} - \tilde{t}_1^{[L]} \\ t_2^{[1]} - \tilde{t}_2^{[L]} & t_2^{[2]} - \tilde{t}_2^{[L]} & \dots & t_2^{[N]} - \tilde{t}_2^{[L]} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_T^{[1]} - \tilde{t}_T^{[L]} & t_T^{[2]} - \tilde{t}_T^{[L]} & \dots & t_T^{[N]} - \tilde{t}_T^{[L]} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1^{[0]} - \tilde{t}_1^{[L]} \\ t_2^{[0]} - \tilde{t}_2^{[L]} \\ \vdots \\ t_T^{[0]} - \tilde{t}_T^{[L]} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

После успешного решения системы (3) [3] значение подводимых мощностей устанавливается в

$$\begin{aligned} & (n_1^{[L]}, n_2^{[L]}, \dots, n_N^{[L]}) = \\ & = (n_1^{[0]} + k_1 \Delta n_1, n_2^{[0]} + k_2 \Delta n_2, \dots, n_N^{[0]} + k_N \Delta n_N) \end{aligned}$$

и ожидается выход системы на ТР $(t_1^{[L]}, t_2^{[L]}, \dots, t_T^{[L]})$.

В общем случае (исходя из практического предположения, что $T \geq N$) система (3) переопределена, т. е. любое решение имеет невязку, которая связана с нелинейностью F , неточностью определения выхода системы на ТР, а также с погрешностью измерения температуры, нелинейностью УПМ и неконтролируемым подводом мощности. Еще одним фактором, влияющим на наличие и величину невязки, является теоретическая достижимость требуемого ТР. Система датчиков и УПМ может быть сконфигурирована так, что запрашиваемый ТР не может быть получен ни при каких значениях мощностей.

Невязку, вызванную нелинейностью F , можно уменьшать путем последовательного применения вышеописанного алгоритма, добываясь на каждом этапе минимизации невязки и беря в качестве исходного состояния для следующего этапа состояние, полученное на текущем.

Результаты. Нами проведены опытные испытания алгоритма управления. В результате получены данные, подтверждающие работоспособность алгоритма.

В эксперименте было задействовано семь каналов мощности (рис. 2) и пять контрольных точек измерения температуры (рис. 3). В соответствии с регламентом описанного выше алгоритма сначала было проведено последовательное изменение мощности на каждом УПМ на известную величину с ожиданием выхода системы на ТР. После получения ТР для текущего УПМ мощность на нем возвращалась в исходное состояние и менялась мощность следующего (правая часть графиков на рис. 2 и 3 до времени 16.00). Затем в соответствии с (3) устанавливались вычисленные значения подводимых мощностей и ожидался выход системы на ТР (правая часть графиков на рис. 2 и 3 после времени 16.00). Как видно из этих рисунков, выход на заданный ТР успешно осуществлен в автоматическом режиме.

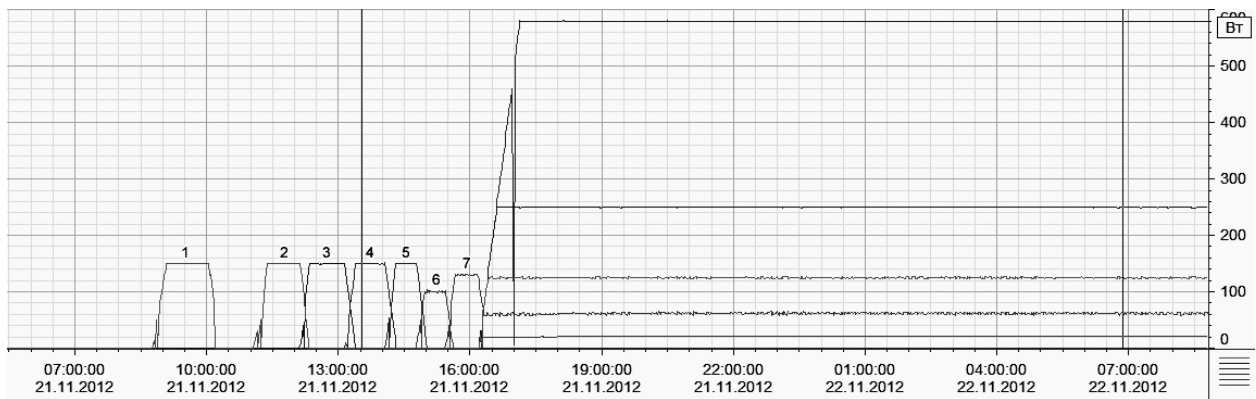


Рис. 2. Графики зависимости мощности от времени для семи УПМ, участвующих в эксперименте по проверке действия алгоритма

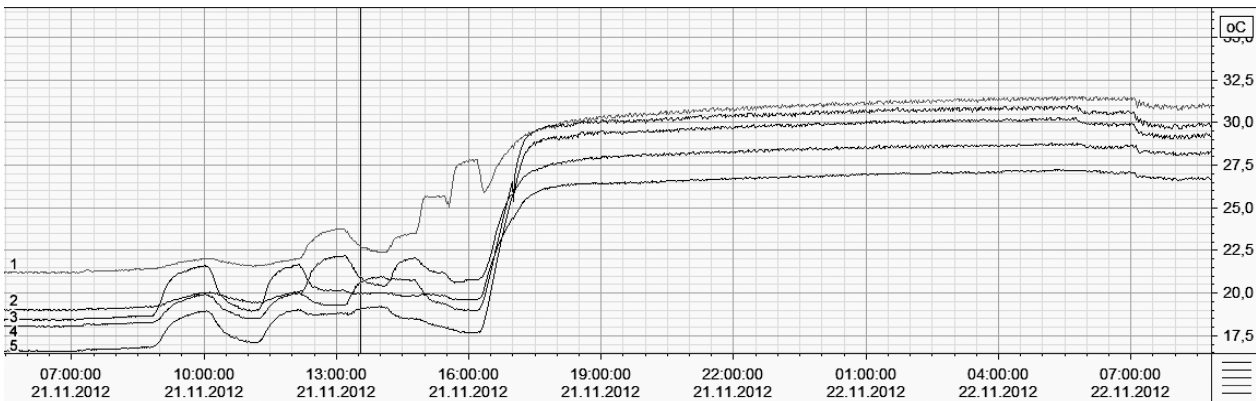


Рис. 3. Графики зависимости температуры от времени для пяти контролируемых точек, используемых в эксперименте по проверке действия алгоритма

В работе представлена система управления тепловыми потоками при проведении тепловакуумных (термобалансных или термостатических) испытаний космических аппаратов с количеством контрольных точек до 750 и управляющих воздействий до 380 (каналов). Она обеспечивает анализ нештатных ситуаций и автоматическое управление алгоритмом испытаний, контролирует температуру различных точек изделия в диапазоне от -150 до $+150$ °С. Приведен разработанный алгоритм автоматического вывода испытываемого объекта на заданное температурное распределение. Результаты опытных испытаний алгоритма свидетельствуют о его работоспособности.

Библиографические ссылки

1. Александровская Л. Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем. М. : Логос, 2003. 736 с.
2. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В. А. Афанасьев [и др.] ; под ред. Н. В. Холодкова. М. : Изд-во МАИ, 1994. 210 с.

3. Калиткин Н. Н. Численные методы. М. : Наука, 1978. 512 с.

References

1. Aleksandrovskaya L. N. *Teoreticheskiye osnovy ispitaniy i eksperimental'naya otrabotka slozhnykh tekhnicheskikh sistem* (Theoretical bases of testing of sophisticated technical systems and their experimental working off). Moscow, Logos Publ., 2003. 736 p.
2. Afanasiev V. A., Barsukov V. S., Gofin M. Ya., Zaharov Yu. V., Strelchenko A. N., Shalunov N. P. *Eksperimental'naya otrabotka kosmicheskikh letatel'nykh apparatov* (Experimental working off for space aircrafts). Edited N. V. Kholodkova. Moscow, MAI Publ., 1994. 210 p.
3. Kalitkin N. N. *Chislennyye metody* (Numerical methods). Moscow, Nauka Publ., 1978. 512 p.

© Шевляков А. В., Выхристюк И. А.,
Верхогляд А. Г., Халиманович В. И.,
Христич В. В., 2014

РАЗДЕЛ
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И МАТЕРИАЛЫ

СЛЕЖЕНИЕ ЗА СТЫКОМ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ В АТМОСФЕРЕ

В. Я. Браверман, Т. Г. Вейсвер, В. С. Белозерцев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: braverman-vladimir@rambler.ru

Рассматриваются методы позиционирования луча по стыку при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) разнородных материалов в атмосфере. При ЭЛС в атмосфере традиционные способы автоматического наведения луча на стык оказываются неприемлемыми из-за значительного рассеяния электронов и невозможности отклонения луча в объеме электронно-лучевой пушки в связи со шлюзовой конструкцией последней. Для осуществления слежения за стыком используют магнитные поля токов в деталях, образованных током луча. При ЭЛС однородных материалов результирующее магнитное поле токов пропорционально смещению луча относительно стыка. При ЭЛС разнородных материалов поле отлично от нуля при нахождении луча на стыке. Предлагается метод компенсации погрешности совмещения луча со стыком.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, ток электронного луча, магнитное поле токов в деталях, отклонение луча, стык свариваемых деталей.

SEAM TRACKING DURING ELECTRON BEAM WELDING IN AIR

V. Ya. Braverman, T. G. Veisver, V. S. Belozertsev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: braverman-vladimir@rambler.ru

We study the methods of beam positioning at the joint during the Electron Beam Welding of dissimilar materials in the air. Traditional methods of automatic beam positioning at the joint are unacceptable in this type of welding because of the significant dispersion of electrons and the impossibility of the beam deviation inside the electron beam gun due to presence of an airlock. Magnetic fields of the current in the welded parts created by the beam's current are used to monitor the joint. During the electron beam welding of similar materials, the resulting magnetic field of the currents is proportional to the beam movement relative to the joint. However, this proportional relation no longer applies during the electron beam welding of dissimilar materials. We are proposing a method to compensate for the error in aligning the beam with the joint.

Keywords: electron beam welding, electron beam current, magnetic field of the current in welded parts, beam deviation, joint of the welded part.

При электронно-лучевой сварке (ЭЛС) в атмосфере традиционные способы автоматического позиционирования луча по стыку свариваемых деталей оказываются неприемлемыми из-за сильного рассеяния электронов в воздухе и невозможности отклонения электронного луча в объеме электронно-лучевой пушки в связи со шлюзовой конструкцией последней. Для осуществления слежения за стыком в процессе ЭЛС предлагается использовать магнитные поля токов в деталях, образованных током электронного луча [1].

При различных положениях луча относительно стыка происходит перераспределение составляющих сварочного тока (тока луча) и вызванных ими магнитных полей (рис. 1). В результате появляются составляющие магнитного поля, несущие информацию о положении луча относительно стыка.

Ток луча $I_{\text{л}}$ с помощью токосъемов разделяется на две составляющие I_1 и I_2 . Если луч расположен точно

над стыком, то напряженности магнитных полей H_1 и H_2 (в том числе их вертикальные составляющие $H_{1\text{В}}$ и $H_{2\text{В}}$) равны по величине и направлены противоположно (рис. 1, а). Результирующее магнитное поле в этом случае определяется током луча $I_{\text{л}}$, а вектор напряженности этого поля $H_{\text{л}}$ расположен в горизонтальной плоскости.

При отклонении луча от стыка (рис. 1, б) на пути составляющей I_2 тока луча $I_{\text{л}}$ оказывается заваренный участок, и напряженность магнитного поля, вызванного током I_2 изменится на величину ΔH , обусловленную прохождением тока I_2 по этому участку. Результирующее магнитное поле определяется вертикальной составляющей напряженности ΔH и горизонтальной составляющей $H_{\text{л}}$. При отклонении луча в противоположную сторону заваренный участок оказывается на пути тока I_1 , и напряженность магнитного поля, вызванного током I_1 , изменится на величину $-\Delta H$, обу-

словленную прохождением тока I_1 по этому участку. Результирующее магнитное поле определяется вертикальной составляющей напряженности $-\Delta H$ и горизонтальной составляющей $H_{св}$. Таким образом, вертикальная составляющая магнитного поля несет информацию о положении луча относительно стыка. Если для измерения магнитного поля применять, например, дифференциальный феррозонд [2], ось чувствительности которого расположена в вертикальной плоскости, то можно формировать сигнал, пропорциональный смещению луча со стыка и использовать его для коррекции положения луча.

Аналитическое определение зависимости напряженности магнитного поля от величины отклонения луча от стыка осуществлено на трехмерной модели, отражающей процесс ЭЛС с позиции «электромагнитных» свойств около лучевого пространства, ограниченного в плоскости свариваемых деталей.

Моделирование состояло в совместном решении уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial D}{\partial t}, \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \text{div} \vec{D} = \rho, \text{div} \vec{B} = 0, \\ D = \epsilon_0 \epsilon E; B = \mu_0 \mu H; j = \gamma E, \end{cases}$$

где E – напряженность электрического поля; D – поле смещения (электрический поток); H – напряженность магнитного поля; j – плотность тока; ρ – плотность объемного заряда; B – магнитная индукция; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; γ – электрическая проводимость; ϵ_0 – электрическая постоянная; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Расчет проведен в пакете программ Comsol Multiphysics.

На рис. 2 приведены результаты расчета при сварке деталей из сплава АМг-6 толщиной $\delta = 10$ мм при $I_{л} = 300$ мА и скорости сварки $V_{св} = 40$ м/ч. Видно, что при отсутствии смещения луча распределение составляющих сварочного тока I_1 и I_2 симметрично относительно линии стыка (рис. 2, а). При отклонении луча от стыка симметрия нарушается (рис. 2, б).

Обоснована возможность определения положения электронного луча относительно стыка по распределению магнитного поля токов, протекающих по свариваемым деталям при ЭЛС без ограничений, связанных с необходимостью использования специальных токоподводов.

Магнитное поле в околоручевой зоне создается в основном полем токов в свариваемом изделии, а также намагниченностью изделия и оснастки и магнитным полем Земли. Если луч расположен точно над стыком (рис. 3, а), то напряженности магнитных полей (в том числе их вертикальные составляющие H_{z1} и H_{z2}), вызванные элементарными токами I_1 и I_2 , равны по величине и направлены противоположно:

$$H_{z1} - H_{z2} = 0.$$

При отклонении луча от стыка (рис. 3, б) на пути элементарного тока I_2 оказывается заваренный участок, и напряженность магнитного поля, вызванного током I_2 , станет больше на величину ΔH , обусловленную прохождением элементарного тока I_2 по этому участку. Результирующее магнитное поле будет определяться вертикальной составляющей напряженности ΔH .

Установлена зависимость вертикальной составляющей магнитного поля от токов при отсутствии ограничений, связанных с необходимостью применения специальных токоподводов. Это подтверждено расчетами путем численного моделирования сварки на основе уравнений Максвелла в пакете программ Comsol Multiphysics.

Получение частного решения соответствующей краевой задачи осуществлялось путем ее конечно-элементной аппроксимации заданной точности с последующим применением итерационного метода. Расчет проведен при варьировании смещения электронного луча, превышения кромок, при сварке разнородных материалов (алюминий, сталь и медь), при разнице размеров деталей, при наличии прихваток в условиях локального термического равновесия в зоне термического влияния.

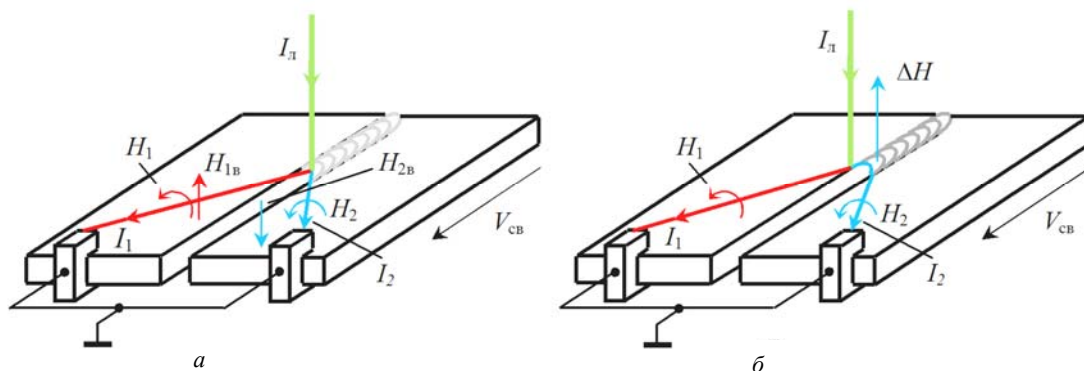


Рис. 1. Схема возникновения вертикальной составляющей магнитного поля ΔH при отклонении луча от стыка

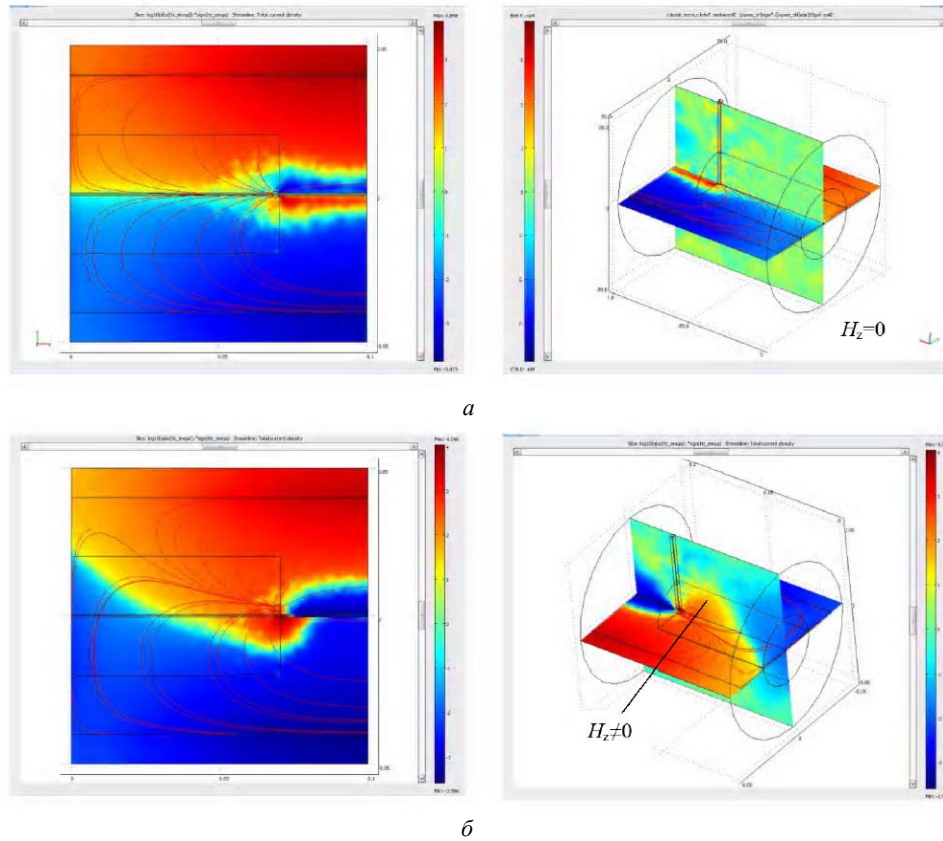


Рис. 2. Распределение токов и магнитных полей: $H(z)$ – вертикальная составляющая магнитного поля; а – смещение луча нет; б – луч смещен относительно стыка на 0,5 мм

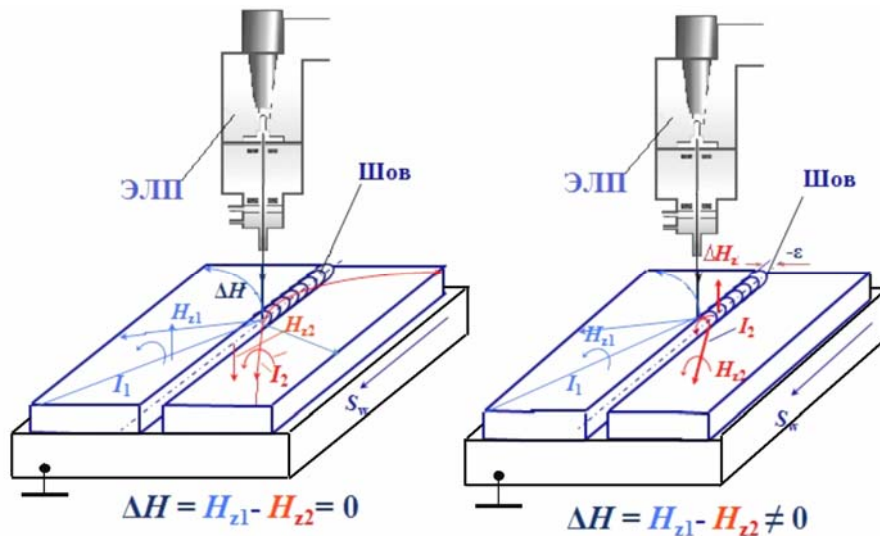


Рис. 3. Способ определения отклонения электронного луча от стыка без специальных токоподводов

На рис. 4 представлены результаты расчетов для сварки деталей из АМг-6 толщиной 10 мм при токе луча 0,1 А, ускоряющем напряжении 175 кВ. По условиям моделирования задано, что токоподводом является металлическая плита, на которой находятся свариваемые детали. При совпадении электронного луча со стыком при сварке идентичных деталей распределение полей симметрично относительно стыка изделия.

При ЭЛС разнородных материалов распределение токов меняется из-за разницы сопротивлений и магнитной проницаемости материалов. В результате при отсутствии отклонения луча от стыка имеется вертикальная составляющая магнитного поля (рис. 5).

Для правильной работы системы управления необходимо задать корректирующую уставку для компенсации сигнала на входе системы при нахождении луча на стыке. Эта уставка суммируется с входным сигналом.

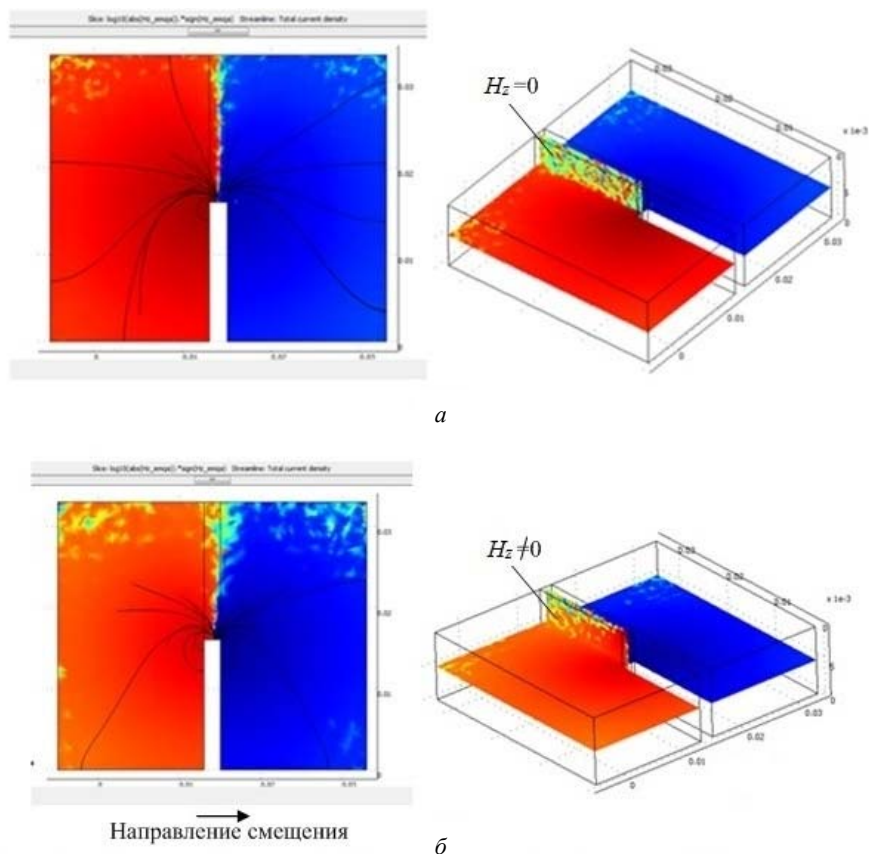


Рис. 4. Распределение токов и магнитных полей в изделии при электронно-лучевой сварке идентичных деталей:
 а – смещения луча нет; б – луч смещен вправо на 0,5 мм

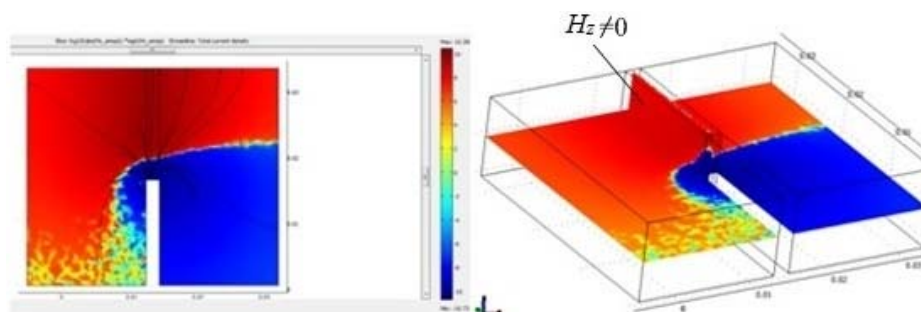


Рис. 5. Распределение токов и магнитных полей в изделии при электронно-лучевой сварке разнородных металлов без смещения: сталь (слева), медь (справа)

Вертикальная составляющая магнитного поля ΔH , в соответствии с принципом суперпозиции и законом Био-Савара–Лапласа, рассчитывается путем интегрирования длин радиусов-векторов, соединяющих точку измерения с последовательно расположенными точками вдоль детали, по расстоянию от точки измерения до границ деталей. При идентичности размеров, конфигурации и материалов свариваемых деталей выражение для ΔH имеет вид

$$\Delta H = \frac{I}{4\pi l} \frac{\varepsilon}{\sqrt{h^2 + l^2 + 4l\varepsilon + 4\varepsilon^2}},$$

где I – ток луча; l – ширина деталей; ε – величина смещения электронного луча от стыка; h – высота

расположения датчика над плоскостью свариваемых деталей.

Видно, что зависимость ΔH от ε в некотором диапазоне смещений линейна.

На рис. 6 представлена функциональная схема устройства для автоматического наведения луча на стык при ЭЛС в атмосфере.

В качестве датчика рассогласования положений луча и стыка использован дифференциальный феррозонд [2]. Для повышения помехозащищенности системы сигнал рассогласования положений луча и стыка формируется на боковой частоте $(2\omega + \Omega)$, где ω – частота возбуждения феррозонда, Ω – частота модуляции тока электронного луча. Для этого выход измерительной

обмотки ($W_{\text{и}}$) феррозонда подключен к избирательному усилителю (ИУ), настроенному в резонанс на частоту ($2\omega + \Omega$). Далее сигнал преобразуется демодулятором (ДМ), опорный вход которого подключен к генератору ($2\omega + \Omega$). После фильтрации (фильтром Ф) постоянное напряжение, пропорциональное рассогласованию положений луча и стыка, через усилитель (У) поступает на вход привода (П) перемещения электронно-лучевой пушки (ЭЛП), которая перемещается (вместе с лучом) до устранения рассогласования.

В устройство введен канал компенсации постоянных и медленно меняющихся магнитных полей (H_0) в объеме феррозонда. Эти поля могут быть вызваны намагниченностью свариваемых деталей, оснастки и могут привести к насыщению сердечников феррозонда. При возникновении этих полей в спектре сигнала измерительной обмотки ($W_{\text{и}}$) появляется составляющая с частотой 2ω , амплитуда которой пропорциональна величине поля, а фаза определяет направление поля. Эта составляющая выделяется избирательным усилителем, настроенным в резонанс на частоту 2ω .

Затем сигнал выпрямляется демодулятором, опорный вход которого подключен к генератору частоты 2ω и через фильтр и усилитель в виде напряжения постоянного тока поступает в компенсационную обмотку ($W_{\text{к}}$), в которой формируется магнитное поле ($H_{\text{к}}$), компенсирующее действие внешних полей (H_0) в объеме феррозонда.

Сигнал модуляции тока электронного луча с частотой Ω формируется смесителем (СМ), на входы которого поступают сигналы с генераторов частот 2ω и ($2\omega + \Omega$). Сигнал возбуждения феррозонда формируется делителем частоты на 2, вход которого связан с выходом генератора частоты 2ω . Сигнал возбуждения подается на обмотку возбуждения $W_{\text{в}}$ феррозонда.

Устройство испытано на электронно-лучевой установке ЭЛУ-9Б с энергокомплексом ЭЛА 60/15. Погрешность совмещения луча со стыком не превышала 0,3 мм, что оказывается вполне приемлемым для ЭЛС в атмосфере.

На рис. 7 представлены макрошрифты соединений, полученных при слежении за стыком и без слежения.

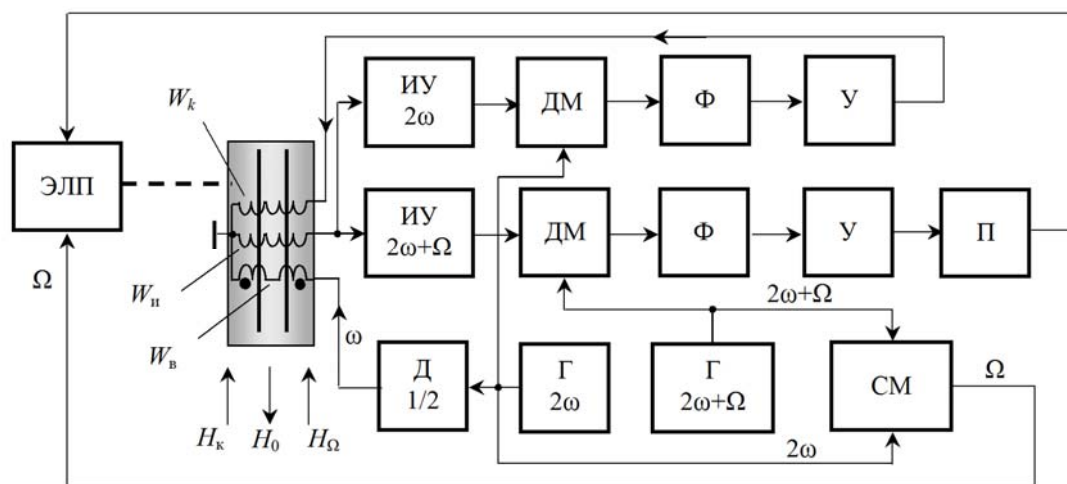


Рис. 6. Функциональная схема системы автоматического наведения луча на стык

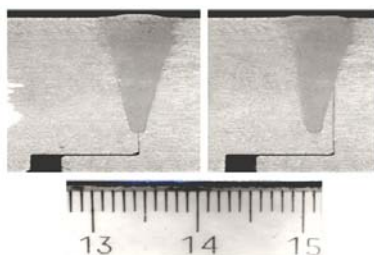


Рис. 7. Образцы швов, полученные при ЭЛС деталей из АМГ-6 с наведением луча на стык (слева) и без наведения (справа)

В результате проведенных исследований установлено, что вертикальная составляющая магнитного поля токов в деталях несет информацию о положении луча относительно стыка, позволяет контролировать фактическое положение луча и корректировать с помощью системы автоматического управления.

Библиографические ссылки

1. Браверман В. Я., Белозерцев В. С. Устройство для слежения за стыком свариваемых деталей с датчиком магнитного поля // Вестник СибГАУ. 2008. № 3 (20). С. 106–108.
2. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. Л.: Энергия, 1969. 168 с.

References

1. Braverman V. Ya., Belozrtsev V. S. *Vestnik SibGAU*. 2008. № 3 (20), p. 106–108.
2. Afanasyev Yu. V. *Ferrozondy* (Flux gates). Leningrad, Energiya Publ., 1969. 168 p.

© Браверман В. Я., Вейсвер Т. Г., Белозерцев В. С., 2014

УДК 621.317.444

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ МАГНИТОМЕТР С ЭЛЕКТРОМАГНИТОМ КОНСТРУКЦИИ ПУЗЕЯ

Д. А. Великанов

Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: dponal@gmail.com

Описан вибрационный магнитометр, предназначенный для исследования статических магнитных свойств разнообразных твёрдых образцов в магнитных полях до ± 25 кЭ. Источником магнитного поля служит электромагнит конструкции И. М. Пузея. Температура исследуемого образца изменяется в диапазоне 77–370 К с помощью проточного криостата. Магнитные измерения проводятся прямым методом. Механические колебания образца создаются вибратором оригинальной конструкции, относительная нестабильность амплитуды колебаний составляет 10^{-4} , а частоты – 10^{-5} . Регистрация полезного сигнала осуществляется системой из четырёх приёмных катушек. Вибрационный магнитометр позволяет снимать магнитопольевые, температурные и угловые зависимости магнитного момента. Динамический диапазон прибора составляет $5 \cdot 10^{-6}$ –100 Гс·см³.

Ключевые слова: вибрационный магнитометр, электромагнит, вибратор, криостат, магнитный момент, динамический диапазон.

AUTOMATED VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER WITH PUZEY ELECTROMAGNET

D. A. Velikanov

Institute of Physics named after L. V. Kirensky, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: dponal@gmail.com

Vibrating sample magnetometer to study the static magnetic properties of various solid samples in magnetic fields up to ± 25 kOe is described. The source of the magnetic field is an electromagnet designed by I. M. Puzey. The temperature of the investigated sample varies from 77–370 K by flow cryostat. Magnetic measurements were performed by the direct method. Mechanical vibrations of the sample are created by a vibrator of the original design. The relative instability of the oscillation amplitude is 10^{-4} , and frequency – 10^{-5} . Registration of useful signal is carried out by the system consisting of four pickup coils. The vibrating sample magnetometer allows to receive the magnetic-field, temperature and angular dependencies of the magnetic moment. The dynamic range of the device is $5 \cdot 10^{-6}$ –100 emu.

Keywords: vibrating sample magnetometer, electromagnet, vibrator, cryostat, magnetic moment, dynamic range.

Среди различных методов магнитных измерений (рис. 1) метод вибрационного магнитометра, относящийся к индукционному типу, занимает достойное место, уступая по чувствительности лишь СКВИД-магнитометрам (эффект Джозефсона) [1; 2] и магнитометрам, основанным на «оптической накачке» атомов в магнитном поле (эффект Зеемана) [3; 4].

Действительно, СКВИД-магнитометры на сегодняшний день наиболее чувствительные приборы: энергетическое разрешение достигает $5 \cdot 10^{-33}$ Дж/Гц, чувствительность по магнитному полю составляет $\sim 10^{-14}$ Тл, а по магнитному моменту $\sim 10^{-8}$ Гс·см³ (emu). Благодаря этому они находят всё более широкое при-

менение в физическом эксперименте. Тем не менее, эксплуатация СКВИДов сопряжена с существенными неудобствами: прежде всего, их работоспособность всецело зависит от наличия криообеспечения; предъявляются повышенные требования к стабилизации магнитного поля и качеству экранирования как измерительной ячейки, так и самого СКВИДа; необходимо периодически откачивать газы из сосудов Дьюара; высока стоимость получения жидкого гелия.

Что касается магниточувствительных датчиков с оптической накачкой, они весьма удобны с точки зрения эксплуатации, имеют высокую чувствительность, сравнительно небольшие размеры, хорошо ра-

ботаю при комнатных температурах. Правда, существуют некоторые особенности их применения. Так, в частности, для их работы требуется постоянное магнитное поле, величину которого обычно выбирают сравнимой с величиной геомагнитного поля Земли. Магнитометры на эффекте Зеемана оптимальны при изучении топологии магнитных полей и решении сопряжённых с этим задач.

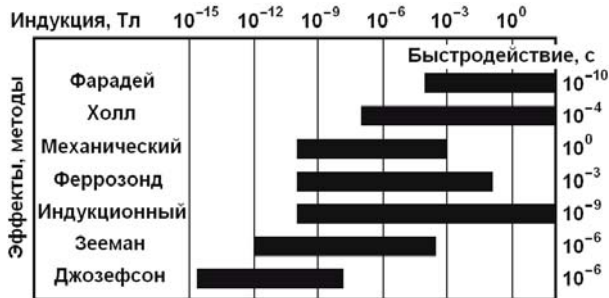


Рис. 1. Методы магнитометрии

В настоящее время постоянно растущий объём исследований магнитных свойств новых материалов делает актуальным наличие относительно недорогих в эксплуатации и в то же время неприхотливых, надёжных и эффективных средств измерений магнитного момента.

Индукционные датчики содержат в качестве чувствительного элемента катушку. При этом выходным сигналом является ЭДС, пропорциональная производной dB/dt . Если же измеряемое магнитное поле B постоянно, то ЭДС возникает за счёт изменения во времени эффективной площади контура S и пропорциональна dS/dt . Такие датчики обладают высокой чувствительностью до 0,1 нТл и очень широким динамическим диапазоном. Для измерения магнитных полей их используют редко из-за недостаточной помехоустойчивости, зато при исследовании магнитного момента они используются очень широко. Как правило, осуществляется механическое перемещение исследуемого образца относительно одной или нескольких приёмных катушек, при этом поле диполя, создаваемое образцом, наводит в витках катушек ЭДС, пропорциональную величине магнитного момента образца.

Первое краткое сообщение о разработке аппаратуры для измерения статической намагниченности путём передвижения образца относительно неподвижной приёмной цепи датируется 1951 годом [5]. Установка предназначалась для исследования редкоземельных элементов, а также образцов железа в слабых полях до 10 Э при комнатной температуре.

Своё развитие метод получил при создании магнитометра с вибрирующей катушкой. Подобный подход оправдан в тех случаях, когда по какой-либо причине затруднительно привести в колебательное движение сам образец, например, при изучении влияния гидростатического давления на магнитные свойства образцов [6] либо при проведении магнитных измерений при

сверхнизких температурах [7]. Основная проблема в данном случае заключается в появлении в катушке паразитного сигнала, обусловленного неоднородностью намагничивающего поля. В результате чувствительность магнитометров с вибрирующей катушкой ограничена значением порядка 10^{-4} Гс·см³. Кроме того, уровень полезного сигнала очень сильно зависит от взаиморасположения катушки и образца, что негативно сказывается на точности и повторяемости измерений.

От указанных недостатков в значительной степени свободен магнитометр с вибрирующим образцом и неподвижными приёмными катушками, такой магнитометр был разработан и описан Фонером [8]. Магнитометр содержал две пары приёмных катушек: одну пару для исследуемого образца, а другую – для опорного магнитного момента. Измерения проводились дифференциальным методом. Источником магнитного поля служил электромагнит.

При низкотемпературных измерениях целесообразно в качестве источника магнитного поля использовать сверхпроводящий соленоид. Это позволяет достичь сильных магнитных полей ($B \sim 10$ Тл) и в то же время разместить приёмные катушки в непосредственной близости от образца, что обеспечивает высокий уровень потокоцепления и, следовательно, высокую чувствительность магнитометра. Пример подобного вибрационного магнитометра с чувствительностью по магнитному моменту $2 \cdot 10^{-5}$ Гс·см³ можно найти в статье [9], где для измерений выбран нулевой метод (метод токовой оболочки). Здесь следует отметить, что необходимость в наличии жидкого гелия является фактором, существенно ограничивающим функционирование приборов, содержащих сверхпроводящие узлы.

Вибрационный магнитометр, созданный автором настоящей статьи, предназначен для исследования статических магнитных свойств широкого спектра веществ и позволяет снимать магнитополевые, температурные и угловые зависимости магнитного момента. Магнитометр не требует криообеспечения жидким гелием, после включения в электросеть практически сразу готов к работе, что позволяет проводить измерения весьма оперативно. Блок-схема вибрационного магнитометра представлена на рис. 2.

Измерения на магнитометре проводятся прямым методом. Что, с одной стороны, по сравнению с нулевым методом позволяет на несколько порядков увеличить верхнюю границу динамического диапазона прибора и, с другой стороны, позволяет избежать чрезмерного усложнения схемы, присущего дифференциальному методу. Но в то же время к параметрам механических колебаний образца предъявляются повышенные требования.

Величину ЭДС в приёмных катушках при достаточно малой амплитуде колебаний образца можно представить как

$$E = k \cdot m \cdot a \cdot f \cdot n,$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии измерительной схемы; m, a, f – магнит-

ный момент, амплитуда и частота колебаний образца соответственно; n – число витков в катушке. Ясно, что нестабильность амплитуды a и частоты f колебаний негативно влияет на результаты измерений. Как правило, в конструкциях вибрационных магнитометров для питания вибратора используют генераторы звуковых частот. Нестабильность частоты, равно как и амплитуды подобных генераторов, составляет $\sim 10^{-2}$. Общая же погрешность измерений может достигать $\sim 10^{-1}$. В целях улучшения точности и повторяемости результатов измерений магнитометр оснащён устройством высокоточной стабилизации параметров колебаний образца, дающим относительную нестабильность амплитуды колебаний 10^{-4} , а частоты 10^{-5} [10].

Намагничивающее поле создаётся электромагнитом Э конструкции И. М. Пузея [11], имеющим сопротивление обмотки 1 Ом. Источником питания электромагнита служит мотор-генератор, содержащий асинхронный электродвигатель типа А2-82-4 и генератор постоянного тока типа П91. Обмотка возбуждения генератора запитана от двуполярного блока БРП развёртки и стабилизации поля, что позволяет записывать полные петли гистерезиса. Имеется пять различных скоростей развёртки поля. Датчик Холла ДХ1 вырабатывает сигнал, управляющий блоком БРП. Для запуска мотор-генератора применено устройство плавного пуска Danfoss MCD 201, дистанционное управление которым осуществляется с операционной панели по интерфейсу RS-485. Измерение поля электромагнита производится датчиком Холла ДХ2 вместе с измерителем магнитной индукции РШ1-10, к ли-

нейному выходу которого подключён вольтметр В1 типа В7-40.

Исследуемый образец О крепится к нижней части кварцевого штока, который приводится в колебательное движение с помощью электродинамического вибратора В оригинальной конструкции [12]. Отличительной особенностью вибратора является то, что он выполнен с аксиальным отверстием, через которое пропущен якорь, жёстко соединённый с питающей катушкой и, в свою очередь, также имеющий аксиальное отверстие, через которое в источник намагничивающего поля установлен шток с держателем образца. По сравнению с известными конструкциями улучшена воспроизводимость результатов измерений, упрощены операции смены и регулировки положения образца. Катушка вибратора запитана от генератора Г переменного тока.

Для регулировки температуры образца используется проточный криостат, оснащённый нагревателем Н1, который подключён к источнику питания ИП1. Воздух из вакуумной рубашки криостата откачивается форвакуумным насосом 2НВР-5Д. Для контроля уровня вакуума применена вакуумная лампа ПМТ-2, подсоединённая к вакуумметру ВИТ-2. Пары жидкого азота подводятся к образцу О из транспортного сосуда Дьюара СК-25 по стандартному переливному устройству. Избыточное давление в сосуде Дьюара создаётся с помощью погружённого в жидкий азот нагревателя Н2, питаемого от источника ИП2. Контроль температуры осуществляется полупроводниковым датчиком ДТ, который подключён к вольтметру В2 типа В2-36.

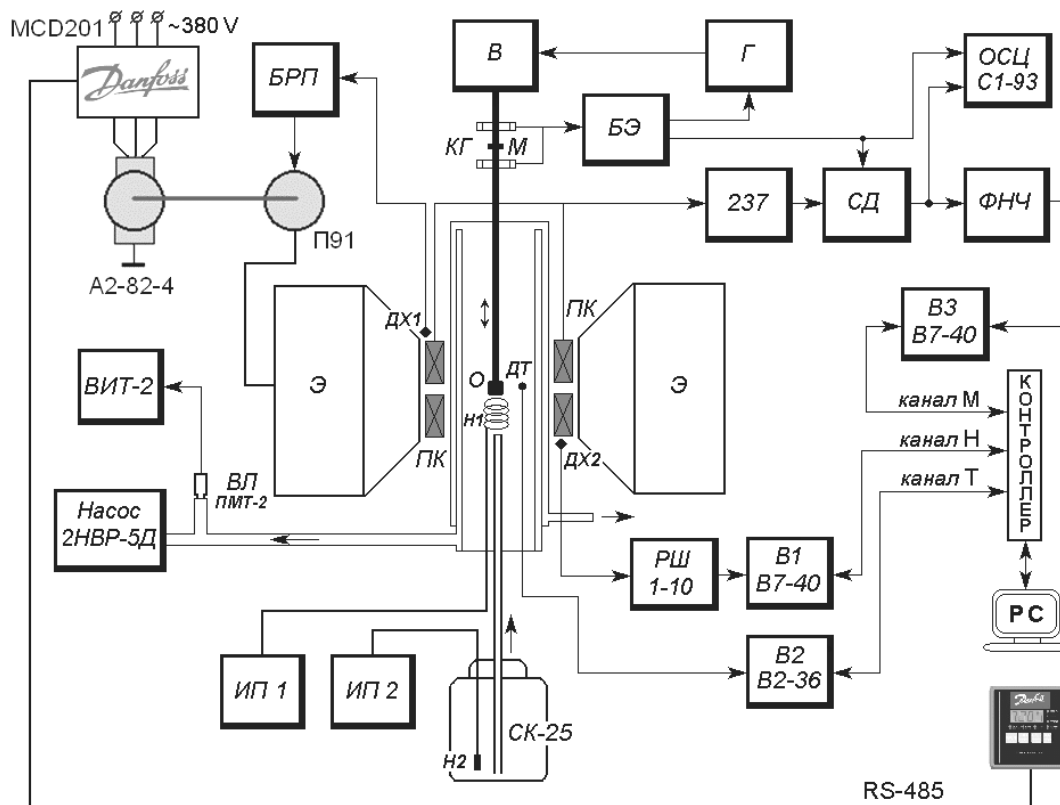


Рис. 2. Блок-схема автоматизированного вибрационного магнитометра

Постоянный магнит M , закреплённый на штоке и колеблющийся синхронно с образцом, индуцирует переменное электромагнитное поле, которое наводит ЭДС в неподвижных катушках Гельмгольца $KГ$. Сигнал обратной связи с катушек Гельмгольца поступает на электронный блок $БЭ$, где вырабатывается напряжение, которое подводится к генератору G и управляет величиной его выходного напряжения таким образом, чтобы поддерживать постоянным значение ЭДС в катушках Гельмгольца, а значит, и амплитуду вибраций. Генератор G , вибратор B , блок $БЭ$, катушки Гельмгольца $KГ$ и магнит M , охваченные между собой соответствующими связями, составляют устройство стабилизации параметров механических колебаний.

Для регистрации полезного сигнала применена система из четырёх приёмных катушек $ПК$, плоскости витков которых перпендикулярны намагничивающему полю и параллельны направлению колебаний [13]. Приёмные катушки размещены в центральной части полюсных наконечников электромагнита $Э$ и жёстко зафиксированы относительно них, благодаря чему ослабляются паразитные наводки со стороны поля электромагнита, возникающие вследствие флуктуаций поля и вибраций; ЭДС, наведённая в приёмных катушках, усиливается селективным нановольтметром типа 237 производства UNIPAN, затем сигнал обрабатывается синхронным детектором $СД$, фильтруется фильтром нижних частот $ФНЧ$ и после поступает на вход цифрового вольтметра $ВЗ$. Опорный сигнал для синхронного детектора формируется блоком $БЭ$. Для удобства настройки магнитометра и для визуального контроля за его работой используется двухлучевой осциллограф $С1-93$. На первый канал осциллографа подаётся опорный сигнал с блока $БЭ$, второй канал осциллографа подключён к выходу синхронного детектора.

Наиболее важные параметры вибрационного магнитометра представлены в таблице.

Функциональная схема устройства стабилизации параметров механических колебаний изображена на рис. 3. Кварцевый генератор вырабатывает импульсы прямоугольной формы стабильной высокой частоты. Этот сигнал поступает на делитель частоты, с выхода которого снимается циклически изменяющийся многоразрядный параллельный код. Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) преобразует входной код в код для формирования дискретного синусоидального напряжения, который поступает на входы цифроаналогового преобразователя (ЦАП). В результате на выходе ЦАП формируется дискретное синусоидальное напряжение стабильной частоты, которое усиливается усилителем мощности и подводится к вибратору. Амплитуда напряжения на выходе ЦАП линейно зависит от величины опорного напряжения $U_{оп}$, которое подводится к ЦАП из блока $БЭ$.

Схема охвачена электромеханической отрицательной обратной связью. Сигнал обратной связи – ЭДС, наведённая в катушках Гельмгольца колеблющимся магнитом M , поступает на усилитель, затем выпрямляется амплитудным детектором, сглаживается

фильтром низкой частоты и подаётся на вход интегратора. На этот же вход по суммирующей схеме подаётся постоянное напряжение U_0 , которое задаёт значение амплитуды вибраций. На выходе интегратора формируется опорное напряжение для ЦАП. Если амплитуда колебаний магнита M становится отличной от заданной напряжением U_0 , то, как результат, меняется величина напряжения обратной связи. Это приводит к разбалансу входных напряжений интегратора, вследствие чего напряжение на его выходе начинает изменяться. Напряжение, подводимое к вибратору, тоже начинает изменяться, вызывая, в свою очередь, изменение амплитуды механических колебаний. Этот процесс происходит до тех пор, пока не будет устранён разбаланс напряжений на входах интегратора, что соответствует равенству амплитуды механических колебаний заданному значению. Таким образом, амплитуда колебаний штока вместе с магнитом поддерживается постоянной.

Основные параметры магнитометра

Динамический диапазон	$5 \cdot 10^{-6} - 100 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$
Магнитное поле	$0 - \pm 25 \text{ 000 Э}$
Температура образца	$77 - 370 \text{ К}$

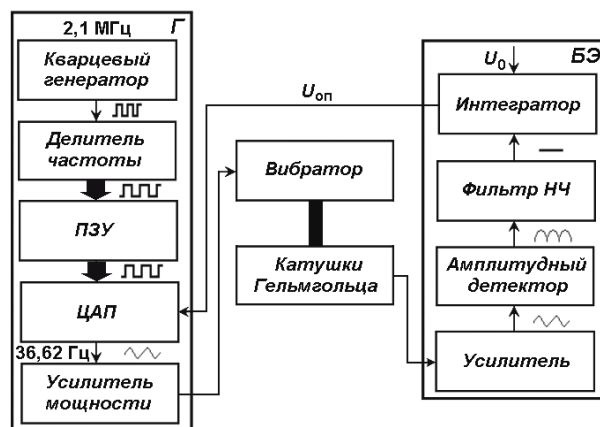


Рис. 3. Функциональная схема устройства стабилизации параметров вибраций

Принципиальная электрическая схема устройства стабилизации приведена на рис. 4. Узлы устройства выполнены на базе аналоговых и цифровых интегральных схем.

Задающий генератор собран на логических элементах HE D1.1 и D1.2 по схеме с одним инвертором в цепи отрицательной обратной связи по постоянному току [14]. Частота генератора 2,1 МГц стабилизирована кварцевым резонатором типа РК 170ББ–7ДУ–2100К. Нестабильность частоты не превышает 10^{-5} в интервале температур 20–40 °С.

Делитель частоты имеет два каскада, он собран на микросхемах D2 и D3. Первый каскад выполнен на микросхеме D2 K555IE2, представляющей собой четырёхразрядный десятичный асинхронный счётчик. Выходной сигнал генератора поступает на вход C0 микросхемы D2. Соединяя выходы счётчика Q0–Q3 различными способами с его входами, можно полу-

Интегратор собран на ОУ D9.2 по суммирующей схеме: на инвертирующий вход ОУ подаются два разнополярных напряжения – прошедший обработку сигнал с катушек Гельмгольца и напряжение U_0 с прецизионного стабилизатора V4. Уровнем напряжения U_0 как раз и задаётся значение амплитуды механических колебаний штока. Выход интегратора подключён к входу опорного напряжения UR интегральной схемы ЦАП D5. Диод V3, включённый в цепь обратной связи ОУ, предотвращает появление отрицательного напряжения на его выходе, что могло бы привести к неправильной работе схемы.

Усилитель мощности изготовлен на основе микросхемы ОУ D10 и транзисторов T1–T4. Управление транзисторами T1, T2 осуществляется по цепям питания ОУ, RC-цепочки предотвращают самовозбуждение усилителя. Выход усилителя мощности нагружен катушкой K вибратора, имеющей сопротивление 4 Ом.

Для питания электрической схемы устройства стабилизации частоты и амплитуды колебаний используются три стабилизированных напряжения: ± 15 В и $+5$ В.

Параметры элементов схемы подобраны таким образом, чтобы амплитуда механических колебаний штока составляла 0,5 мм, общий ход штока был равен, соответственно, 1 мм. При этом нестабильность амплитуды колебаний не превышает 10^{-4} . Это было установлено замерами, полученными с помощью модуля 24-разрядного сигма-дельта-АЦП типа E-24 производства ЗАО «Л-КАРД» (<http://www.lcard.ru>). На рис. 5 представлены временные зависимости напряжения на выходе фильтра НЧ (см. рис. 3), снятые при работе вибратора как без штока (рис. 5, а), так и со штоком массой 45 г (рис. 5, б). Более высокий уровень шума во втором случае обусловлен нестабильностью силы трения штока о внутреннюю поверхность канала криостата. Частота выборки сигнала АЦП составляла 5 Гц.

Автоматизация измерений производится с помощью программы VSMagnetometer, написанной на языке Delphi (рис. 6) [19]. Данные с измерителя магнитной индукции, с датчика температуры и с выхода регистрирующей схемы магнитометра поступают на цифровые вольтметры $B1$, $B2$, $B3$ (см. рис. 2) и далее посредством специализированного контроллера передаются на LPT-порт персонального компьютера. Значения измеряемых параметров в ходе эксперимента записываются на жёсткий диск компьютера и графически отображаются на экране монитора.

Для оперативного просмотра отснятых графиков имеется ещё одна компьютерная программа ReadFile [20]. В ней предусмотрена функция экранной лупы и функция мгновенного вывода на экран координат, соответствующих текущему положению указателя компьютерной мыши.

Широкий динамический диапазон прибора даёт возможность исследовать самые разнородные материалы. В качестве примера на рис. 7 представлены магнитопольные зависимости магнитного момента для объёмного образца сплава NdFeB и для тонкоплё-

ночной структуры Ni/Ge, снятые при комнатной температуре.

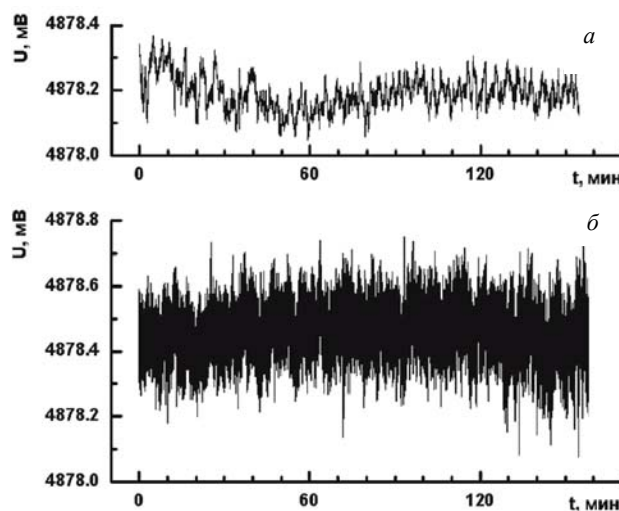


Рис. 5. Напряжение на выходе фильтра НЧ при работе вибратора: без штока (а), со штоком (б)

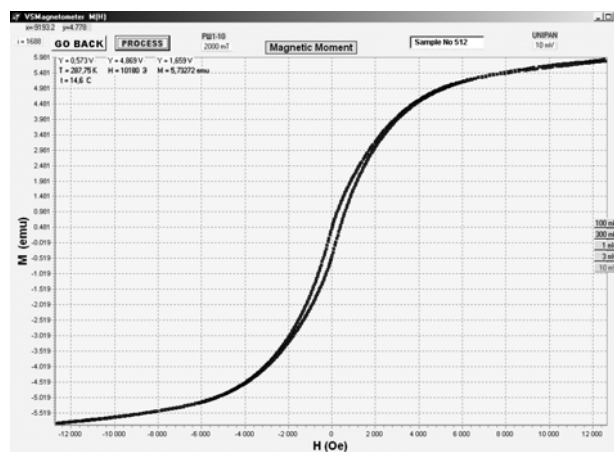


Рис. 6. Главное окно программы VSMagnetometer

Подводя итог, констатируем следующее. Разработан и изготовлен автоматизированный вибрационный магнитометр, предназначенный для исследования магнитопольных, температурных и угловых зависимостей магнитного момента твёрдотельных образцов. Магнитометр имеет параметры, которые приведены в таблице. Использование в магнитометре вибратора оригинальной конструкции улучшило ряд технических и эксплуатационных характеристик прибора. Оснащение вибрационного магнитометра системой высокоточной стабилизации параметров механических колебаний образца обеспечивает высокую достоверность результатов, получааемых прямым методом измерений магнитного момента. Широкий динамический диапазон прибора позволяет исследовать статические магнитные свойства крайне широкого круга веществ. Автоматизация сбора данных позволяет регистрировать измеряемые параметры с высокой точностью и сохранять большой объём полезной информации.

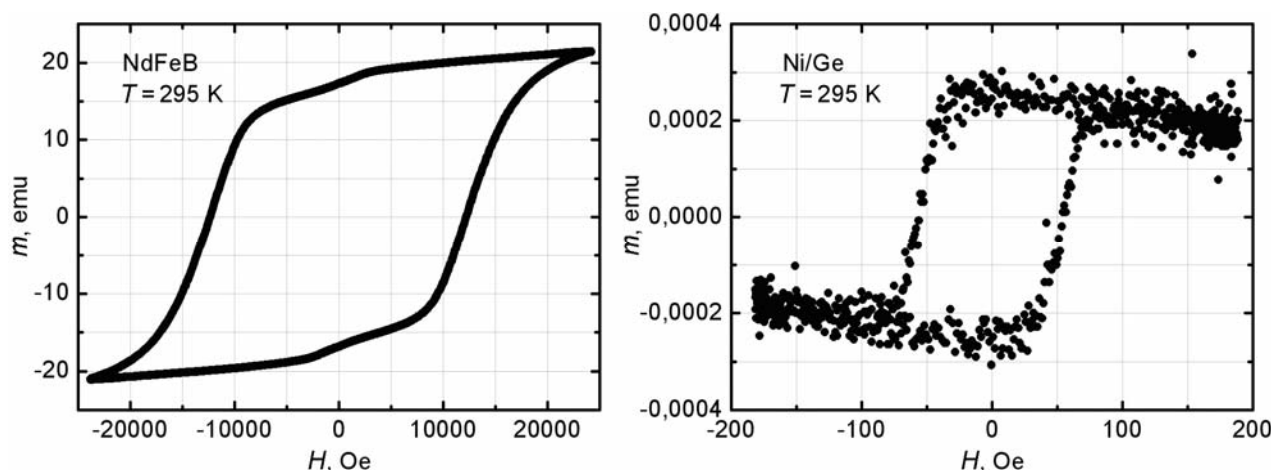


Рис. 7. Полевые зависимости магнитного момента NdFeB и плёнки Ni/Ge

Библиографические ссылки

1. Clark J. Principles and Applications of SQUIDS // Proc. IEEE. 1989. Vol. 77, № 8. P. 1208–1223.
2. Fagaly R. L. Superconducting Quantum Interference Device Instruments and Applications // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77, № 10. P. 101101-1–101101-45.
3. Happer W. Optical Pumping // Rev. Mod. Phys. 1972. Vol. 44, № 2. P. 169–249.
4. Александров Е. Б., Вершовский А. К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // УФН. 2009. Т. 179, № 6. С. 605–637.
5. Plotkin H. H. Magnetic Properties of Solids. The Rare Earths // Quart. Progr. Rept. Massachusetts Institute of Technology Research Lab. Electronics, publ. 15.10.1951. P. 28.
6. Smith D. O. Development of a Vibrating-Coil Magnetometer // Rev. Sci. Instrum. 1956. Vol. 27, № 5. P. 261–268.
7. Legl S., Pfeleiderer C., Krämer K. Vibrating coil magnetometer for milli-Kelvin temperatures // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81, № 4. P. 043911-1–043911-3.
8. Foner S. Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer // Rev. Sci. Instr. 1959. Vol. 30, № 7. P. 548–557.
9. Балаев А. Д., Бояршинов Ю. В., Карпенко М. М., Хрусталёв Б. П. Автоматизированный магнитометр со сверхпроводящим соленоидом // ПТЭ. 1985. № 3. С. 167–168.
10. Пат. РФ № 2341810. Вибрационный магнитометр / Великанов Д. А. Оpubл. 20.12.08, Бюл. № 35.
11. Пузей И. М., Сабинин П. Г. Электромагнит для физико-химических исследований // ПТЭ. 1960. № 1. С. 104–109.
12. Пат. РФ № 2339965. Вибрационный магнитометр / Великанов Д. А. Оpubл. 27.11.08, Бюл. № 33.
13. Noakes J. E., Arrott A., Haakana C. Vibrating Sample Magnetometers // Rev. Sci. Instrum. 1968. Vol. 39, № 10. P. 1436–1438.
14. Альтшуллер Г. Б., Елфимов Н. Н., Шакулин В. Г. Кварцевые генераторы : справочное пособие. М. : Радио и связь, 1984. 232 с.

15. Бирюков С. А. Цифровые устройства на интегральных микросхемах. М. : Радио и связь, 1987. 152 с.
16. Шило В. Л. Популярныe цифровые микросхемы : справочник. Челябинск : Металлургия, 1989. 352 с.
17. Федорков Б. Г., Телец В. А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М. : Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
18. Пейтон А. Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М. : БИНОМ, 1994. 352 с.
19. Свид. РФ о гос. регистрации № 2013618553. VSMagnetometer. Программа для ЭВМ / Д. А. Великанов. Заяв. 11.09.2013.
20. Свид. РФ о гос. регистрации № 2013618132. ReadFile. Программа для ЭВМ / Д. А. Великанов. Оpubл. 20.09.2013.

References

1. Clark J. Principles and Applications of SQUIDS. Proc. IEEE, 1989, vol. 77, no. 8, p. 1208–1223.
2. Fagaly R. L. Superconducting Quantum Interference Device Instruments and Applications. Rev. Sci. Instrum., 2006, vol. 77, no. 10, pp. 101101-1–101101-45.
3. Happer W. Optical Pumping. Rev. Mod. Phys., 1972, vol. 44, no. 2, p. 169–249.
4. Aleksandrov E. B., Vershovskij A. K. *Sovremennye radioopticheskie metody kvantovoj magnitometrii* (Modern radio-optical methods in quantum magnetometry). *UFN*, 2009, vol. 179, no. 6, p. 605–637.
5. Plotkin H. H. Magnetic Properties of Solids. The Rare Earths. Quart. Progr. Rept. Massachusetts Institute of Technology Research Lab. Electronics, publ. 15.10.1951, p. 28.
6. Smith D. O. Development of a Vibrating-Coil Magnetometer. *Rev. Sci. Instrum.*, 1956, vol. 27, no. 5, p. 261–268.
7. Legl S., Pfeleiderer C., Krämer K. Vibrating coil magnetometer for milli-Kelvin temperatures. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, vol. 81, no. 4, p. 043911-1–043911-3.
8. Foner S. Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer. *Rev. Sci. Instr.*, 1959, vol. 30, no. 7, p. 548–557.

9. Balaev A. D., Bojarshinov Ju. V., Karpenko M. M., Hrustal'jov B. P. *Avtomatizirovannyj magnitometr so sverhprovodjashhim solenoidom* (Automated magnetometer with a superconducting solenoid). *PTE*, 1985, no. 3, p. 167–168.
10. Velikanov D. A. *Vibratsionnyy magnitometr* (Vibrating Sample Magnetometer). Patent RF no. 2341810, publ. 20.12.2008, bull. no. 35.
11. Puzey I. M., Sabinin P. G. *Electromagnit dlja fiziko-himicheskikh issledovaniy* (Electromagnet for physico-chemical studies). *PTE*, 1960, no. 1, p. 104–109.
12. Velikanov D. A. *Vibratsionnyy magnitometr* (Vibrating Sample Magnetometer). Patent RF no. 2339965, publ. 27.11.2008, bull. no. 33.
13. Noakes J. E., Arrott A., Haakana C. Vibrating Sample Magnetometers. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, vol. 39, no 10, p. 1436–1438.
14. Al'tshuller G. B., Elfimov N. N., Shakulin V. G. *Kvarcevyje generatory: Spravochnoe posobie* (Crystal oscillators: Reference guide). Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1984, 232 p.
15. Birjukov S. A. *Cifrovye ustrojstva na integral'nyh mikroshemah*. (Digital devices at integrated microcircuits). Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1987, 152 p.
16. Shilo V. L. *Populjarnye cifrovye mikroshemy: Spravochnik* (Popular digital microcircuits: Handbook). Chelyabinsk, Metallurgija Publ., 1989, 352 p.
17. Fedorkov B. G., Telec V. A. *Mikroshemy CAP i ACP: funkcionirovanie, parametry, primenenie* (DAC and ADC microcircuits: functioning, parameters, application). Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990, 320 p.
18. Pejton A. Dzh., Volsh V. *Analogovaja jelektronika na operacionnykh usiliteljah* (Analogue electronics on operational amplifiers). Moscow, BINOM Publ., 1994, 352 p.
19. Velikanov D. A. VSMagnetometer. Computer software. Cert. RF on state registration no. 2013618553, regist. 11.09.2013.
20. Velikanov D. A. ReadFile. Computer software. Cert. RF on state registration no. 2013618132, publ. 20.09.2013.

© Великанов Д. А., 2014

УДК 539.374

ТЕХНОЛОГИИ И МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕНОМЕТАЛЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ II

Г. Г. Крушенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: genry@icm.krasn.ru

Описаны технологии получения пенопродуктов из различных металлов и сплавов, включая современные технологии с применением методов литья и порошковой металлургии, а также путем прямого вдувания в расплав газообразных веществ. Приведены характеристики пенометаллов, их преимущества перед плотными материалами, а также их применение в аэрокосмической и других отраслях промышленности. Пенометаллы получают двумя основными способами – литьем и методом порошковой металлургии. Благодаря их легковесности пенометаллические изделия применяются в автомобильной и аэрокосмической отрасли. Технология получения пенометаллов заключается в газифицировании расплава разными методами. В последние годы определенные успехи были достигнуты в технологии формирования профильных изделий из пенометаллов с применением различных методов обработки давлением.

Ключевые слова: технологии и механизм формирования пенометаллов, применение пенометаллов в летательных аппаратах.

THE TECHNOLOGIES AND MECHANISM OF FORMING THE FOAM METALS AND ITS USE ON AIRCRAFTS II

G. G. Krushenko

Institute computational modeling SB RAS
50/44, Academgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: genry@icm.krasn.ru

The technologies and mechanism of producing and forming the foam products of different metals and alloys, including contemporary technologies with the methods of foundry and powder metallurgy and also by straight blowing up gaseous matters in a melt are described. The characteristics of some foam metals and its advantages to compact materials and also its use at the aerospace and other branches of industry are given. Foam metals and alloys can be manufactured by two main methods: casting and powder metallurgy. Metallic foams applications are increasing on those fields such as automotive or aerospace industries due to the weight reduction. Several routes are used to achieve metallic foams: deposition, melting and powder metallurgy. On some of these processes, foam manufacturing involves a gas into a melted metal which leads to a light metallic structure. In recent years, some research has been developed on the deformation behavior of metal foams.

Keywords: technologies and mechanism forming foam metals, use foam metals on aircrafts.

Аксиомой при работе с металлоизделиями, применяемыми в различных отраслях техники, является отсутствие в них пустот по той причине, что они ухудшают их физико-механические характеристики [1]. Однако при этом существуют и технологии изготовления металлических материалов, в которых, напротив, специально формируют пустоты. К ним относятся пустотелые материалы, в частности, так называемые пенометаллы (ПМ) (metallic foams – от способа их получения путем вспенивания жидкого металла [2]) или «ячеистые металлы» (cellular metals – от формы пустот (ячейки)) [3], а также «пористые металлы» (porous metal materials) [4]. Состояние производства ПМ, их характеристики и применение подробно описаны в работе [5]. В настоящее время ПМ получают с помощью двух основных технологий [6] – литьем и порошковой металлургией. Суть процесса получения ПМ литьем заключается во введении в жидкий металл так называемых порофоров (порофор (blowing agent) – вспениватель) – гидриды TiH_2 , MgH_2 , ZrH_2 [7], карбонат кальция $CaCO_3$ [6], углекислый газ CO_2 [8] и др.

По-видимому, одним из первых патентов на получение пористых металлических материалов является патент США «Способ получения пенометаллов», зарегистрированный в 1948 г. [9]. Сущность способа заключается в нагревании при атмосферном давлении металла или смеси металлов, сплавов или минералов до температуры между температурой их плавления и температурой, достаточной для образования пара, содержащегося в смеси летучего материала. Затем давление понижают, в результате чего расплавленная масса вспенивается, и в результате ее последующего охлаждения формируется пористый металл. При этом получали ПМ из композиций Fe–Al–Zn; Fe–Mg–Zn; Al–Mg–Fe–Hg; Mg–Hg; Al–Hg; Cr–Cd; Au–Hg. Произведенные по этому способу ПМ могут быть затем сформированы в виде блоков, листов, труб и др. Следует отметить, что в качестве прототипа, послужившего основой для изобретения «от противного», в этом патенте приводится ссылка на патент США «Способ получения сплавов», зарегистрированный еще в 1918 г. [10], согласно которому пенообразование в сплавах, содержащих легколетучие металлы (Hg; Na; Zn), напротив, подавляется повышенным давлением при их приготовлении.

В нашей стране, по-видимому, одним из первых изобретений, полученных по приготовлению пенометаллов с применением литейной технологии, является

авторское свидетельство СССР № 125682, выданное в 1960 г. [11]. Согласно этому патенту алюминиевый расплав (рис. 1), подогретый в печи-миксере 1 до 600 °С, перемещается непрерывно по обогреваемому лотку 2. Одновременно из бункера 3 через дозатор 4 по трубке 5 в струю расплава непрерывно вводится гидрид металла (TiH_2 , ZrH_2 , LiH), интенсивное перемешивание которого происходит в смесительной камере 6, установленной в печи 7. Перемешивание расплава производится пропеллерной мешалкой 13. Из камеры 6 металл поступает в электропечь 17, где его температура повышается до 650–700 °С, что обеспечивает пенообразование расплава у его выхода из печи. Полученный пенорасплав 18 поступает на непрерывно движущийся кристаллизатор 19, выполненный в виде бесконечной ленты из латунной сетки, где он и охлаждается путем подачи воды.

Другой российский патент, полученный сотрудниками ВИЛСа в 1997 г. с приоритетом от 31.08.1995 г. [12] выдан на способ получения ПМ методом порошковой металлургии. Процесс получения ПМ включает смешивание порошков алюминиевых сплавов с порофорами с температурой разложения, превышающей температуру солидуса-ликвидуса порошка алюминиевого сплава, засыпку смеси в емкость из алюминиевого сплава, нагрев емкости со смесью порошков перед прессованием до температуры ниже температуры солидуса порошка алюминиевого сплава с последующим прессованием при этой температуре в плотную заготовку.

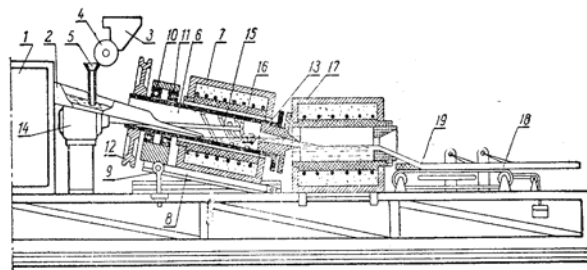


Рис. 1. Устройство для получения пенометаллов [11]

Схематично технология получения ПМ методом порошковой металлургии показана на рис. 2 [13].

Существуют также и технологии получения ПМ путем прямого введения в жидкий металл газа (воздух, азот, аргон) [14].

Типичный вид пенометаллов показан на рис. 3.

Все более широкое распространение ПМ в технике объясняется тем, что они обладают благоприятным сочетанием физических и механических характеристик, таких как высокая жесткость в сочетании с очень низкой плотностью (низким удельным весом) и/или с высокой газопроницаемостью в сочетании с высокой теплопроводностью, а также низкая гигроскопичность, что обуславливает морозостойкость и отсутствие трещин при перепаде температур. В сочетании с низкой плотностью и высокой жесткостью, способностью поглощать энергию удара и вибрацию, а также с высокой степенью звукопоглощения и, что очень важно, высокой технологичностью, допускающей возможность формировать из ПМ объемные конструкции, изделия из этого материала применяют в различных отраслях машиностроения [8; 17; 18]: в автомобильной промышленности в виде конструктивных элементов (бамперы и др.); в аэрокосмической отрасли в виде титановых и алюминиевых сэндвичей, а также некоторых деталей турбин; в судостроении для изготовления корпусов пассажирских судов, элеваторных и антенных платформ и др.; в общественном городском транспорте; в строительной индустрии; в конструкциях металлорежущих станков.

Но при этом в производстве изделий из ПМ существует проблема, заключающаяся в нестабильности формирующейся пены [2], т. е. в несохранении состояния вспененного жидкого металла в процессе кристаллизации. Однако эта проблема достаточно успешно решается в результате введения в расплав микрочастиц с температурой плавления выше температуры плавления вспениваемого металла, тем самым предотвращая слияние пузырьков [19]. При этом степень влияния таких частиц зависит от размера, смачиваемости и конфигурации фрактальных комплексов, формирующихся внутри и на поверхности перемычек между ячейками. Так, в работе [2] стабилизация пены в алюминиевом расплаве достигается в результате введения в него частиц карбида кремния SiC. В работе [20] показано, что наибольший стабилизирующий эффект при получении пеноалюминия дают наночастицы оксида алюминия Al_2O_3 . Эффект стабилизации пены связан с тем, что любые частицы наноразмерного уровня могут длительное время находиться в жидких средах во взвешенном состоянии. Этот эффект еще в 1905 г. объяснил А. Эйнштейн [21], который, используя законы математической статистики и молекулярно-кинетической теории газов, показал, что для частиц размером до 1 мкм энергии броуновского движения достаточно для того, чтобы они находились в постоянном движении и не оседали под действием силы тяжести.

Существование этого эффекта подтверждено на практике в нашей работе [22] по применению противопригарных покрытий для окраски поверхности литейных форм и стержней, приготовленных на водной основе и содержащих НП Al_2O_3 , полученного методом плазмохимического синтеза [23]. Проблема заключалась в расслоении покрытий, которые обычно готовят по стандартной технологии с использованием в качестве огнеупорной составляющей компонентов микромет-

рических размеров (например, TiO_2 , ZnO и др.). При выстаивании таких покрытий происходит оседание этих компонентов, в связи с чем перед каждой покраской суспензию необходимо перемешивать с целью обеспечения равномерного окрашивания форм и стержней. В нашей работе определяли седиментационную устойчивость покрытий НП TiCN, SiC и Al_2O_3 , замешанных в ПВБ лак в количестве 12, 14, 16 и 18 масс. %. Было установлено, что при выстаивании суспензий в калориметрическом цилиндре емкостью 250 мл вплоть до 7 ч расслоение не имело места. Практически такой же эффект был установлен и в работе [24].

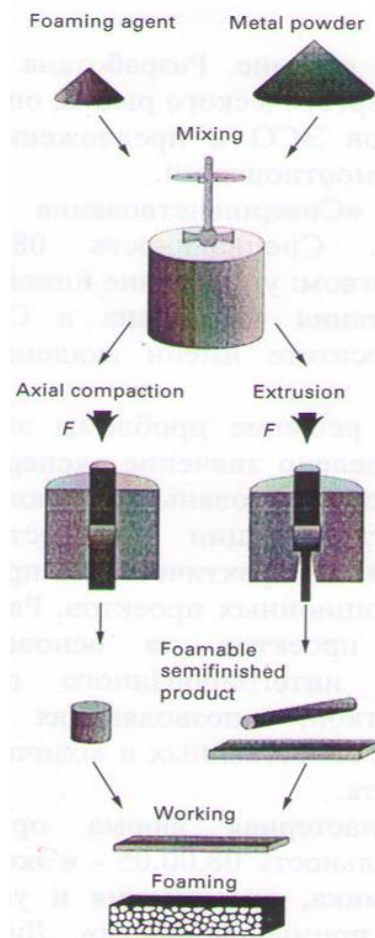


Рис. 2. Процесс изготовления пенометалла: foaming agent – вспенивающее вещество; metal powder – порошок металла; mixing – смешивание; axial compaction – прессование; extrusion – экструзия; foamable semifinished product – вспенивание; working – обработка; foaming – готовый пенопродукт [13]

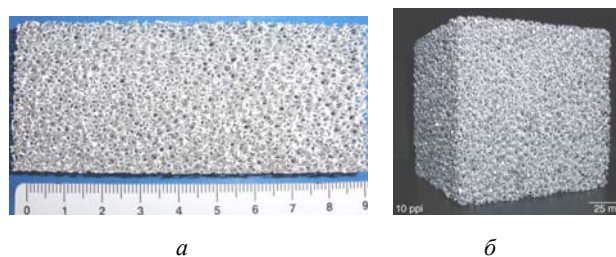


Рис. 3. Структура ПМ, полученного: а – литьем из алюминия [15]; б – методом порошковой металлургии из сплава Fe–Cr–Al–Y [16]

Оценка качества изделий из ПМ производится по величине прочности при испытании на сжатие, на прогиб или на пробой. При этом механические свойства ПМ определяются количеством, формой, размерами и характером распределения пор по объему металла.

Согласно [25] величина прочности на сжатие, на примере пеносплавов Al – 12 % Si и Zn – 4 % Cu, зависит от их плотности и может быть представлена для ПМ с открытой пористостью формулой

$$\sigma_f = 0,3 \cdot \sigma_{ys} \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^n,$$

где ρ_f и ρ_s – соответственно, плотности пеносплав и компактного сплава; σ_{ys} – временное сопротивление разрушению компактного сплава; $n = 1,89 \pm 0,08$.

Прочность на сжатие для ПМ с закрытой пористостью выражается более сложной формулой, но опыт показывает, что в этом случае механические свойства определяются более толстыми, а не тонкими стенками, так что приведенное уравнение отвечает ПМ и для этого случая.

Исходя из анализа имеющейся информации, на первом этапе нами была проведена работа по получению пеноалюминия с использованием в качестве порофора крошки саяногорского мрамора по аналогии с работой [6], в которой для получения пенометаллических изделий применялся порошок белого мрамора (white marble). Согласно сертификату качества предприятия «Саянмрамор» (<http://www.bloks.lv/ru/sertifikat.htm>) по минералогическому составу саяногорские мраморы, добываемые в Кибик-Кордонском месторождении, являются существенно кальцитовыми, и в среднем они содержат в качестве вспенивающего компонента (порофора) порядка 52,0–55,1 % кристаллического оксида кальция CaO.

Технология получения пеноалюминия заключалась в выполнении следующих операций: расплавление алюминия марки А7 в тигельной печи сопротивления СНОЛ 1,6.2.5.1/9-ИЗ в шамотно-графитовом тигле → доведение температуры расплава до 800 °С → выемка тигля из печи → засыпание на зеркало металла мраморной крошки (размер частиц порядка 100 мкм) в количестве 5 масс. % от массы металла при одновременном его замешивании в расплав → установка тигля в печь → выдержка 10 мин при 800 °С → выемка тигля и перемешивание расплава в течение 3-х мин → установка тигля в печь → выдержка 15 мин при 850 °С → выемка тигля из печи → затвердевание пеноалюминия на воздухе непосредственно в тигле. После затвердевания металла полученную заготовку удаляли из тигля.

На рис. 4 приведены фотографии типичных образцов пеноалюминия. Преобладает сферическая форма пор, их размеры находятся в интервале 0,5–10,0 мм, при этом поры равномерно распределены по объему металла. Кажущаяся плотность образцов (масса единицы объема материала, включая и объем закрытых пор; рассчитывается как отношение массы вещества ко всему занимаемому им объему; чем ниже кажу-

щаяся плотность, тем больше пустот в материале) составляет 0,83 г/см³, пористость ~ 70 %.

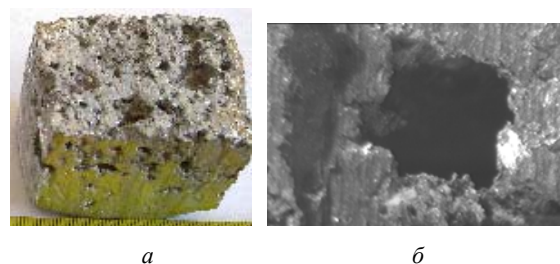


Рис. 4. Образец из пеноалюминия марки А7, размер 40 x 35 x 35 мм (а); типичная единичная пора $\varnothing \sim 1,5$ мм в образце пеноалюминия марки А7 (x 10) (б)

Рассмотрим некоторые примеры применения пенометаллов в машиностроении. На рис. 5 показан фрагмент передней кромки крыла самолета [8], изготовленной из листового деформируемого алюминиевого сплава, до (рис. 5, а) и после (рис. 5, б) заполнения полости пеной сплава Al–10 % Si (плотность $\rho = 0,90$ г/см³). В качестве порофора применяли TiH₂. Толщина листа пустотелой кромки стандартной конструкции составляла 2,5 мм, а в результате заполнения пеносплавом ее уменьшили до 1,5 мм. Испытания на удар показали, что деформация пустотелой кромки составляет $9,8 \pm 0,4$ %, тогда как заполненной пеносплавом – $2,5 \pm 0,1$ % (меньше ~ в 4 раза).

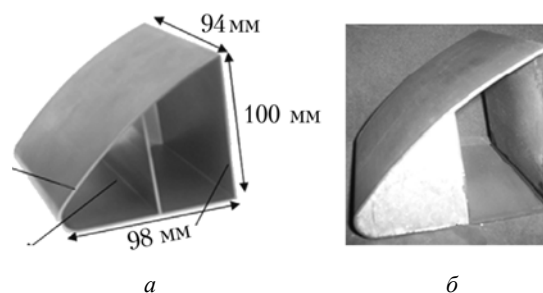


Рис. 5. Передняя кромка крыла самолета до (а) и после (б) заполнения пеносплавом Al – 10 % Si [8]

В работе [26] представлены результаты совместного франко-германского проекта по изготовлению одного из компонентов ракеты-носителя «Ариан 5» – Cone 3936 («Конус 3936») с применением сэндвичей, заполненных алюминиевой пеной (aluminium foam sandwiches). Технология изготовления сегментов состояла из следующих последовательных операций. Контейнер из листового металла заполняли порошком сплава (6,0 % Si; 10,0 % Cu; Al – ост.), легирующими компонентами и порошком гидрида водорода TiH₂ с последующим уплотнением. Компактный продукт помещали между алюминиевыми листами толщиной 1,5 мм и подвергали прокатке, затем нагревали до расплавления металлических компонентов и разложения TiH₂ с выделением водорода, который и образовывал пенно-пористую структуру, фиксирующуюся при последующем охлаждении. Толщина сэндвича составляла 25 мм. Для придания сэндвичу требуемой

толщины и устранения деформации поверхности, вызванной образованием пены, его подвергали повторному прессованию. Полученные заготовки резали лазером до нужных размеров. Сегмент с требуемой криволинейной геометрией получали путем прессования заготовок с помощью специального штампа (рис. 6), а конечные его размеры получали обработкой резанием.

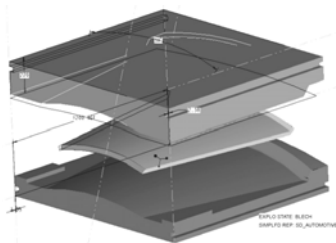


Рис. 6. Схема прессования заготовки в сегмент. Заготовка расположена внутри формообразующих стальных вставок штампа [26]

На рис. 7 показан готовый сегмент с хорошо видимой пенно-пористой структурой.

Отдельные сегменты собирали в конструкцию конуса с помощью сварки плавлением, запатентованную ВИЛСом еще в 2001 г. [27].

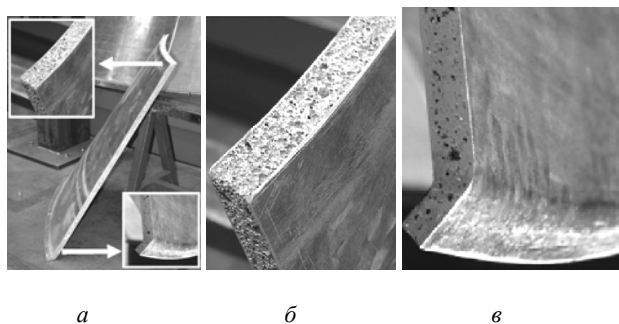


Рис. 7. Пеноалюминиевый сегмент: общий вид (а); увеличенные фрагменты (б, в) [26]

Конус, собранный из 12-ти пенно-алюминиевых сегментов, показан на рис 8. Диаметр верхней его части составляет 2,6 м, нижней – 3,9 м, высота 0,8 м, масса 200–210 кг.

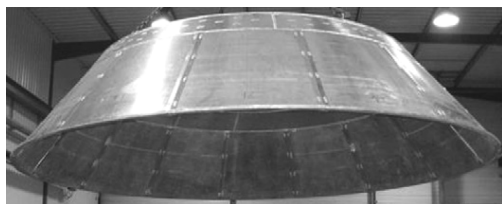


Рис. 8. Собранный конус Cone 3936 [26]

В работе [28] разработана конструкция цилиндрического топливного бака (рис. 9, позиция 1) двигательной установки космических аппаратов, на стенках которого закрепляется поперечная перегородка (рис. 9, позиция 7) с размещенным в ее центре пронизываемым капиллярно-пористым элементом, изготовленным из

пенометалла, что позволяет обеспечить устойчивый многократный запуск двигателя в условиях невесомости и снизить вес топливного бака. Пеннометаллическая вставка изготавливается из алюминия, нихрома или коррозионно-стойкой стали и содержит до 95 % пустот.

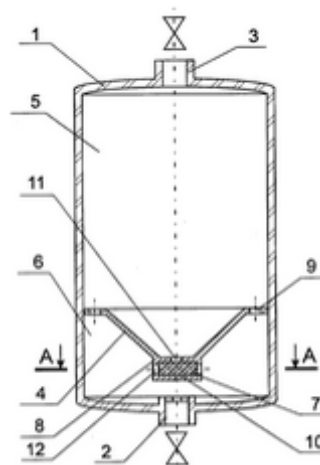


Рис. 9. Топливный бак: перегородка с встроенным пеннометаллическим элементом [28]

Функция пеннометаллической вставки заключается в том, что она разбивает поток топлива, возникающий при переходе от невесомости к перегрузкам, на микропотоки. При этом происходит значительная диссипация энергии движущегося жидкого компонента, в результате чего снижается гидродинамическое воздействие топлива на стенки бака, уменьшая смещение его центра масс с продольной оси космического аппарата. В условиях невесомости пеннометаллическая вставка за счет капиллярного эффекта не позволяет топливу перемещаться по всему объему топливного бака и смещать центр масс с продольной оси космического аппарата.

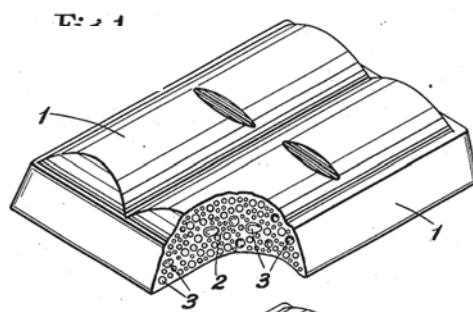


Рис. 10. Пористый шоколад:
1 – плитка; 2 – ячейки (cells); 3 – полости (cavities) [30]

Анализ патентной литературы показал, что первые работы по получению пустотелых материалов относятся к пищевым продуктам. Так, еще в 1902 г. в США был запатентован способ обработки крахмала [29], сущность которого заключается в нагревании гранул крахмала ($C_6H_{10}O_5$)_n в сухой атмосфере под давлением с последующим его быстрым снижением, в результате чего содержащаяся в гранулах жидкая

составляющая превращается в газ, образуя в гранулах поры. Совершенно очевидно, что механизм порообразования практически не отличается от такового при формировании пенометаллов.

Линию получения вспененных пищевых продуктов продолжает патент США «Способ производства пищевых и кондитерских изделий», полученный в 1937 г. [30], согласно которому также получают пенопродукты. В качестве примера приводится рисунок шоколада (рис. 10), структура которого практически не отличается от структуры пенометаллов.

Библиографические ссылки

1. Крушенко Г. Г. Предотвращение образования и блокирование отрицательного воздействия пористости на свойства отливок из алюминиевых сплавов // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. 3 (43). С. 124–126.
2. Banhart J. Manufacturing routes for metallic foams // J. of metals. 2000. Vol. 52. P. 22–27.
3. Saenz E., Baranda P. S., Bonhomme J. Porous and cellular materials for structural applications // MRS Symp. Proc. / D. S. Schwartz, D. S. Shih, A. G. Evans, H.N.G. Wadley, editors. 1998. Vol. 521. P. 83.
4. Tang H. P. [et al.]. Fractal dimension of pore-structure of porous metal materials made by stainless steel powder // Powder Technology. 2012. Vol. 217. P. 383–387.
5. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams // Progress in Materials Science. 2001. V. 46. P. 559–632.
6. Cambroner L. E. G. [et al.]. Manufacturing of Al-Mg-Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent // J. of materials processing technology. 2009. Vol. 209. Iss. 4. P. 1803–1809.
7. Kovacic J., Simancik F. Comparison of zinc and aluminium foam behaviour // Kovove materialy. 2004. Vol. 42, № 2. P. 79–90.
8. Reglero J. A. [et. al.]. Aluminium foams as a filler for leading edges: Improvements in the mechanical behavior under bird strike impact tests // Materials and design. 2011. Vol. 32, № 2. P. 907–910.
9. Patent US 2,434,775. 7 Claims. (Cl. 75-20). Application May 8, 1943. Serial No 486,209. Process for making foamlike mass of metal / Benjamin Sosnick. US Patent Office. Patented January 20, 1948.
10. Patent US 1,252,887. Application filed August 27, 1917. Serial No 188,473. Process making alloys / Henry L. Doherty. US Patent Office. Patented January 8, 1918.
11. А. с. СССР № 125682. Класс 40b/3₃₀, 49/3. Устройство для получения пеноалюминия из алюминиевых сплавов / М. Б. Альтман, В. В. Меркулов, Б. Ф. Минаев, Б. В. Головчанский, Б. А. Борок. № 628154/22 ; заяв. 11.05.1959, Бюл. № 2. 1960.
12. Пат. № 2085339 Рос. Федерации, С1 МПК⁶ B22F3/11, B22F3/18. Способ получения пористых полупроизводков из порошков алюминиевых сплавов / Л. А. Арбузова, Б. И. Бондарев, А. А. Рожков, Ю. В. Шамаков, Н. И. Лашков, В. Д. Талалаев. № 95115464/02; заяв. 31.08.95 ; опубл. 27.07.1997.
13. Banhart J., Baumeister J. Deformation characteristics of metal foams // J. of materials sciences. 1998. Vol. 33, № 5. P. 1431–1440.
14. Asholt P. Metal foams and porous metal structures. // Intern. Conf. / J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck, editors (14–16 June, 1999). Germany : MIT Press-Verlag. P. 133.
15. Kopanidis A., Theodorakakos A., Gavaises E., Bouris D. 3D numerical simulation of flow and conjugate heat transfer through a pore scale model of high porosity open cell metal foam // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53, Iss. 11–12. P. 2539–2550.
16. Zhao C. Y. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells // International J. of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55, Iss. 13–14. P. 3618–3632.
17. Авдеенко А. М., Крупин Ю. А. Сильнопористые структуры – новый класс конструкционных материалов // Тяжелое машиностроение. 2008. № 7. С. 18–21.
18. Ершов М. Ю., Лепешкин И. А. Вспененный алюминий в автомобилестроении // Автомобильная промышленность. 2010. № 10. С. 36–39.
19. Крушенко Г. Г. Стабилизация ячеек в пенометаллах нанопорошками // Нанотехника. 2012. № 4. С. 77–79.
20. О роли смачиваемости и распределения твердых частиц в стабилизации вспененных алюминиевых расплавов / А. В. Бякова [и др.] // Адгезия расплавов и пайка материалов. 2009. Вып. 42. С. 5–22.
21. Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen // Annalen der Physik. 1905. B. 322 (8). S. 549–560.
22. Крушенко Г. Г. Литейные нанопокрyтия // Нанотехника. 2012. № 2. С. 93–97.
23. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / В. П. Сабуров [и др.]. Новосибирск : Наука, 1995. 344 с.
24. Карепина Е. Е., Годымчук А. Ю. Седиментационная устойчивость оксидных наночастиц несферической формы // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТЧТ-2013): II Всерос. научно-технич. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с междунар. участием. В 2 т. Т. 1. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. С. 189–192.
25. Gibson L. J., Ashby M. F. Cellular Solids: Structure and Properties. Oxford: Pergamon Press, 1988. 357 p.
26. Schwingel D. [et al.]. Aluminium foam sandwich structures for space applications // Acta Astronautica. 2007. Vol. 61, Iss. 1–6. P. 326–330.
27. Пат. № 2202454 Рос. Федерация, С2 МПК⁷ B23K9/23 B23K103/10. Способ соединения заготовок из пеноалюминия / Погибенко А. Г. [и др.]. № 2001117640/02; заяв. 29.06.01 ; опубл. 20.04.03.
28. Patent US 707,892. Application filed February 12, 1902. Serial No. 93,797. (No specimens.) Art of treating

starch material / Alexander P. Anderson. US Patent Office. Patented August 26, 1902.

29. Patent US 2,082,313. 4 Claims (Cl. 99-138). Application June 18, 1936. Serial No 86,002. In Great Britain July 11, 1935. Process for manufacturing articles of food or confectionary / John W. Todd. US Patent Office. Patented June 1, 1937.

30. Patent US 2,082,313. 4 Claims (Cl. 99-138). Application June 18, 1936. Serial No 86,002. In Great Britain July 11, 1935. Process for manufacturing articles of food or confectionary / John William Todd. United States Patent Office. Patented June 1, 1937.

References

1. Krushenko G. G. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 3 (43), p. 124–126.

2. Banhart J. Manufacturing routes for metallic foams. *J. of metals*. 2000. Vol. 52. P. 22–27.

3. Saenz E., Baranda P. S., Bonhomme J. Porous and cellular materials for structural applications. In: Schwartz DS, Shih DS, Evans AG, WadleyHNG, editors. MRS Symp. Proc. 1998. Vol. 521. P. 83.

4. Tang H. P. et al. Fractal dimension of pore-structure of porous metal materials made by stainless steel powder. *Powder Technology*, February 2012. Vol. 217. P. 383–387.

5. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*. 2001. Vol. 46. P. 559–632.

6. Cambroner L. E. G. et al. Manufacturing of Al-Mg-Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent. *J. of materials processing technology*. 2009. Vol. 209, Issue 4. P. 1803–1809.

7. Kovacic J., Simancik F. Comparison of zinc and aluminium foam behaviour. *Kovove materialy*. 2004. Vol. 42, no. 2. P. 79–90.

8. Reglero J. A. et. al. Aluminium foams as a filler for leading edges: Improvements in the mechanical behavior under bird strike impact tests. *Materials and design*. 2011. Vol. 32, no. 2. P. 907–910.

9. Patent US 2,434,775. 7 Claims. (Cl. 75-20). Application May 8, 1943. Serial No 486,209. Process for making foamlike mass of metal / Benjamin Sosnick. US Patent Office. Patented January 20, 1948.

10. Patent US 1,252,887. Application filed August 27, 1917. Serial No 188,473. Process making alloys / Henry L. Doherty. US Patent Office. Patented January 8, 1918.

11. Al'tman M. B., Merkulov V. V., Minaev B. F., Golovchanskij B. V., Borok B. A. *Ustrojstvo dlja poluchenija penoaluminija iz aljuminievyh splavov* [A device for producing foam aluminum, aluminum alloy] A. p. USSR number 125682. Class 40b/330, 49/3, stated. 05.11.1959, Bull. no. 2. 1960.

12. Arbuzova L. A., Bondarev B. I., Rozhkov A. A., Shmakov Ju. V., Lashkov N. I., Talalaev V. D. *Sposob poluchenija poristyh polufabrikatov iz poroshkov aljuminievyh splavov* [A method of producing porous semi-finished aluminum alloy powder]. Patent RF no. 2085339 S1 MPK6 B22F3/11, B22F3/18, 1997.

13. Banhart J., Baumeister J. Deformation characteristics of metal foams. *J. of materials sciences*, 1998. Vol. 33, no. 5. P. 1431–1440.

14. Asholt P. Metal foams and porous metal structures. In: Banhart J., Ashby M.F., Fleck N.A., editors. Intern. Conf., Germany: MIT Press-Verlag, 14–16. June 1999. P. 133.

15. Kopanidis A., Theodorakakos A., Gavaises E., Bouris D. 3D numerical simulation of flow and conjugate heat transfer through a pore scale model of high porosity open cell metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, May 2010. Vol. 53. Issues 11–12, P. 2539–2550.

16. Zhao C. Y. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, June 2012. Vol. 55, Issues 13–14. P. 3618–3632.

17. Avdeenko A. M., Krupin Ju. A. *Tjazheloe mashinostroenie*. 2008, no. 7. P. 18–21.

18. Ershov M. Ju., Lepeshkin I. A. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 2010, no. 10. P. 36–39.

19. Krushenko G. G. *Nanotehnika*. 2012, no. 4. P. 77–79.

20. Bjakova A. V. et al. *Adgezija rasplavov i pajka materialov*. 2009, no. 42. P. 5–22.

21. Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*. 1905. B. 322 (8): S. 549–560.

22. Krushenko G. G. *Nanotehnika*, 2012. № 2. P. 93–97.

23. Saburov V. P., Cherepanov A. N., Zhukov M. F., Krushenko G. G. *Plazmohimicheskij sintez ul'tradispersnyh poroshkov i ih primeneniye dlja modifizirovaniya metallov i splavov*. Novosibirsk, Nauka. Sibirskaja izdatel'skaja firma RAN, 1995, 344 p.

24. Karepina E. E., Godymchuk A. Ju. [Sedimentation stability of oxide nanoparticles nonspherical]. *II Vseros. nauchno-tehnich. konf. molodyh uchenyh, aspirantov i studentov s mezhdunarodnym uchastiem "Vysokie tehnologii v sovremennoj nauke i tehnike" VTSNT-2013* [I All-Russia. Scientific-Technical. conf. young scientists and students with international participation "High technology in modern science and technology" VTSNT 2013]. Tomsk, Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehnicheskij universitet, 2013. Vol. 1. P. 189–192.

25. Gibson, L. J. and Ashby, M. F. *Cellular Solids: Structure and Properties*, Pergamon Press, Oxford. 1988. 357 p.

26. Schwingel D. et. al. Aluminium foam sandwich structures for space applications. *Acta Astronautica*. 2007. Vol. 61. Issue 1–6. P. 326–330.

27. Pogibenko A. G. et al. *Sposob soedinenija zagotovok iz penoaluminija* [Way to connect pieces of foam aluminum]. Patent RF no. 2202454 S2 MPK7 V23K9/23 V23K103/10, 2003.

28. Patent US 707,892. Application filed February 12, 1902. Serial No. 93,797 (No specimens.) Art of treating starch material / Alexander P. Anderson. US Patent Office. Patented August 26, 1902.

29. Patent US 2,082,313. 4 Claims (Cl. 99-138). Application June 18, 1936. Serial No 86,002. In Great Britain July 11, 1935. Process for manufacturing articles of food or confectionary / John W. Todd. US Patent Office. Patented June 1, 1937.

30. Patent US 2,082,313. 4 Claims (Cl. 99-138). Application June 18, 1936. Serial No 86,002. In Great

Britain July 11, 1935. Process for manufacturing articles of food or confectionary / John William Todd. United States Patent Office. Patented June 1, 1937.

© Крушенко Г. Г., 2014

УДК 681.51

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОПРИВОДАМИ

Р. А. Мирзаев, Н. А. Смирнов

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ramirzaev@mail.ru, smirnov@sibsau.ru

Рассматривается алгоритмическое обеспечение системы автоматического управления (САУ) сервоприводами. Предложена структура программы управления сервоприводами с компьютера. Представлена блок-схема алгоритма процедуры перемещения сервопривода. Создан исследовательский стенд для тестирования и отладки системы автоматического управления. При помощи стенда проверена работоспособность предложенного решения по управлению сервоприводами. Также проверена точность отработки требуемых углов положения приводов. Таким образом, поставлена и решена задача создания САУ сервоприводами. Возможно использование полученных результатов при разработке систем управления манипуляторами, приводимыми в движение сервоприводами.

Ключевые слова: система автоматического управления, сервопривод, манипулятор, исследовательский стенд.

AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF MANIPULATOR

R. A. Mirzaev, N. A. Smirnov

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: ramirzaev@mail.ru, smirnov@sibsau.ru

Algorithmic support of the automatic control system actuators is considered. The structure of the program for control servo with computer is proposed. Also a flowchart procedure for moving the actuator is presented. Research stand for testing and debugging of automatic control system is created. The proposed control system of actuators is tested using the stand. The accuracy of the angular position of the drives is checked. Thus, the task of creating a system of automatic control servo is posed and solved. You can use obtained results in the development of control systems of manipulators which include servos.

Keywords: automatic control system, servo manipulator, research stand.

В перспективных направлениях промышленности, таких как ракетно-космическая техника и станкостроение, актуальной является задача увеличения точности приводов ориентирующих устройств. Обычно для решения этой задачи используются многозвенные рычажные манипуляторы либо гибкие манипуляторы [1]. В некоторых областях техники является перспективным применение роботов-манипуляторов на основе механизмов параллельной кинематики. Применение механизмов параллельной структуры эффективно в механической обработке изделий сложной формы

(например штампов, пресс-форм, лопаток турбин и т. д.), когда требуется перемещение инструмента по пяти-шести координатам [2].

В отличие от традиционных манипуляторов, структуры с параллельной кинематикой содержат замкнутые кинематические цепи и воспринимают нагрузку как пространственные фермы [3]. Их звенья работают на растяжение и сжатие, что обеспечивает жесткость всей конструкции и, как следствие, повышение точности позиционирования схвата. В работе [4] рассматриваются математические и имитационные

модели кинематики и динамики некоторых параллельных механизмов, а также задача оптимизации их формы и размеров.

Достоинствами манипуляторов, построенных на основе параллельных механизмов, являются большая точность и жесткость, высокие рабочие нагрузки по сравнению с традиционными роботами-манипуляторами [5].

Вместе с тем рассматриваемые станки имеют определенные недостатки, существенно ограничивающие область их преимущественного использования по сравнению со станками традиционной структуры [1]. Значительным недостатком является то, что даже простейшие прямолинейные перемещения инструмента вдоль основных координатных осей требуют одновременного изменения длин всех штанг, работы приводов и обеспечения точности результирующего перемещения интерполяцией всех составляющих перемещений. Применение механизмов параллельной структуры невозможно без решения прямой и обратной задач кинематики манипуляторов, которые решаются сложнее, чем для традиционных манипуляторов. Иногда аналитическое решение не может быть найдено [2].

Для управления приводами механизма создана программа, управляющая тремя сервоприводами с компь-

ютера. Решение обратной задачи кинематики манипуляторов должно быть проведено до использования программы [3]. В программу вводятся данные о требуемых углах положения трех приводов. Заданные данные о положении приводов преобразуются, и на их основе генерируются управляющие сигналы. Далее они передаются через USB-порт к аппаратному преобразователю USB-UART. Затем управляющие сигналы поступают на контроллер сервоприводов, который генерирует ШИМ-сигналы к сервоприводам. САУ состоит из программы, работающей на компьютере, преобразователя сигналов USB-COM и контроллера СП. Схема САУ показана на рис. 1.

Компьютерная программа управления сервоприводом выполняет следующие функции:

- принимает команды о требуемых перемещениях сервоприводов из автоматически сформированного файла или введенные оператором;
- принимает из файла данные о требуемых перемещениях сервоприводов (процедура ExeString на рис. 2);
- рассчитывает количество шагов (процедура MovServo на рис. 2);
- отправляет управляющие сигналы (номер двигателя, требуемое положение) в порт компьютера (процедура Serial на рис. 2).

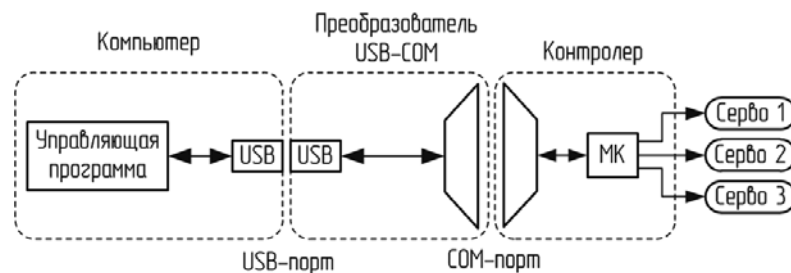


Рис. 1. Функциональная схема САУ: МК – микроконтроллер

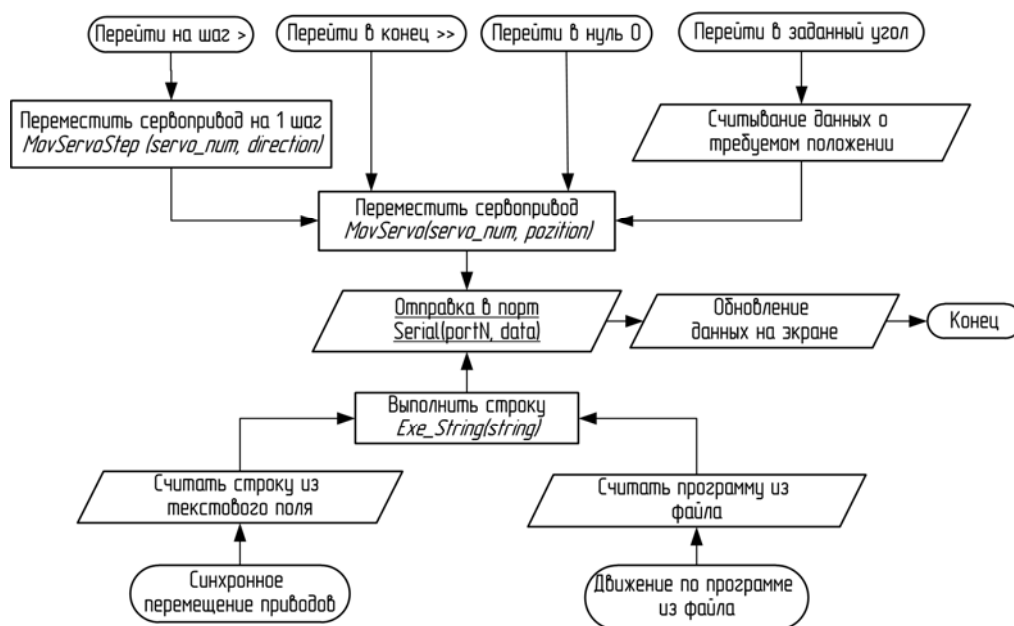


Рис. 2. Функциональная схема работы управляющей программы

Оператор имеет возможность управлять каждым сервоприводом в отдельности по следующим командам:

- переместить на шаг назад (кнопка «<») или вперед (кнопка «>»);
- переместить в крайнее левое положение (кнопка «<<») или в крайнее правое положение (кнопка «>>»), или в среднее положение (кнопка «0»);
- перейти в заданный угол (угол задается в соответствующем поле, потом нужно нажать кнопку «ОК»).

Также возможно синхронное управление двигателями (конечный угол задается в соответствующем поле, потом нужно нажать кнопку «Выполнить»). Кроме того, имеется возможность экспорта команд перемещений из файла и их выполнения. При этом используются команды, приближенные к G-коду. Данные возможности важны при управлении устройствами параллельной кинематики, так как в таких устройствах допустимые координаты положения каждого привода зависят от координат положения остальных приводов из-за кинематической замкнутости механизма. Поэтому необходимо синхронное перемещение приводов.

Как видно из рис. 2, если необходимо перемещение одного сервопривода, происходит обращение к процедуре *MovServo*, в которую поступают данные: номер привода, позиция. блок-схема алгоритма этой процедуры представлена на рис. 3. Если необходимо синхронное вращение приводами, используется процедура обработки строки *ExeString*, в которую поступают данные в виде строки, содержащей требуемое положение трех приводов. После расчета параметров процедура *MovServo* или *ExeString* отправляет в порт к контроллеру команды о требуемом положении приводов при помощи процедуры *Serial*, а также обновляет данные на экране.

Интерфейс управляющей программы представлен на рис. 4.

В соответствии со схемой САУ (рис. 1) для отладки и тестирования САУ создан исследовательский стенд (рис. 5), который включает в себя:

- компьютер с работающей на нем программой управления сервоприводами;
- аппаратный преобразователь USB-UART;
- контроллер сервоприводов на базе микроконтроллера Atmega16;
- подставку из оргстекла с тремя сервоприводами и градуированными шкалами.

Создана компьютерная программа для управления сервоприводами. Программа написана специально для управления приводами пространственных механизмов с параллельной кинематикой. Реализована возможность синхронного перемещения по нескольким координатам. Исследовательский стенд позволяет тестировать и отлаживать САУ. При помощи стенда проверена работоспособность предложенного решения по управлению сервоприводами. Также проверена точность отработки требуемых углов положения приводов. Таким образом, поставлена и решена задача создания САУ сервоприводами. Возможно использо-

вание полученных результатов при разработке систем управления манипуляторами, приводимыми в движение сервоприводами.

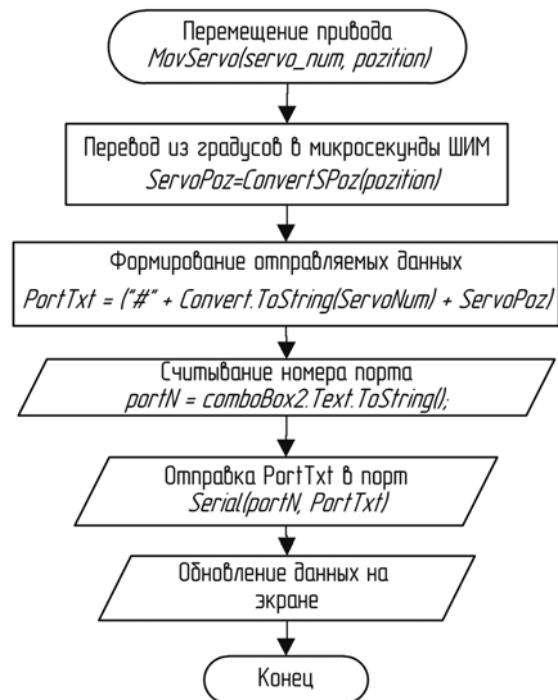


Рис. 3. Блок-схема алгоритма процедуры перемещения сервопривода *MovServo*

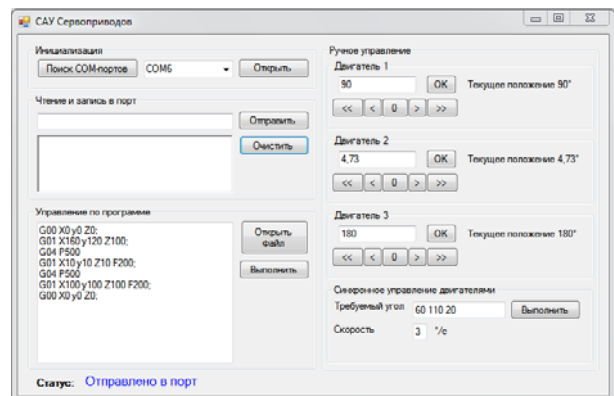


Рис. 4. Интерфейс программы управления сервоприводами

Библиографические ссылки

1. Рыбак Л. А., Ержуков В. В., Чичварин А. В. Эффективные методы решения задач кинематики и динамики робота-станка параллельной структуры. М. : Физматлит, 2011, 148 с.
2. Merlet J.-P. Parallel Robots. Second Ed. The Netherlands : Springer, 2006, 401 p.
3. Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А. Автоматизированная система управления манипулятором // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2 (48). С. 201–205.
4. Антонов С. Е. Разработка автоматизированного программно-аппаратного комплекса для исследования

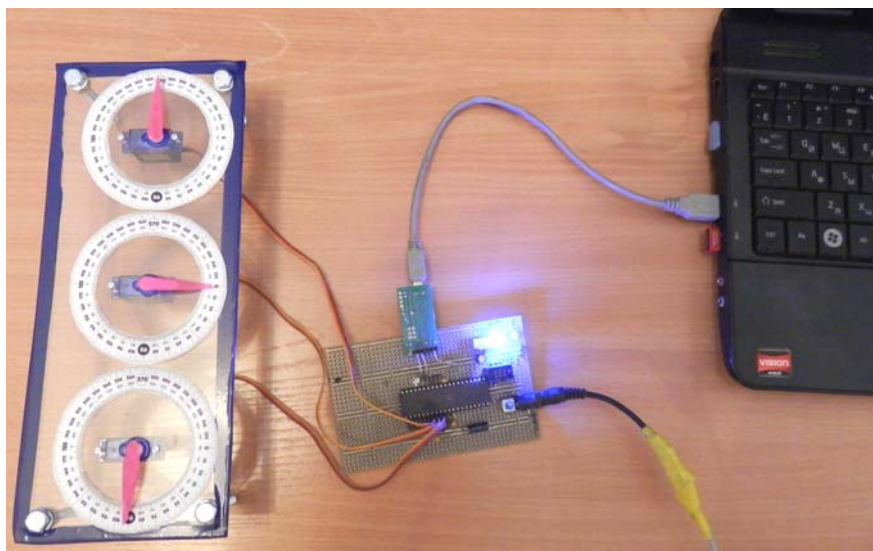


Рис. 5. Внешний вид исследовательского стенда

многокоординатных нелинейных механизмов на примере прецизионных триподов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. СПб., 2013. 146 с.

5. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб. : Профессия, 2003, 752 с.

References

1. Rybak L. A., Erzhukov V. V., Chichvarin A. V. *Effektivnye metody resheniya zadach kinematiki i dinamiki robota-stanka parallel'noy struktury* (Efficient methods for solving robot kinematics and dynamics of machine-parallel structure). Moscow, Fizmatlit Publ., 2011, 148 p.

2. Merlet J.-P. *Parallel Robots* (Second Edition). The Netherlands, Springer, 2006, 401 p.

3. Mirzaev R. A., Smirnov N. A., *Vestnik SibGAU*, 2013, no. 2(48), pp. 62–64.

4. Antonov S. E. *Razrabotka avtomatizirovannogo programmno-apparatnogo kompleksa dlya issledovaniya mnogokoordinatnykh nelineynykh mekhanizmov na primere pretsizionnykh tripodov* (Development of the automated hardware-software complex for the study of nonlinear mechanisms multi-axis on example precision tripods. Diss. candidate tehn. sciences: 05.13.06). St. Petersburg, 2013, 146 p.

5. Besekerskiy V. A., Popov E. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of automatic control systems). St. Petersburg, Professiya Publ., 2003, 752 p.

© Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А., 2014

УДК 544.623.032.52

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ ТОКА В РАСТВОРЕ НА РАСПАД H_2O_2 ПРИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ*

Е. А. Морозов^{1,2}, С. В. Трифонов^{1,2}, Ю. А. Куденко², А. А. Тихомиров^{1,2}

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

E-mail: transserfer89@gmail.com

²Институт биофизики СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50.

E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru

* Работа выполнена при финансовой поддержке бюджетной темы № 56.1.4. «Оценка устойчивости ценозов высших растений замкнутых экологических систем, включающих человека, к выращиванию на питательных средах из минерализованных органических отходов»; раздел VI «Биологические науки», подраздел 56 «Физиология и биохимия растений, фотосинтез, взаимодействие растений с другими организмами» Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы.

Наибольшую трудность в создании замкнутых экологических систем сегодня представляет нахождение таких путей переработки отходов, которые не создают тупиковых продуктов. В Институте биофизики СО РАН проблема решалась методом окисления взвеси органических отходов в водной среде H_2O_2 . Оптимальные параметры возбуждающего распада H_2O_2 тока были неизвестны. Цель работы – определение этих параметров. На угольные электроды, опущенные в емкость с растворами, подавали ток заданной частоты, косвенно определяли интенсивность распада H_2O_2 по скорости выделения газов. Были получены графики зависимости скорости распада H_2O_2 от частоты и формы возбуждающего тока в диапазоне сверхнизких частот. Установлен максимум интенсивности распада в точке 35 Гц. Результаты применимы как для разработки космических ЗСЖО, так и для решения экологических проблем на Земле.

Ключевые слова: системы жизнеобеспечения, минерализация, замкнутый цикл, частота.

RESEARCHING THE INFLUENCE OF CURRENT FORM AND FREQUENCY IN SOLUTION ON H_2O_2 DISASSIMILATION DURING ORGANIC WASTES MINERALIZATION IN CLOSED LIFE SUPPORT SYSTEMS

Ye. A. Morozov^{1,2}, S. V. Trifonov^{1,2}, Yu. A. Kudenko², A. A. Tikhomirov^{1,2}

¹ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

E-mail: transserfer89@gmail.com

²Institute of Biophysics SB RAS

50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru

Today the most difficult issue in developing closed ecosystems is to find ways of wastes utilization that gains no deadlock products. In Institute of Biophysics, SB RAS, this problem was solved by oxidation of organic wastes in aqueous H_2O_2 medium. Optimal parameters of current, activating H_2O_2 disassimilation, were unknown. This work is aimed to define these parameters. Frequency of current between carbon electrodes located in glass with solutions was set by operator. Intensity of H_2O_2 disassimilation was determined indirectly by speed of gas delivery. Graphs of dependence of H_2O_2 disassimilation on frequency and form of activating current in super-low frequency range were obtained. Maximum intensity of H_2O_2 disassimilation was determined under 35 Hz. The results are applicable both for developing space LSS and solving ecological problems on Earths.

Keywords: life support systems, mineralization, closed cycle, frequency.

Для исследования и заселения других планет необходимы биолого-технические системы жизнеобеспечения (БТСЖО) [1; 2]. Основным параметром, определяющим время автономной работы БТСЖО, является степень замкнутости, обеспечиваемой за счет возвращения химических элементов в круговорот веществ в системе. Для решения этой проблемы в Институте биофизики СО РАН был разработан оригинальный метод минерализации органических отходов в водной среде пероксида водорода под действием переменного электрического тока с последующим вовлечением их в круговоротный процесс БТСЖО [3; 4]. Однако требуется оптимизация такого круговоротного процесса, в том числе по критериям минимальных затрат времени и энергии, которая не снизила бы качественных характеристик минерализованных удобрений. В связи с этим представляет интерес выяснить характер зависимости скорости окисления органических отходов от частоты и формы подаваемого переменного электрического тока.

Описание метода измерений. Переменный ток инициирует распад перекиси водорода, что ускоряет образование таких радикалов, как $O\cdot$ и $OH\cdot$, благодаря чему ускоряется процесс окисления органических

отходов. О скорости разложения перекиси можно косвенно судить по скорости выделения газа из окисляемого раствора отходов. В процессе мокрого окисления выделяется в основном 1–29 % H_2 , 23–83 % O_2 и 4–70 % CO_2 , а также микропримеси летучих органических соединений [4]. Для определения скорости выделения газа была разработана экспериментальная установка, изображенная на рис. 1.

Измерительная установка представляет собой емкость с раствором, в который помещен перевернутый цилиндр, полностью заполненный раствором. В цилиндр помещена газовыводящая трубка. Благодаря устройству данной установки газ, выделяющийся при окислении, попадает в цилиндр и его объем можно измерить по шкале цилиндра. Температура раствора выдерживалась в районе 20–25 °С посредством водного охлаждения. Переменное напряжение 30 В подавали на электроды и таким образом инициировали реакцию.

Данная установка позволила провести последовательное измерение скорости реакции в зависимости от нескольких частот: на каждую частоту приходилось по 10 мл выделяемого газа для урины и 5 мл для экзометаболитов и соломы. Реакция окисления про-

водилась в трех повторностях для каждой частоты. В качестве раствора использовали перекись водорода, смешанную с такими отходами, как моча (0,5 мл H_2O_2 (33 %) на 1 мл мочи), экзометаболиты человека + рыбные отходы (4 мл H_2O_2 (33 %) на 1 г нативных плотных отходов человека, 0,5 мл H_2O_2 (33 %) на 1 мл мочи и 4 мл H_2O_2 (33 %) на 1 г сухих рыбных отходов, соотношение плотных, жидких и рыбных отходов 1 г : 10 мл : 0,5 г соответственно), солома (16–18 мл H_2O_2 (33 %) на 1 г). Данные растворы органических отходов были выбраны для того, чтобы проверить влияние среды типичных для БТСЖО отходов на скорость распада перекиси водорода. Были проведены холостые эксперименты: при тех же частотах и напряжении пропускали электрический ток через H_2O_2 (11 %) с добавлением KNO_3 20 г/л для обеспечения электропроводности, из соображений, что данная соль не вызывает газовыделения или существенного осаждения на электродах, и чистый водный раствор KNO_3 20 г/л. Для мочи ток был в пределах 0,7–1 А, для смеси экзометаболитов с рыбными отходами – 0,5–0,6 А, для соломы – 0,15–0,25 А. Сила тока в холостых экспериментах составляла 0,4–0,6 А для раствора H_2O_2 и 1–1,5 А для водного раствора KNO_3 .

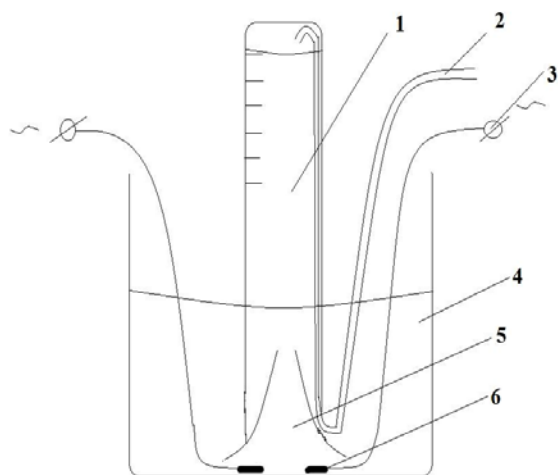


Рис. 1. Установка по определению скорости выделения газа:

1 – цилиндр (100 мл); 2 – газопроводящая трубка; 3 – источник переменного тока (от генератора частоты); 4 – емкость с раствором (500 мл); 5 – воронка; 6 – угольные электроды

Объем раствора составлял 750 мл, суммарный объем газа, выделяемого с такого объема раствора, составлял 35–50 л (в зависимости от вида отходов), соответственно, десятками миллилитров можно пренебречь, что позволяет последовательно менять частоту, не сменяя сам раствор.

С помощью секундомера измерялось время, за которое наберется 10 мл газа, таким образом вычислялась скорость выделения газа в миллилитрах в минуту.

Полученные результаты. До постановки вопроса о зависимости скорости окисления органических веществ от частоты и формы переменного тока эксперименты по минерализации проводились на частоте

бытовой сети 50 Гц, с синусоидальной формой тока. Сначала частоту увеличивали и уменьшали с шагом 10 Гц для определения характера кривой, после проводили 3 повторности с шагом до 1 Гц в районе наибольшей интенсивности.

Результаты выявленных в экспериментах зависимостей скорости выделения газа (мл/мин) от частоты (Гц) при синусоидальной форме тока представлены на рис. 2.

Видно, что тип минерализуемых отходов не влияет на характер зависимости скорости окисления от частоты, а значит, данная зависимость определяется только взаимодействием перекиси с переменным электрическим током. Максимальная скорость процесса при этом наблюдается при 35 Гц. В холостом опыте с водным раствором KNO_3 выделение газа практически не происходило (около 1 мл/ч), поэтому вклад электролиза воды в газообразование не стоит принимать в расчет.

Холостой опыт с водным раствором H_2O_2 (11 %) подтвердил, что ток влияет лишь на характер разложения перекиси. Из графиков видно, что скорость выделения газа в холостом эксперименте почти в 2 раза превосходит скорость выделения газа при окислении мочи и в 5–6 раз скорость выделения газа при окислении экзометаболитов и соломы. Это скорее говорит о том, что в растворах с отходами происходит стабилизация перекиси водорода органическими соединениями [5]. Различие в скорости выделения газа может быть объяснено и разной силой тока: для меньших токов скорость газовыделения ниже.

В отсутствие силы тока окисление органических отходов происходит крайне медленно. Так, например, отходы, смешанные с H_2O_2 в течение нескольких недель, теряют только пигментацию, но выделения газа почти не происходит. При минерализации экзометаболитов, предварительно стоявших 2 месяца смешанными с перекисью, не было заметно разницы во времени окисления и энергопотреблении по сравнению с теми же экзометаболитами, стоявшими смешанными с перекисью лишь сутки.

Далее были проведены опыты по выявлению характера влияния формы тока на скорость реакции. Бытовая сеть выдает синусоидальную форму тока, генератор также позволял исследовать ток с формой меандр. Опыты были проведены только на моче, поскольку было показано, что частотная зависимость определяется только взаимодействием перекиси с полем. Результаты опыта представлены на рис. 3.

Ускорение реакции при форме тока меандр может быть объяснено следующим образом. Молекула перекиси водорода имеет некоторое пороговое значение энергии активации [6], токи ниже которого не способны ее активировать. Соответственно, при синусоидальном токе энергия переменного электромагнитного поля вблизи нулевых значений не способна инициировать распад перекиси водорода. В случае меандра значение тока с положительного на отрицательный меняется ступенчато, и энергия электрического поля во все моменты времени превышает пороговое значение $E_{\text{акт}}$. В результате, в случае тока формы меандр в процессе окисления отсутствуют промежутки времени без активации перекиси.

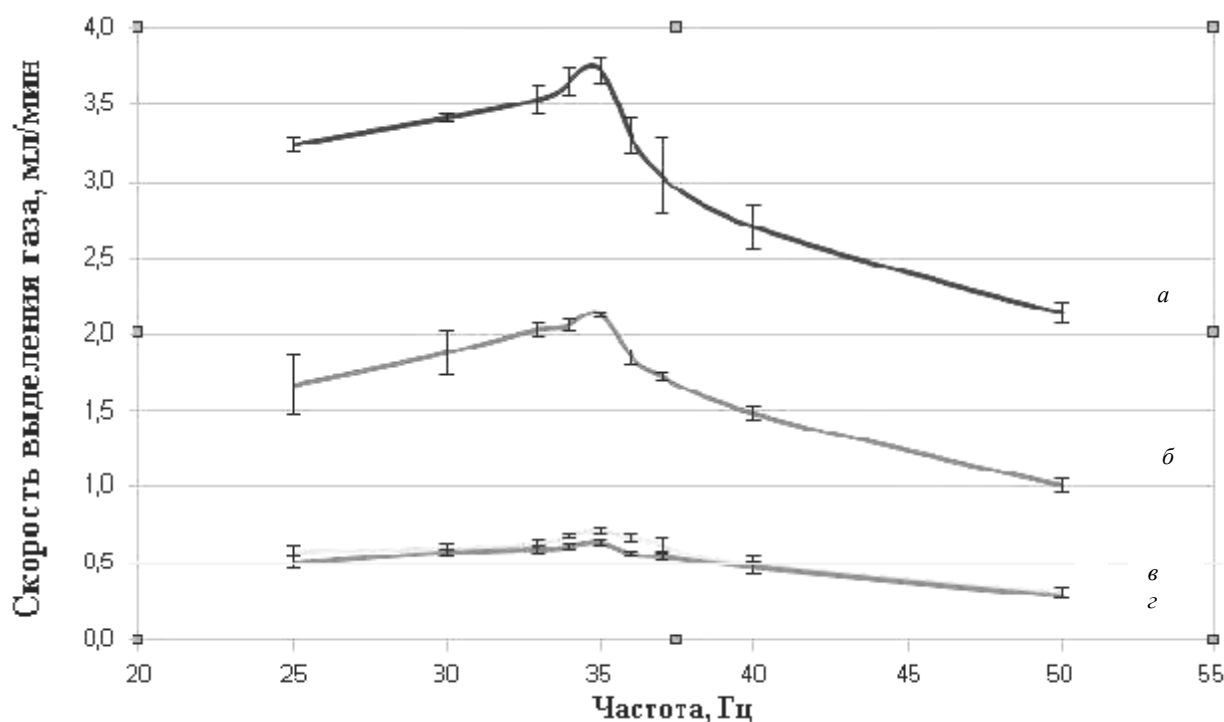


Рис. 2. Зависимость скорости выделения газа (мл/мин) от частоты (Гц):
 а – голодный ход; б – урина; в – экзометаболиты + рыбные отходы; г – солома

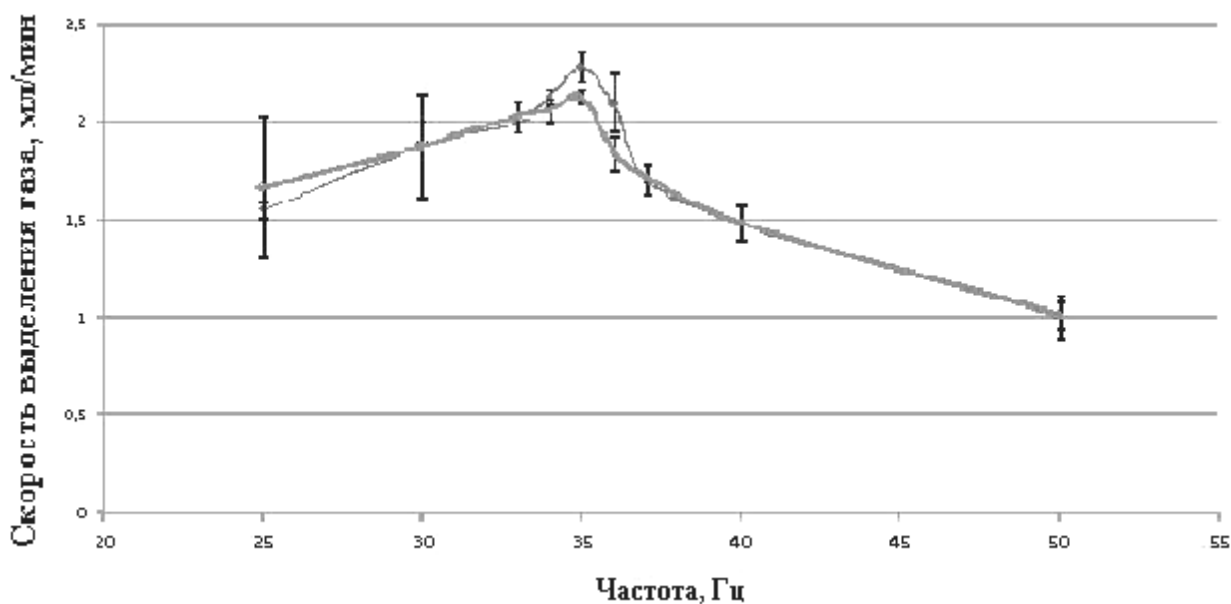


Рис. 3. Мокрое сжигание урины: толстая кривая – синусоидальная форма тока; тонкая – меандр

Таким образом, впервые была исследована зависимость скорости разложения перекиси водорода от частоты и формы подаваемого электрического тока в диапазоне сверхнизких частот. В ходе работы было выявлено, что имеется максимум интенсивности распада перекиси в точке 35 Гц, не зависящий от типа окисляемых органических отходов. Данные результаты важны для создания звена переработки отходов в минерализованные удобрения в космических ЗСЖО,

а также для решения экологических проблем в земных приложениях.

Библиографические ссылки

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. Manmade Closed Ecological Systems. Taylor & Francis Inc., 2003. 400 p.
2. Tako Y. Closed Habitation Experiments and Material Circulation Technology // Proceedings of the

International Symposium on Closed Habitation Experiments and Material Circulation Technology / Ed. by Tako Y. Japan : Institute for Environmental Sciences, 2004. 500 p.

3. Пат. № 2111939 Рос. Федерация. Способ утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящий к получению из них удобрений / Куденко Ю. А., Павленко Р. А. ; опубл. 27.05.1998 ; Бюл. № 15. 4 с.

4. Assessing the feasibility of involving gaseous products resulting from physicochemical oxidation of human liquid and solid wastes in the cycling of a bio-technical life support system / A. Tikhomirov, Yu. Kudenko, S. Trifonov, S. Ushakova // *Advances in Space Research*. 2012. Vol. 49. P. 249–253.

5. Перекись водорода и перекисные соединения / под ред. М. Е. Позина Л.–М. : ГНТИ химической литературы, 1951. 476 с.

6. Кисленко В. Н., Берлин Ад. А. Кинетика и механизм окисления органических веществ пероксидом водорода // *Успехи химии*. 1991. Т. 60, № 5. С. 949–981.

References

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. *Manmade Closed Ecological Systems*. Taylor & Francis Inc., 2003. 400 p.

2. Tako Y. *Closed Habitation Experiments and Material Circulation Technology: Proceedings of the International Symposium on Closed Habitation Experiments and Material Circulation Technology*. Edited by Tako Y. – Japan, Institute for Environmental Sciences, 2004. 500 p.

3. Kudenko Ju. A., Pavlenko R. A. *Sposob utilizacii othodov zhiznedejatel'nosti cheloveka i nesjedobnoj biomassy rastenij, privodjashhij k polucheniju iz nih udobrenij* [Way of utilization of human wastes and inedible plant biomass, gaining hydroponic fertilizer]. Patent RF, no. 2111939, 1998.

4. Tikhomirov A., Kudenko Yu., Trifonov S., Ushakova S. Assessing the feasibility of involving gaseous products resulting from physicochemical oxidation of human liquid and solid wastes in the cycling of a bio-technical life support system. *Advances in Space Research*. 2012, vol. 49, p. 249–253.

5. *Perekis' vodoroda i perekisnye soedinenija* (Hydrogen peroxide and peroxide compounds). Ed. M. E. Pozina. Leningrad–Moscow, GNTI Chemical Literature Publ., 1951. 476 p.

6. Kislenco V. N., Berlin Ad. A. *Uspehi himii*. 1991, vol. 60, no. 5, p. 949–981.

© Морозов Е. А., Трифонов С. В.,
Куденко Ю. А., Тихомиров А. А., 2014

УДК 29. 19. 22

ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫЕ ФЕРРИТОВЫЕ ПОКРЫТИЯ

В. Н. Саунин, С. В. Телегин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: telegin@sibsau.ru

Предложена методика плазменного напыления ферритовых покрытий из порошков спеченных ферритовых изделий. Исследовано влияние технологических факторов напыления и фракционного состава на морфологию, изменение структурного, химического состава и магнитных свойств покрытий. Установлено, что массопотери кислорода в феррите при плазменном напылении определяются фракционным составом исходного порошка, родом используемых газов, температурой нагрева и временем пребывания частиц в плазменной струе, коэффициентом диффузии кислорода. Увеличение фракции напыляемых порошков стабилизирует химический состав покрытий. Введение в плазменную струю технологического газа кислорода (1–3 %) даже при больших мощностях напыления стабилизирует химический состав покрытия по кислороду. Рентгенографическими исследованиями установлено, что в материале покрытия возникает небольшое количество аморфной фазы. Технология плазменного напыления позволяет совместить операции нанесения покрытия и отжига за счет управления температурой в пятне напыления и расхода технического газа кислорода, что обеспечивает химический состав и микроструктуру покрытия с необходимым уровнем магнитных характеристик.

Ключевые слова: ферриты, плазменное напыление, диссоциация, покрытие, магнитная проницаемость.

PLASMA SPRAYING FERRITE COVERINGS

V. N. Saunin, S. V. Telegin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: telegin@sibsau.ru

The technique of plasma spraying of coating ferrite powders sintered ferrite products is offered. The influence of technological factors spraying and fractional composition of the morphology, structural change, chemical composition and magnetic properties of the coatings is researched. It is found that the loss of oxygen in the ferrite during plasma spraying determined fractional composition of the starting powder, originally used gas, heating temperature and residence time of the particles in the plasma jet, oxygen diffusion coefficient. Increase in the fraction of the spray powders stabilizes the chemical composition of the coatings. Introduction into the plasma jet process gas oxygen (1–3 %), even at high power deposition stabilizes the chemical composition of the coating with respect to oxygen. Radiographic studies have established that in the coating material occurs a small amount of amorphous phase. Plasma deposition technology allows to combine the coating operation, and by controlling the annealing temperature in the spot deposition process gas flow rate and oxygen, which provides the chemical composition and microstructure of the coatings with the required level of magnetic properties.

Keywords: ferrites, plasma spraying, dissociation, coating permeability.

Внедрение в производство достижений электроники, радиотехники, вычислительной техники во многом определяется темпами исследований в области создания материалов для этих отраслей. Видное место среди этих материалов принадлежит ферритам, представляющим собой соединения оксида железа с оксидами других металлов и обладающим уникальным сочетанием магнитных, электрических и других свойств.

Важным в улучшении свойств материалов электронной техники представляется установление закономерностей влияния технологических факторов приготовления материалов на химический состав, структуру, магнитные и электрические свойства.

Производство ферритовых изделий осуществляется из механической смеси порошков оксидов по керамической технологии.

Создание массивных сердечников сложной геометрической формы или покрытий на поверхности корпусов изделий возможно с применением технологии плазменного напыления, позволяющей в едином технологическом процессе расплавить частицы исходной шихты в высокотемпературной области плазменной струи и осуществить компактирование без использования громоздкого и дорогостоящего прессового оборудования, энергоемкого печного хозяйства.

В этом случае особый интерес представляет изучение стабильности химического состава, модификации структуры и магнитных свойств плазмонапыленных ферритовых покрытий.

При плазменном напылении оксиды исходных порошков, подвергаясь высокотемпературному воздействию плазменной струи, изменяют химический состав за счет термической диссоциации и потери летучих компонентов (O_2 , O, MeO, FeO, Me и др.) и структуру при охлаждении.

Поэтому проведение расчетов температурных зависимостей констант скоростей реакции и парциаль-

ных давлений летучих компонентов представляет значительные трудности, а точность используемых методов расчета для равновесных условий оказывается невысокой. Разница расчетных и экспериментальных значений парциальных давлений кислорода в ферро-оксидах может составлять несколько порядков [1; 2].

Массопотери кислорода в феррите при плазменном напылении определяются рядом факторов: фракционным составом исходного порошка, родом используемых газов, температурой нагрева и временем пребывания частиц в плазменной струе, коэффициентом диффузии кислорода и др. [3].

Напыление покрытий осуществлялось по схеме, представленной на рис. 1.

Установка содержит плазмотрон 1 [4], создающий плазменную струю 2. Плазмотрон имеет патрубки для ввода плазмообразующего газа (PG), порошка и транспортирующего газа (P+CG) и технологического газа (TG). Плазменная струя по всей длине дистанции напыления L охватывается цилиндрическим коаксиальным потоком технологического газа 3.

Исходный порошок транспортирующим газом гелием подается в плазмотрон 1, нагревается в высокотемпературной области плазменной струи до температуры плавления и со скоростью, близкой к скорости плазменной струи, на дистанции L переносится к поверхности подложки 5, при взаимном перемещении подложки 5 и плазмотрона 1 формируется покрытие 4 с пятном напыления 6.

Изучение влияния технологических условий напыления на фазовый состав оксидов было проведено на основе никелевого феррита (табл. 1). В качестве основных варьируемых параметров были выбраны: мощность дугового разряда плазмотрона, дисперсность напыляемого порошка, род плазмообразующих, транспортирующих и технологических газов (нейтральных, окислительных, восстановительных) и уровни их расходов.

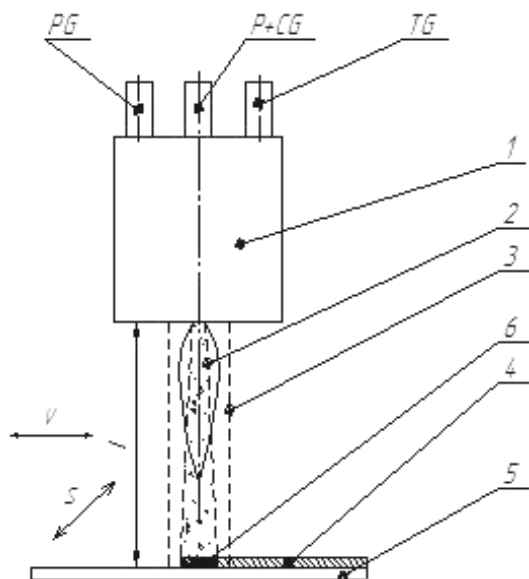


Рис. 1. Схема эксперимента

Цель проводимых экспериментов состояла в исследовании влияния условий напыления на магнит-

ные характеристики (намагниченность насыщения и коэрцитивная сила).

Исходные порошки приготавливались из спеченных ферритовых изделий грубым и тонким помолом с рассевом на фракции.

При больших мощностях напыления независимо от вида технологического газа в ферритах наблюдаются изменения химического состава, связанные с потерей кислорода. Порошки размером 20–50 мкм восстанавливаются в наибольшей степени, за исключением случая, когда в технологическом газе содержится кислород.

При малой мощности (порядка 6 кВт) в присутствии в технологическом газе кислорода химический состав сохраняется.

В порошках дисперсностью 50–80 мкм изменения проявляются в меньшей степени. При использовании в качестве технологических газов Ar или Ar + CO₂ степень восстановления (в зависимости от мощности) составляет 10–30 %.

Незначительные изменения состава, даже при большой мощности напыления, отмечаются только при наличии в технологическом газе O₂ (1–3 %).

Таблица 1

Фазовый состав и свойства никелевого феррита в зависимости от условий напыления

Дисперсность, мкм	Условия напыления					Состав, %			σ , Гс·см ³ /Г	H_c , Э
	Расход газов, м ³ /ч				Мощность, кВт	NiFe ₂ O ₄	FeO	Ni		
	Ar	O ₂	CO ₂	H ₂						
20...50	3,5	—	—	—	5,2	60	39	1	31	130
20...50	3,5	—	—	—	8,4	48	51	1,5	28	180
20...50	3,5	—	—	—	12,2	42	54	2	26	210
20...50	2,0	—	—	—	8,4	69	31	—	35	140
20...50	4,5	—	—	—	8,5	51	47	3	27	150
50...80	3,5	—	—	—	5,4	86	14	—	40	130
50...80	3,5	—	—	—	10,8	73	27	—	36	140
20...50	1,2	—	2,2	—	6,0	53	44	1	32	150
20...50	1,2	—	2,2	—	11,4	49	48	2	28	180
20...50	1,2	—	2,2	—	14,8	45	52	3	25	200
20...50	0,8	—	1,2	—	9,4	59	41	—	35	170
20...50	1,2	—	2,2	—	9,3	57	43	—	32	150
20...50	2,0	—	3,2	—	9,3	50	47	1	26	190
50...80	1,2	—	2,2	—	6,4	87	13	—	41	140
50...80	1,2	—	2,2	—	12,2	68	32	—	34	150
80...120	1,2	—	2,2	—	9,7	100	—	—	45	120
80...120	1,2	—	2,2	—	16,0	93	7	—	45	120
20...50	1,2	2,2	—	—	6,6	100	—	—	46	125
20...50	1,2	2,2	—	—	9,7	92	8	—	41	130
20...50	1,2	2,2	—	—	13,2	78	22	—	38	140
50...80	1,2	2,2	—	—	9,4	100	—	—	46	120
50...80	1,2	2,2	—	—	14,1	94	6	—	44	120
20...50	3,5	—	—	0,8	6,5	14	80	6	19	220
20...50	3,5	—	—	0,8	10,0	13	80	7	17	225
20...50	3,5	—	—	0,8	14,1	11	82	7	16	240

Таблица 2

**Фазовый состав ферритовых покрытий, напыленных
в различных газовых средах**

Феррит	Состав газовой среды	Фазовый состав покрытия	Плотность, г/см ³	Пористость (открытая), %
Fe ₃ O ₄	Ar + H ₂ (5:1)	шпинель + вюстит	5,15	0,33
	Ar	шпинель + вюстит (следы)	4,9	1,1
	Ar + O ₂ (1:3)	шпинель	5,06	0,76
Ni _{0,3} Zn _{0,7} Fe ₂ O ₄	Ar + H ₂ (5:1)	шпинель + вюстит	5,26	0,23
	Ar	шпинель + вюстит (следы)	5,11	0,82
	Ar + O ₂ (1:3)	шпинель	5,21	0,34

Таким образом, увеличение фракционного состава оказывается эффективным с точки зрения сохранения химического состава материала покрытия.

При напылении ферритов других составов характер протекающих процессов при формировании покрытий повторяется. При диссоциации ферритов в первую очередь образуются фазы шпинели и вюстита (табл. 2, 3).

Таблица 3

**Содержание вюститной фазы
в покрытиях из никелевого феррита
при различных условиях напыления**

Условия напыления	Мощность, кВт	Содержание вюстита, %
Ar + CO ₂ (1:3), дистанция 150 мм	6	3
	9	6
	12	13
Ar + CO ₂ (1:3), дистанция 150 мм, технологический газ O ₂	6	—
	9	1
	12	7

С понижением мощности напыления степень фазовых изменений в феррооксидах уменьшается, при этом содержание вюститной фазы в ферритовых покрытиях зависит от состава газовой среды, в которой проводилось напыление (табл. 2, 3). При малых мощностях напыления интенсивности процессов восстановления феррита в плазменной струе и его окисления на стадии охлаждения расплавленных частиц, формирующих покрытие, оказываются по порядку величины сравнимы.

Рентгенографические исследования показали, что с увеличением скорости охлаждения напыляемых порошков наблюдается уменьшение интенсивности и уширение дифракционных линий. Такая картина РФА соответствует уменьшению размеров кристаллитов и появлению в покрытии аморфной фазы (рис. 2).

Особенности формирования (из расплавленных частиц) и морфологическое своеобразие (слоистая структура) напыленных покрытий позволяют предполагать отличную, по отношению к спеченным материалам, кинетику их окисления. Это, в свою очередь, дает новые технологические возможности для управления фазовым составом, структурой и, следовательно, магнитными свойствами ферритовых покрытий.

Исследования магнитных свойств покрытий показывают, что с увеличением мощности напыления намагниченность насыщения падает, что обусловлено появлением вюститной фазы FeO. При напылении покрытий в окислительной среде наблюдается рост намагниченности насыщения (рис. 3). Это связано с тем, что в покрытии сохраняется фаза магнетита до определенной мощности дугового разряда (~ 16 кВт). Таким образом, управление расходом кислорода (технологического газа) при плазменном напылении позволяет регулировать состав покрытия в пределах одной фазы и вести процесс при более высокой мощности и производительности с сохранением химического состава и структуры.

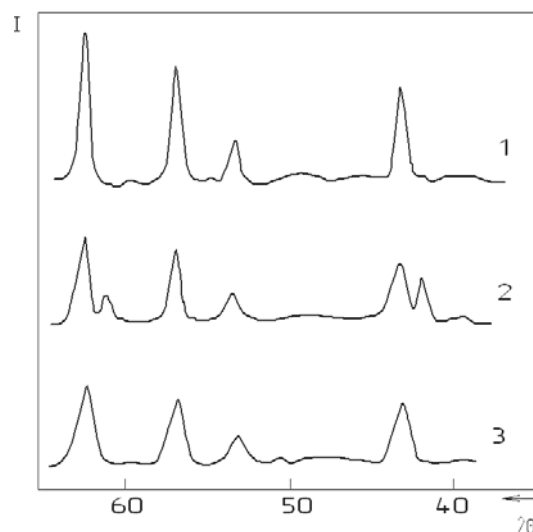


Рис. 2. Рентгенограммы:
1 – исходного порошка; 2 – напыленного покрытия
($P = 25$ кВт); 3 – напыленного покрытия в среде
кислорода ($P = 25$ кВт)

Ферритовые покрытия, в отличие от спеченных ферритов, имеют характерные морфологические особенности, напыленное покрытие имеет более однородную структуру и меньшую, чем у спеченного материала, пористость. Открытая пористость напыленного феррита составляет 1–3 % (табл. 2), тогда как спеченного может достигать 20 % [5; 6].

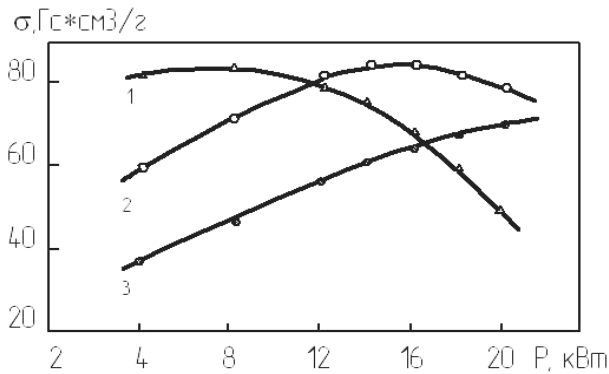


Рис. 3. Зависимость намагниченности Fe_3O_4 от мощности напыления:

1 — исходного материала; 2 — в среде кислорода при температуре в пятне напыления $500\text{ }^\circ\text{C}$; 3 — при температуре $700\text{ }^\circ\text{C}$

Морфологические особенности напыленных ферритов изучались на шлифах, изготовленных из поперечных сечений покрытий. Было установлено, что при стационарных режимах напыления структура покрытия неоднородна по толщине. Нижние слои, непосредственно примыкающие к основанию, имеют пористую мелкокристаллическую структуру. С увеличением толщины покрытия наблюдается уменьшение пористости материала и увеличение размеров зерна.

Образование пористого слоя на начальном этапе формирования покрытия связано с высокой скоростью затвердевания расплавленных частиц, ограничивающей их растекание на поверхности. Ширина переходной пористой области определяется условиями напыления, физико-химическими свойствами материала, тепловым состоянием подложки и другими факторами. Расчеты показывают, что в случае напыления ферритов температура покрытия, начиная уже с первых слоев, резко возрастает и через 5–10 монослоев может достигать значения $\sim 0,8 T_{\text{пл}}$. Именно эти 5–10 монослоев характеризуются высокой скоростью затвердевания и определяют ширину переходной области.

Отметим также, что при определенных условиях, например, при перегреве частиц и высоких скоростях напыления, повышения температуры в зоне формирования покрытия оказывается достаточно и для протекания рекристаллизационных процессов.

Однофазное состояние, реализуемое в напыленных ферритовых покрытиях, не является гарантией сохранения свойств исходных материалов. Способность ферритов образовывать непрерывные ряды твердых растворов с переменным содержанием кислорода приводит к тому, что в пределах однофазной структуры могут существовать значительные градиенты концентраций составляющих ее компонентов. Кроме того, в ферритовых покрытиях, образующихся из закаленных расплавленных частиц, возникают локальные напряжения, дефекты структуры и появление аморфной фазы. Эти явления и приводят к изменению магнитных свойств ферритовых покрытий: увеличению

коэрцитивной силы, уменьшению намагниченности насыщения и др. (табл. 4).

Таблица 4

Свойства ферритов, полученных спеканием и плазменным напылением

Материал		ρ , г/см ³	$4\pi I_s$, Гс	H_c , Э	ΔH , Э
NiFe_2O_4	спекенный	4,3	2850	15,3	375
	напыленный	5,1	3200	62	1100
CoFe_2O_4	спекенный	3,72	3300	375	—
	напыленный	4,98	4390	830	—
Fe_3O_4	спекенный	4,42	4910	45	2870
	напыленный	5,05	5620	84	3340

Термическая обработка напыленных покрытий оказывает существенное влияние на их магнитные и электрические свойства. В зависимости от условий термообработки (температура, состав газовой среды и давление газов) в ферритах происходят различные физико-химические изменения, связанные с формированием микроструктуры, химической гомогенизацией, аннигиляцией дефектов, восстановлением стехиометрии по кислороду и др. и приводящие к улучшению электромагнитных характеристик покрытий.

Операции отжига и нанесения покрытия можно совместить, управляя температурой в пятне напыления и расходом технологического газа кислорода, что позволяет одновременно обеспечить необходимый химический состав и микроструктуру напыляемого массивного ферритового покрытия. Поскольку условия охлаждения напыляемых частиц в монослоях оказываются одинаковыми, то получаемые ферритовые покрытия являются структурно однородными по толщине.

Влияние температуры в пятне напыления на характер формирования магнитных свойств покрытий из никель-цинкового и марганец-цинкового ферритов приведено в табл. 5.

Повышение температуры в пятне напыления приводит к улучшению свойств напыляемых покрытий.

Частотная зависимость действительной μ_1 и мнимой μ_2 частей комплексной магнитной проницаемости покрытия из Ni-Zn-феррита приведена на рис. 4. В начальной части спектра (вблизи $f = 2$ ГГц) наблюдается эффективное поглощение энергии, обусловленное естественным ферромагнитным резонансом (ЕФМР). При этом мнимая часть проницаемости значительно превосходит действительную, а тангенс угла магнитных потерь $\text{tg } \delta = \mu_2 / \mu_1$ принимает значение, равное пяти.

Частотное изменение коэффициента поглощения $K_{\text{по}}$ мощности исследуемых покрытий неравномерно. С повышением частоты коэффициент K увеличивается, достигая наибольшего значения $K = 0,11$ при $f = 7,8$ ГГц, после чего убывает до $K = 0,001$ при $f = 10,4$ ГГц.

Магнитные свойства ферритов, напыленных при различной температуре

T, K	NiFe ₂ O ₄				MnFe ₂ O ₄			
	B _s , Гс	H _c , Э	μ ₀	ρ, Ом·м	B _s , Гс	H _c , Э	μ ₀	ρ, Ом·м
400	1,6·10 ⁻³	70	0,14·10 ⁻³	22	2,9·10 ⁻³	78	0,04·10 ⁻³	
500	1,9·10 ⁻³	48	0,15·10 ⁻³	25	3,2·10 ⁻³	60	0,11·10 ⁻³	3
600	2,1·10 ⁻³	33	0,17·10 ⁻³	31	3,4·10 ⁻³	56	0,15·10 ⁻³	4
700	2,2·10 ⁻³	20	0,2·10 ⁻³	40	3,5·10 ⁻³	33	0,22·10 ⁻³	5
800	2,25·10 ⁻³	14	0,25·10 ⁻³	54	3,6·10 ⁻³	22	0,35·10 ⁻³	7
900	2,4·10 ⁻³	10	0,3·10 ⁻³	79	3,65·10 ⁻³	15	0,51·10 ⁻³	9
1000	2,45·10 ⁻³	6	0,35·10 ⁻³	96	3,67·10 ⁻³	11	0,6·10 ⁻³	11
1100	2,5·10 ⁻³	4	0,4·10 ⁻³	108	3,7·10 ⁻³	6	0,95·10 ⁻³	13
1200	2,51·10 ⁻³	3	0,46·10 ⁻³	113	3,7·10 ⁻³	4	1,3·10 ⁻³	14
1300	2,52·10 ⁻³		0,52·10 ⁻³	118	3,7·10 ⁻³		1,55·10 ⁻³	13
1400	2,53·10 ⁻³		0,56·10 ⁻³	120	3,7·10 ⁻³		1,66·10 ⁻³	13

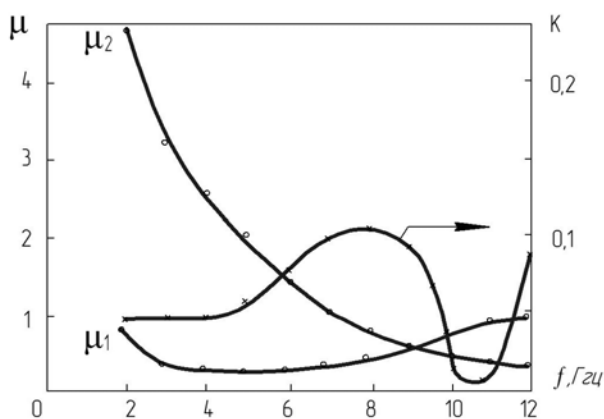


Рис. 4. Спектр поглощения покрытия из Ni-Zn-феррита

При заданном коэффициенте отражения расширить рабочий диапазон частот поглотителя электромагнитного излучения можно за счет напыления многослойных покрытий. Такие покрытия состоят из ферритов различного состава с ЕФМР, перекрывающими необходимый частотный диапазон, или из чередующихся ферритовых и диэлектрических слоев, изменяющих конфигурацию полос допустимых значений магнитной проницаемости.

Такие покрытия поглощают радиолокационный спектр излучения и предназначены для электромагнитной совместимости антенн, фазированных антенных решеток и подавления их боковых лепестков излучения, обеспечения защиты многофункциональных радиотехнических комплексов и компьютерных систем от несанкционированного доступа, уменьшения уровня интенсивности облучения биологических объектов в широком диапазоне сверхвысоких частот.

Технология плазменного напыления позволяет наносить достаточно толстые (1–10 мм) покрытия на устройства сложной геометрической формы, и возникают реальные возможности использовать такие фер-

ритовые покрытия в качестве вентилях, ограничителей, модуляторов и других элементов ВЧ- и СВЧ-техники, формировать высокочастотные и сверхвысокочастотные сердечники с явно выраженными магнитомягкими свойствами.

Библиографические ссылки

- Кулик А. Я., Борисов Ю. С., Мнухин А. С., Никитин М. Д. Газотермическое напыление композиционных порошков. Л.: Машиностроение, 1985. 199 с.
- Кулинов В. В., Кулик А. Я. Плазменное напыление ферроокислов // ФХОМ. 1980. № 1. С. 41–44.
- Лепешев А. А., Нагибин Г. Е., Саунин В. Н. Физико-химические процессы, протекающие в частицах феррита при плазменном напылении // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Дмитров, 1985. Т. 2. С. 177–180.
- Пат. 2276840 Рос. Федерация, МПК⁷ Н 05 Н 1/26, С 23 С 4/00. Электродуговой плазмотрон Саунина / В. Н. Саунин; патентообладатель Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т им. М. Ф. Решетнева. № 2004120804/06; заявл. 07.07.04; опубл. 20.05.06, Бюл. № 14. 8 с.
- Летюк Л. М., Журавлев Г. И. Химия и технология ферритов. Л.: Химия, 1983. 256 с.
- Дефектность структуры и физико-химические свойства феррошпинелей / М. Т. Варшавский [и др.]. М.: Наука, 1988. 242 с.

References

- Kulik A. Ja., Borisov Ju. S., Mnuhin A. S., Nikitin M. D. *Gazotermicheskoe napylenie kompozitsionnykh poroshkov* (Thermal spraying composite powders). Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985. 199 p.
- Kudinov V. V., Kulik A. Ja. [Plasma spraying of ferrumoxides]. *FHOM*, 1980, no. 1, p. 41–44.
- Lepeshev A. A., Nagibin G. E., Saunin V. N. *Teoriya i praktika gazotermicheskogo nanesenija pokrytij*. Dmitrov, 1985, Vol. 2, p. 177–180.

4. Saunin V. N. *Jelektrodugovoj plazmotron Saunina* [Electric arc plasmotron of Saunin]. Patent RF, no. 2276840, 2006.

5. Letjuk L. M., Zhuravlev G. I. *Himija i tehnologija ferritov* (Chemistry and Technology of ferrites). L. Himija, 1983, 256 p.

6. Varshavskij M. T., Pashhenko V. P., Men' A. N. et al. *Defektnost' struktury i fiziko-himicheskie svojstva ferrosipinelej* (Defectiveness of the structure and physicochemical properties of ferrosipineles). Moskva, Nauka Publ., 1988. 242 p.

© Саунин В. Н., Телегин С. В., 2014

УДК 620.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗАЩИТНОГО ОКСИДНОГО СЛОЯ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ*

Н. В. Суходоева¹, Е. Н. Федорова^{1,2}, В. Турк³, Д. Монсо², Д. Окаб²

¹ Политехнический институт Сибирского федерального университета
Российская Федерация, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26

² Университет г. Тулузы, Институт Карно СИРИМАТ,
Национальная высшая школа химии и химической технологии г. Тулузы, BP-44362,
Франция, 31030, Тулуза, аллея Эмиля Монсо, cedex-4

³ Университет г. Тулузы, Институт Карно СИРИМАТ, Университет Поль Сабатье,
Франция, 31062, Тулуза, ул. Рут де Нарбонн, 118, cedex 9

Метод наноиндентирования применен для определения твердости и модуля упругости оксидного слоя, формирующегося на поверхности монокристаллического суперсплава на основе никеля при высокотемпературном (1100 °C) изотермическом окислении. Проведены серии испытаний при различной нагрузке на отполированную поверхность поперечного среза образца после окисления и на поверхности оксидного слоя. Получены экспериментальные значения модуля Юнга при индентировании по первому способу $E_{IT} = 320$ ГПа, при индентировании по второму способу $E_{IT} = 256$ ГПа. Установлено существование зависимости измеряемых значений физико-механических свойств от нагрузки индентирования. Экспериментальные значения модуля Юнга использованы при расчете работы адгезии границы раздела металл/оксид.

Ключевые слова: сплавы на основе никеля, окисление, оксидный слой, наноиндентирование, твердость, модуль Юнга, работа адгезии.

DETERMINATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF THE PROTECTIVE OXIDE SCALE BY NANO-INDENTATION

N. V. Suhodoeva¹, E. N. Fedorova^{1,2}, V. Turq³, D. Monceau², D. Oquab²

¹ Polytechnic Institute of Siberian Federal University
26, Kirensky st., 660074 Krasnoyarsk, Russia

² Université de Toulouse, Institut Carnot CIRIMAT, ENSIACET
BP-44362, allée Emile Monso, 31030 Toulouse cedex-4, France

³ Université de Toulouse, Institut Carnot CIRIMAT, Université Paul Sabatier
118, route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 9, France

Nano-indentation test was used to determine the hardness and the Young's modulus of the thermally grown oxide formed during the high temperature (1100 °C) isothermal oxidation of single crystal Ni-based superalloy. Multiple nano-indentation tests at different loads were performed on the polished cross-section and on the surface of oxide scale. The measured values of Young's modulus were $E_{IT} = 320$ GPa, and $E_{IT} = 256$ GPa using the cross-section indentation and the indentation normal to the surface of oxide scale correspondently. The effect of applied load on the measured values was observed. The measured values of Young's modulus were used to determine the values of the work of adhesion of metal/oxide interface.

Keywords: Ni-based superalloys, oxidation, oxide scale, nano-indentation test, hardness, Young's modulus, work of adhesion.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и CNRS в рамках международного научного проекта № 13-08-91053-НЦНИ_a.

В современном авиастроении для защиты поверхностей узлов и деталей из сложнoleгированных жаропрочных монокристаллических никелевых сплавов, эксплуатируемых в условиях высоких температур и агрессивных сред, применяют системы теплозащитных покрытий (ТЗП). В зарубежной литературе используется термин «системы термобарьерных покрытий» (Thermal barrier coatings – TBCs).

При создании эффективной теплозащитной системы основной проблемой является нарушение прочности адгезии на границе раздела металл/оксид. Сопротивление окислению сплавов на основе никеля, а также долговечность ТЗП во многом определяются свойствами формирующегося при высокотемпературном воздействии защитного оксидного слоя (Thermally Grown Oxide – TGO). Оксидный слой должен иметь достаточную плотность (отсутствие пор, трещин), низкую скорость роста, хорошую прочность адгезии с металлическим подслоем (NiCoCrAlY, NiPtAl, NiCrAlYTa(Pt)), внешним керамическим слоем (ZrO_2 – Y_2O_3), обладать высоким сопротивлением термомеханической усталости. В случае деградации покрытия за счет износа или повреждения необходимо учитывать поведение при высокотемпературном окислении сплава без системы ТЗП.

Для оценки прочности адгезии границы раздела металл/оксид используются различные методы испытаний, однако только немногие из них применимы к рассматриваемой системе. Методы определения прочности адгезии в системе металл/оксид можно разделить на три группы. К первой группе относятся механические испытания и методы механики разрушения: растяжение в камере электронного микроскопа [1; 2]; трех-, и четырехточечный изгиб образцов с надрезами [3; 4]; скретч-тест [5; 6]; специальные методы испытаний [7]. Работу [8] можно отнести к физическому методу, на поверхность подложки воздействуют кратковременным лазерным излучением, под действием которого возникает отслоение покрытия. Существуют работы, направленные на определение работ адгезии комбинированными методами, совмещающими в себе принципы первой и второй группы [9]. Применяются также методы математического и физического моделирования с использованием метода конечных элементов [10] и теории функционала плотности (Density Functional Theory – DFT) [11], которые можно отнести к третьей группе методов.

Сравнивая и анализируя экспериментальные значения энергии адгезии, полученные перечисленными методами для системы металл/оксид, необходимо отметить значительный разброс результатов. В зависимости от условий окисления, особенностей системы, методов испытаний и моды нагружения, значения варьируются от 10 до 120 Дж/м² [1–9]. При этом в большинстве работ не учитывается многослойная структура формирующегося оксидного слоя и изменение физико-механических свойств в тонких пленках по отношению к массивным материалам. Применение теоретических значений физико-механических свойств существенно влияет на значения работ адгезии. Так, в работе [12] было показано, что даже использование теоретического модуля Юнга из различных источников ($E = 350$ – 400 ГПа) для оксид-

ного слоя, представленного преимущественно оксидом алюминия, при расчете работы адгезии после скретч-испытаний приводит к ошибке 8–10 %.

Для получения экспериментальных значений физико-механических свойств наноструктурных материалов и тонких пленок в настоящее время широко используется метод наноиндентирования [13–16]. В работе приведены результаты наноиндентирования оксидного слоя α - Al_2O_3 сплава системы FeCrAl после изотермического окисления при температурах 1150–1250 °С. В зависимости от толщины оксидного слоя (2–4 мкм), средние значения твердости при индентировании составляли 11,2–11,7 ГПа, средние значения модуля Юнга – 260–370 ГПа.

В представляемой работе метод наноиндентирования применяется для определения физико-механических свойств оксидного слоя после высокотемпературного изотермического окисления монокристаллического сплава на основе никеля. Основной целью данного исследования является использование полученных экспериментальных значений модуля Юнга для оксидного слоя при расчете прочности адгезии границы раздела металл/оксид, определенной методом скретч-испытаний.

Материалы и методы. Эксперименты по изотермическому окислению промышленного монокристаллического сплава на основе никеля AM1 (7,5Cr–6,5Co–2,0Mo–5,5W–5,3Al–1,2Ti–8,0Ta) [17] проводились на отполированных образцах (до 1 мкм) на установке SETARAMTM TAG 24S, при температуре 1100 °С, скорость нагрева и охлаждения 60 °С/мин, время выдержки варьировалось в зависимости от цели эксперимента. Окисление осуществлялось в атмосфере очищенного воздуха, скорость потока – 0,4 л/ч. Подробно кинетика изотермического окисления сплава AM1, микроструктура и фазовый состав формирующегося оксидного слоя исследованы в работах [12].

Испытания по наноиндентированию проводились на приборе Ultra Nano-indentation Tester фирмы CSM Instrument. В качестве индентора применялась трехгранная алмазная пирамида (индентор Берковича). Проводились серии испытаний при различных значениях максимальной нагрузки $F_{max} = 10, 30, 50$ и 70 мН. Скорость нагружения и разгрузки составила 60 мН/мин, время выдержки при максимальной нагрузке – 30 с. Для каждого значения нагрузки проводилась серия испытаний по 5 отпечатков в каждой серии. Коэффициент Пуассона для оксидного слоя, который преимущественно представлен оксидом алюминия, принимался равным 0,24 [18].

Исследования физико-механических свойств сплава и оксидного слоя проводились на подготовленных поперечных срезах (первый способ) и перпендикулярно поверхности оксидного слоя (второй способ). Поперечные срезы образцов после окисления были приготовлены по стандартной методике. На поверхность оксидного слоя электрохимическим осаждением наносился защитный слой никеля, далее образец разрезался и запрессовывался в эпоксидную смолу. Поверхности образцов шлифовались при использовании щадящего режима на бумаге из карбида кремния,

затем полировались на алмазной пасте до 1 мкм, очищались в ультразвуковой ванне в ацетоне и спирте высокой чистоты, высушивались.

Результаты исследований. Исследования микроструктуры, химического и фазового состава показали [12], что оксидная пленка, формирующаяся после изотермического окисления в течение 100 ч при 1100 °С, состоит из двух слоев: внутреннего, со стороны металлической подложки – ориентированные зерна α - Al_2O_3 и наружного – ориентированные зерна шпинели NiAl_2O_4 . Слои разделены между собой дискретными включениями оксидов тантала и титана. По данным термогравиметрического анализа и электронно-микроскопических исследований, средняя толщина оксидного слоя составила 2,4 мкм, толщина слоя оксида алюминия 1,4 мкм. Поперечный срез данного образца представлен на рис. 1, а.

Изображение отпечатков индентора при нагрузке 30 мН приведены на рис. 1, б, кривые нагружения для подложки и оксидного слоя при индентировании данного образца представлены на рис. 2. Из рис. 1, б видно, что при использовании данной нагрузки наблюдается влияние подложки на значения измеряемых характеристик. Было показано, что применение нагрузки 10 мН позволяет существенно уменьшить разброс

экспериментальных данных, в том числе в связи с более точным позиционированием индентора во время эксперимента.

Анализ кривых индентирования (рис. 2) проводился с использованием метода Оливера и Фарра [19]. При увеличении нагрузки установлен эффект уменьшения значений физико-механических свойств для сплава и оксидного слоя. Объяснить данное явление можно, во-первых, влиянием свойств подложки на измеряемые значения при увеличении размера отпечатка, во-вторых, существованием так называемого размерного эффекта, который обусловлен увеличением доли пластической деформации при увеличении нагрузки [15; 20–21]. Экспериментальные значения твердости и модуля упругости приведены в таблице.

При нагрузке 10 мН среднее значение твердости оксидного слоя составляет $15,6 \pm 0,4$ ГПа, среднее значение модуля Юнга $E_{IT} = 320 \pm 15$ ГПа.

Для индентирования поверхности оксидного слоя (2-й способ) использовался образец сплава AM1 после окисления 9 ч при 1100 °С, микроструктура формирующейся оксидной пленки отличается от представленной на рис. 1 только толщинами слоев. Средняя толщина оксидного слоя составила 1,3 мкм, толщина слоя оксида алюминия – 0,7 мкм.

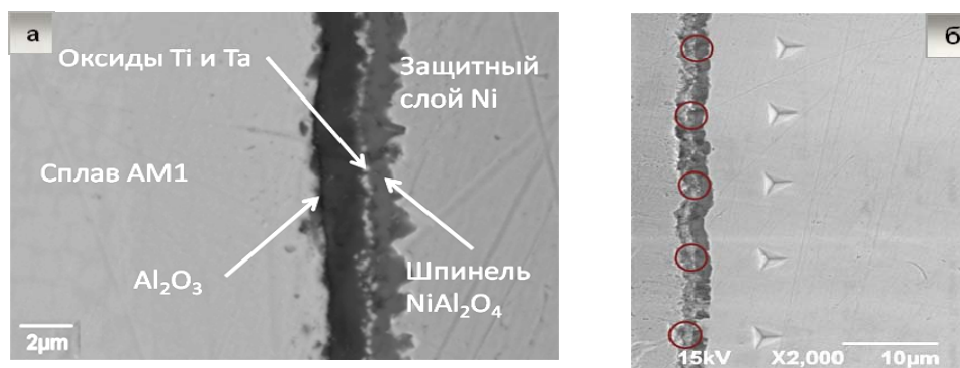


Рис. 1. СЭМ-фотографии: а – поперечного среза образца сплава AM1 после изотермического окисления (100 ч при 1100 °С); б – поперечного среза после индентирования сплава и оксидного слоя при нагрузке 30 мН

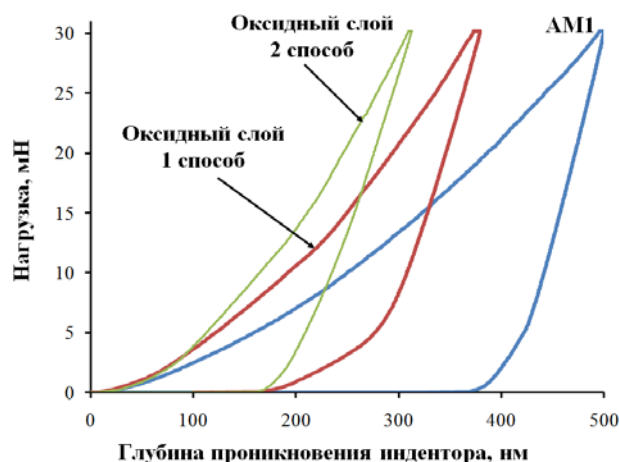


Рис. 2. Кривые нагружения для подложки и оксидного слоя при нагрузке 30 мН, полученные при индентировании поперечного среза и поверхности оксидного слоя

Экспериментальные значения твердости и модуля упругости

Максимальная нагрузка $F_{\max}$, мН	Глубина проникновения индентора h_c , нм	Твердость H_{IT} , ГПа	Модуль Юнга E_{IT} , ГПа
Сплав АМ1			
10	227	$8,6 \pm 0,1$	245 ± 9
30	447	$6,9 \pm 0,1$	188 ± 5
70	749	$5,8 \pm 0,1$	188 ± 11
Оксидный слой (1-й способ)			
10	166	$15,6 \pm 0,4$	320 ± 15
30	317	$13,5 \pm 0,5$	239 ± 13
Оксидный слой (2-й способ)			
10	214	$10,1 \pm 0,9$	208 ± 17
30	265	$20,2 \pm 3,4$	256 ± 21
50	445	$12,7 \pm 2,2$	183 ± 28
70	540	$11,6 \pm 1,2$	157 ± 8

Анализируя результаты индентирования по второму способу, необходимо учитывать многослойную структуру оксидной пленки. При малых нагрузках (10 мН) индентор проникает в верхний слой шпинели $NiAl_2O_4$, которая имеет меньшие значения физико-механических свойств по сравнению с оксидом алюминия. Зная толщину оксидного слоя и глубину проникновения индентора, можно предположить, что при использовании нагрузок 50 и 70 мН существует большая вероятность влияния свойств сплава на результаты измерений, что подтверждается более низкими значениями H_{IT} и E_{IT} . В связи с перечисленным выше, для второго способа испытаний наиболее оптимально использовать нагрузку 30 мН, при которой средние значения модуля Юнга составили $E_{IT} = 256 \pm 21$ ГПа и твердости $H_{IT} = 20,2 \pm 3,4$ ГПа (см. таблицу).

Далее экспериментальные значения модуля Юнга были использованы в расчетах работы адгезии по модели Аттара и Джоханнсана [6] при скретч-испытаниях, подробное описание условий экспериментов и особенностей модели приведено в работе [12].

Значения работы адгезии с учетом данных, полученных методом наноиндентирования поперечного среза (1-й способ), увеличиваются на 19 % по сравнению со значениями, вычисленными с учетом теоретического модуля Юнга ($E = 380$ ГПа). При использовании экспериментальных значений модуля Юнга для индентирования поверхности оксидного слоя (2-й способ), работа адгезии увеличивается на 47 %.

Библиографические ссылки

1. Bernard O. [et al.]. Mechanical and microstructural characterisation of oxide films damage // Materials Science and Engineering A. 2002. Vol. 335, № 1, 2. P. 32–42.

2. Bamba G. [et al.]. Thermal oxidation kinetics and oxide scale adhesion of Fe–15Cr alloys as a function of their silicon content // Acta Materialia. 2006. Vol. 54, № 15. P. 3917–3922.

3. Huang Z. [et al.]. Initiation and arrest of an interfacial crack in a four-point bend test // Engineering Fracture Mechanics. 2005. Vol. 72, № 17. P. 2584–2601.

4. Théry P.-Y., Poulain M., Dupeux M., Braccini M. Adhesion energy of a YPSZ EB-PVD layer in two thermal barrier coating systems // Surface & Coatings Technology. 2007. Vol. 202, № 4–7. P. 648–652.

5. Bull S. J., Berasetegui E. G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing // Tribology International. 2006. Vol. 39, № 2. P. 99–114.

6. Attar F., Johannesson T. Adhesion evaluation of thin ceramic coatings on tool steel using the scratch testing technique // Surface and Coatings Technology. 1996. Vol. 78, № 1–3. P. 87–102.

7. Guo S. Q., Mumm D. R., Karlsson A. M., Kagawa Y. Measurement of interfacial shear mechanical properties in thermal barrier coating systems by a barb pullout method. Scripta Materialia. 2005. Vol. 53, № 9. P. 1043–1048.

8. Ichikawa Y. [et al.]. Evaluation of adhesive strength of thermal-sprayed hydroxyapatite coatings using the laser shock adhesion test (LASAT) // Materials Transactions. 2007. Vol. 48, № 4. P. 793–798.

9. Mao W. G. [et al.]. An experimental investigation on thermo-mechanical buckling delamination failure characteristic of air plasma sprayed thermal barrier coatings // Surface & Coatings Technology. 2007. Vol. 201, № 14. P. 6217–6227.

10. Begley M. R., Mumm D. R., Evans A. G., Hutchinson J. W. Analysis of a wedge impression test for measuring the interface toughness between films/coatings

and ductile substrates // *Acta Materialia*. 2000. Vol. 48, № 12. P. 3211–3220.

11. Carling K. M., Carter E. A. Effects of segregating elements on the adhesive strength and structure of the a-Al₂O₃/b-NiAl interface // *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55, № 8. P. 2791–2803.

12. Fedorova E., Monceau D., Oquab D., Popov A. Characterisation of oxide scale adherence after the high temperature oxidation of nickel-based superalloys // *Materials at high temperatures*. 2012. Vol. 29, № 3. P. 243–248.

13. Головин Ю. А. Наноиндентирование и его возможности. М. : Машиностроение, 2009. 312 с.

14. Кавалейро А. Наноструктурные покрытия. М. : Техносфера, 2011. 752 с.

15. Zhao X., Xiao P. Determination of mechanical properties of thermally grown oxide on FeCrAlloy by nano-indentation // *Thin Solid Films*. 2007. Vol. 515, № 23. P. 8393–8401.

16. Rico A. [et al.]. Mechanical properties of thermal barrier coatings after isothermal oxidation. Depth sensing indentation analysis // *Surface & Coatings Technology*. 2009. Vol. 203, № 16. P. 2307–2314.

17. Caron P., Khan T. Evolution of Ni-based superalloys for single crystal gas turbine blade applications // *Aerospace Science and Technology*. 1999. Vol. 3, № 8. P. 513–523.

18. Schutze M. Protective Oxide Scales and Their Breakdown. The Institute of Corrosion and Wiley Series on Corrosion and Protection, 2006. 165 p.

19. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *Mat. Res.* 1992. Vol. 7, № 6. P. 1564–1583.

20. Nix W. D., Gao H., Mech J. Indentation size effects in crystalline materials: a law for strain gradient plasticity // *Mechanics and Physics of Solids*. 1998. Vol. 46, № 3. P. 411–425.

21. Golovin Y. I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in the submicron scale, near-surface layers and thin films // *Physics of the Solid State*. 2008. Vol. 50, № 12. P. 2113–2142.

References

1. Bernard O., Amiri G., Haut C., Feltz B., Huntz A. M., Andrieux M. Mechanical and microstructural characterisation of oxide films damage. *Materials Science and Engineering A*. 2002. Vol. 335, № 1, 2. P. 32–42.

2. Bamba G., Wouters Y., Galerie A., Charlot F., Dellali A. Thermal oxidation kinetics and oxide scale adhesion of Fe–15Cr alloys as a function of their silicon content. *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54, № 15. P. 3917–3922.

3. Huang Z., Suo Z., Xu G., He J., Prevost J.H., Sukumar N. Initiation and arrest of an interfacial crack in a four-point bend test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005. Vol. 72, № 17. P. 2584–2601.

4. Théry P.-Y., Poulain M., Dupeux M., Braccini M., Adhesion energy of a YPSZ EB-PVD layer in two thermal barrier coating systems. *Surface & Coatings Technology*. 2007. Vol. 202, № 4–7. P. 648–652.

5. Bull S. J., Berasetegui E. G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing. *Tribology International*. 2006. Vol. 39, № 2. P. 99–114.

6. Attar F., Johannesson T., Adhesion evaluation of thin ceramic coatings on tool steel using the scratch testing technique. *Surface and Coatings Technology*. 1996. Vol. 78, № 1–3. P. 87–102.

7. Guo S. Q., Mumm D. R., Karlsson A. M., Kagawa Y. Measurement of interfacial shear mechanical properties in thermal barrier coating systems by a barb pullout method. *Scripta Materialia*. 2005. Vol. 53, № 9. P. 1043–1048.

8. Ichikawa Y., Barradas S., Borit F., Guipont V., Jeandin M., Nivard M., Berthe L., Ogawa K., Shoji T. Evaluation of adhesive strength of thermal-sprayed hydroxyapatite coatings using the laser shock adhesion test (LASAT). *Materials Transactions*. 2007. Vol. 48, № 4. P. 793–798.

9. Mao W. G., Dai C. Y., Zhou Y. C., Liu Q. X. An experimental investigation on thermo-mechanical buckling delamination failure characteristic of air plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surface & Coatings Technology*. 2007. Vol. 201, № 14. P. 6217–6227.

10. Begley M. R., Mumm D. R., Evans A. G., Hutchinson J. W. Analysis of a wedge impression test for measuring the interface toughness between films/coatings and ductile substrates. *Acta Materialia*. 2000. Vol. 48, № 12. P. 3211–3220.

11. Carling K. M., Carter E. A. Effects of segregating elements on the adhesive strength and structure of the a-Al₂O₃/b-NiAl interface. *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55, № 8. P. 2791–2803.

12. Fedorova E., Monceau D., Oquab D., Popov A. Characterisation of oxide scale adherence after the high temperature oxidation of nickel-based superalloys. *Materials at high temperatures*. 2012. Vol. 29, № 3. P. 243–248.

13. Golovin Yu. A. *Nanoindentirovaniye i yego vozmozhnosti* (Nanoindentation and its capabilities). Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2009, 312 p.

14. Kavaleyro A. *Nanostrukturnyye pokrytiya* (Nanostructured coatings). Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011. 752 p.

15. Zhao X., Xiao P. Determination of mechanical properties of thermally grown oxide on FeCrAlloy by nano-indentation. *Thin Solid Films*. 2007. Vol. 515, № 23. P. 8393–8401.

16. Rico A., Gómez-García J., Múnez C.J., Poza P., Utrilla V. Mechanical properties of thermal barrier coatings after isothermal oxidation. Depth sensing indentation analysis. *Surface & Coatings Technology*. 2009. Vol. 203, № 16. P. 2307–2314.

17. Caron P., Khan T. Evolution of Ni-based superalloys for single crystal gas turbine blade applications. *Aerospace Science and Technology*. 1999. Vol. 3, № 8. P. 513–523.

18. Schutze M. Protective Oxide Scales and Their Breakdown. The Institute of Corrosion and Wiley Series on Corrosion and Protection, 2006. 165 p.

19. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load

and displacement sensing indentation experiments. *Mat. Res.* 1992. Vol. 7, № 6. P. 1564–1583.

20. Nix W. D., Gao H., Mech J. Indentation size effects in crystalline materials: a law for strain gradient plasticity. *Mechanics and Physics of Solids.* 1998. Vol. 46, № 3. P. 411–425.

21. Golovin Y. I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in the submicron scale, near-surface layers and thin films. *Physics of the Solid State.* 2008. Vol. 50, № 12. P. 2113–2142.

© Суходоева Н. В., Федорова Е. Н.,
Турк В., Монсо Д., Окаб Д., 2014

УДК 620.197

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МДО-ПОКРЫТИЙ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ*

Т. В. Трушкина, А. Е. Михеев, А. В. Гирн

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

Рассмотрены химические процессы, протекающие при формировании покрытий методом микродуговой обработки в силикатно-щелочном электролите. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению химического состава и коррозионной стойкости оксидных покрытий на алюминиевых сплавах. В результате проведенных исследований установлены технологические режимы обработки, при которых образуется покрытие с высоким содержанием оксида алюминия, обладающие более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с покрытиями, полученным гальваническим методом.

Ключевые слова: МДО-покрытие, коррозионная стойкость, химический состав.

CORROSION COATINGS MDO COMPOSITION IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

T. V. Trushkina, A. E. Miheev, A. V. Girne

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: michla@mail.ru

Investigations of chemical processes in the formation of coatings by microarc processing silicate alkaline electrolyte are considered. The results of experimental studies to determine the composition and corrosion resistance of oxide coatings on aluminum alloys are shown. Technological processing modes in which to form a coating with high alumina content are defined. It has been established that the coatings exhibit a high corrosion resistance in aggressive environments compared with coatings obtained by electroplating. The dependence of the corrosion resistance in aggressive environments on the chemical composition is shown.

Keywords: MAO coating, corrosion resistance, chemical composition.

Для защиты алюминиевых сплавов от воздействия агрессивных сред на поверхности деталей гальваническим методом формируют покрытия в виде оксидных пленок, которые не в полной мере обеспечивают коррозионную защиту изделия в агрессивных средах. Поэтому возникает необходимость применения новых методов нанесения защитных покрытий, таких как

микродуговое оксидирование (МДО). МДО является весьма сложным и многофакторным процессом. Влияние отдельных факторов на свойства и качество покрытий исследуется достаточно широко [1; 2], но в настоящее время отсутствуют исследования, устанавливающие зависимость химического и фазового состава МДО-покрытий на коррозионную стойкость.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации; государственный контракт № 02.G2531.0043.

В процессе формирования МДО-покрытия большую роль играют плазмохимические и термические процессы. На поверхности металла формируется покрытие, включающее оксид алюминия и поверхностные комплексы, образующиеся в результате взаимодействия с силанольными группами. Основу наружного рыхлого (технологического) слоя МДО-покрытия составляет муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), который представлен в виде игольчатых кристаллов-двойников, встречаются также отдельные глобулы из α - и γ - Al_2O_3 [3]. Такие кристаллы муллита присущи только приповерхностной зоне, в основном и переходном слоях МДО-покрытия муллит находится в мелкокристаллическом состоянии. Наружный слой характеризуется высокой шероховатостью, невысокой износостойкостью и используется для нанесения различных органических и лакокрасочных покрытий.

Основной (рабочий) слой в основном состоит из фаз γ - Al_2O_3 и α - Al_2O_3 . Внутренний слой состоит в основном из фазы α - Al_2O_3 , которая образуется в результате невысокой скорости охлаждения и должна обуславливать высокую микротвердость, износ- и коррозионную стойкость покрытия.

Экспериментальные исследования были проведены на алюминиевом сплаве АМг-6, который широко применяется в машиностроении при производстве летательных и космических аппаратов. Для изготовления образцов был использован листовой прокат толщиной 1 мм, из которого были изготовлены образцы размером 100x100 мм. Формирование покрытий производилось на установке ИАТ-Т в силикатно-щелочном электролите, содержащем КОН (4 г/л) и Na_2SiO_3 (10 г/л). В процессе обработки менялись следующие технологические параметры:

- плотность тока в диапазоне от 10 до 30 А/дм²;
- соотношение катодной и анодной токовых составляющих (0,6–1,2).

На полученных образцах были проведены исследования морфологии, фазового и химического состава покрытия. Анализ состава МДО-покрытий проводили с использованием рентгеновского энергодисперсионного спектрометра ARL QUANT'X Thermo Fisher Scientific.

На рис. 1–8 представлены результаты стехиометрического анализа покрытий.

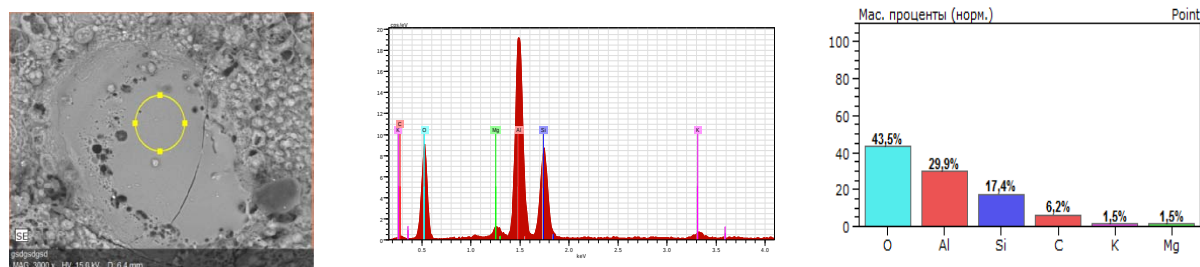


Рис. 1. Результаты химического состава МДО-покрытия при $I_k/I_a = 0,6$

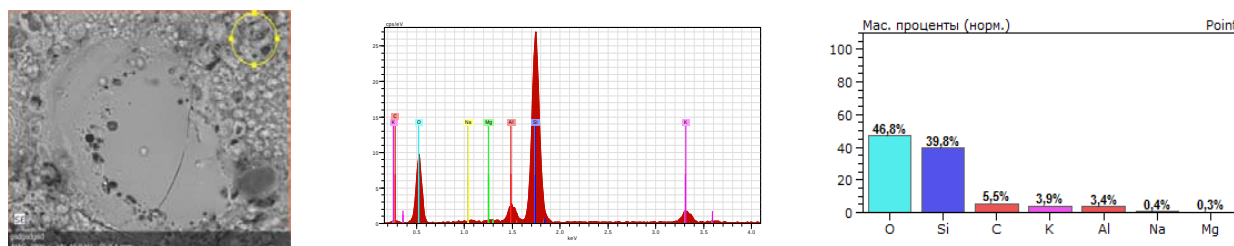


Рис. 2. Результаты химического состава МДО-покрытия при $I_k/I_a = 0,6$

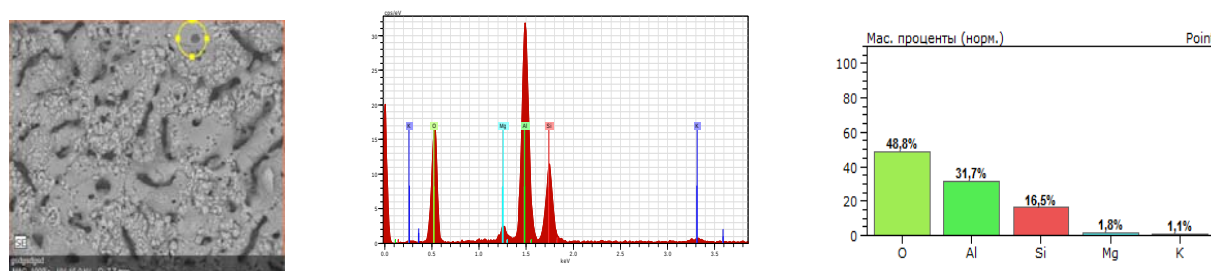


Рис. 3. Результаты химического состава МДО-покрытия при $I_k/I_a = 0,8$

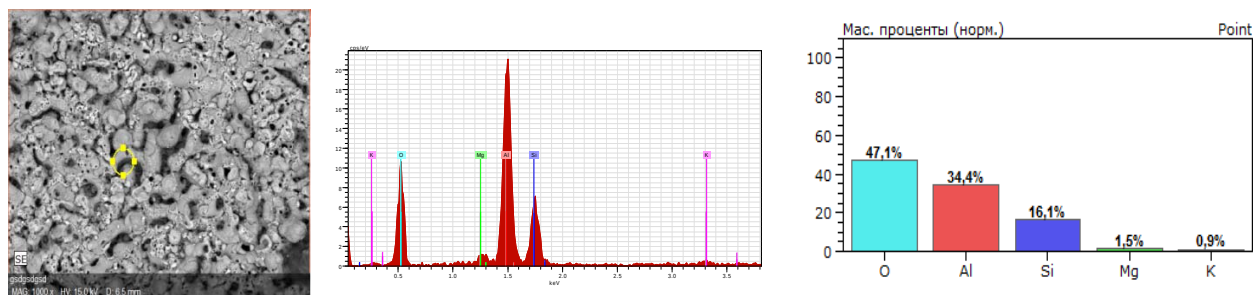


Рис. 4. Результаты химического состава МДО-покрытия при $I_K/I_a = 0,8$

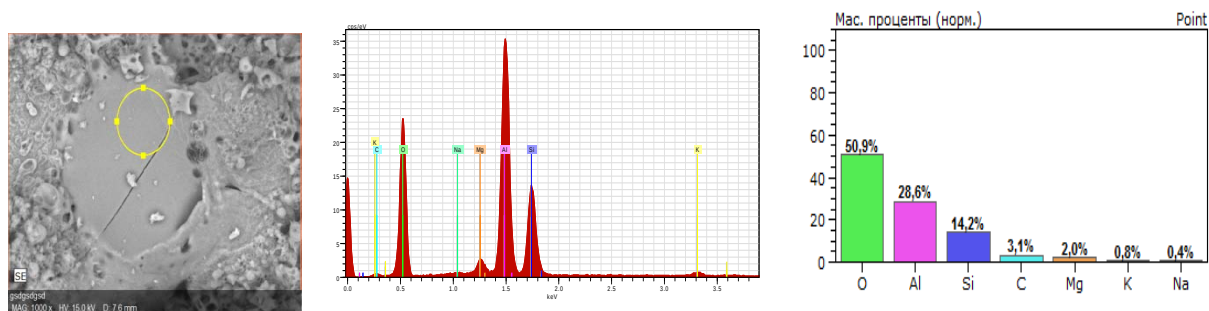


Рис. 5. Результаты химического состава МДО-покрытия при $I_K/I_a = 1$

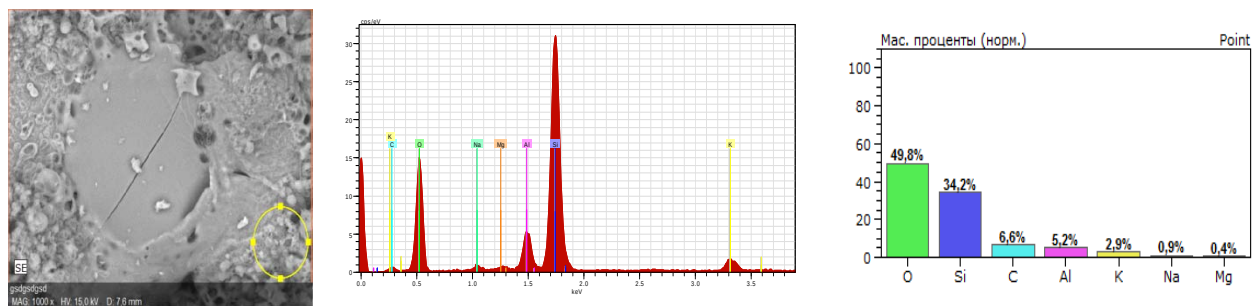


Рис. 6. Результаты химического состава МДО-покрытия при $I_K/I_a = 1$

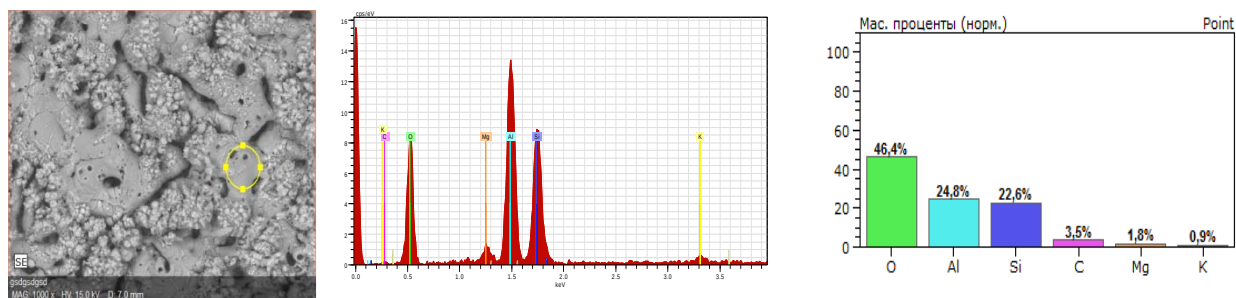


Рис. 7. Результаты химического состава МДО-покрытия при $I_K/I_a = 1,2$

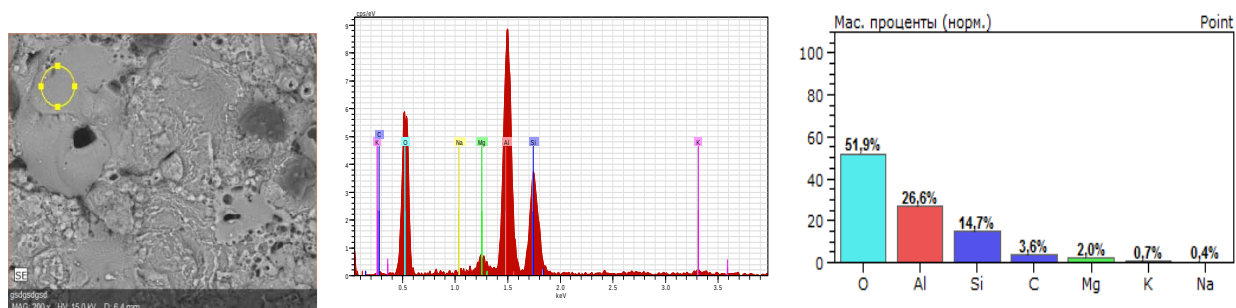


Рис. 8. Результаты химического состава МДО-покрытия при $I_K/I_a = 1,2$

По результатам стехиометрического анализа следует, что в покрытии преимущественно образуется оксид алюминия в двух модификациях (α -, γ - Al_2O_3) и муллит ($2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$). На рис. 9 представлена зависимость содержания оксида алюминия и оксида кремния от токовых составляющих.

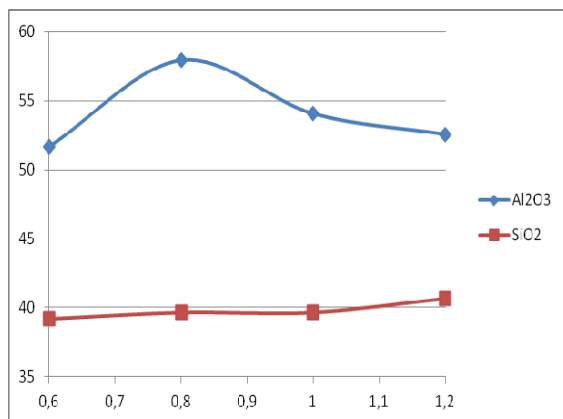


Рис. 9. Зависимость содержания оксидных форм от соотношения катодной и анодной составляющих по току

Результаты исследования показывают, что максимальное количество оксида алюминия содержится в образцах, обработанных при соотношении катодной и анодной составляющих по току $I_{\text{к}}/I_{\text{а}} = 0,8$.

Также были проведены коррозионные испытания образцов с МДО-покрытием и образцов с анодно-окисным покрытием. Коррозионную стойкость оценивали в процессе ускоренных испытаний, которые проводились в условиях, вызывающих увеличение агрессивности среды. В табл. 1 приведены составы растворов и время выдержки образцов при проведении испытаний. Оценку коррозионной стойкости проводили визуально, для количественного определения скорости химической коррозии проводили расчет глубинного показателя.

На рис. 10–12 приведены фотографии образцов после коррозионных испытаний.

На образцах, выдержанных в составе № 1, наблюдается:

- с МДО-покрытием – незначительные коррозионные разрушения;
- с анодным покрытием – полное разрушение.

Таблица 1

Составы растворов и время выдержки

№	Состав	Время выдержки
1	3 % NaCl с добавлением NaOH pH 12,6	14 суток
2	NaCl – 27 г/л, MgCl – 6 г/л, CaCl – 1 г/л KCl – 1 г/л	14 суток
3	Na ₂ SO ₄ – 1 моль/л, подкисленный H ₂ SO ₄ до pH 2,5	14 суток



Рис. 10. Образцы после коррозионных испытаний в составе № 1:
а – образцы с МДО-покрытием; б – образцы с анодированием

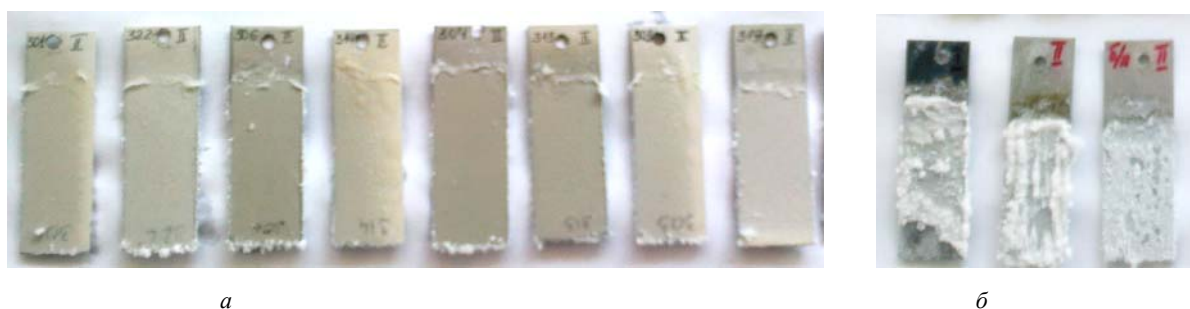


Рис. 11. Образцы после коррозионных испытаний в составе № 2:
а – образцы с МДО-покрытием; б – образцы с анодированием



Рис. 12. Образцы после коррозионных испытаний в составе № 3:
а – образцы с МДО-покрытием; б – образцы с анодированием

После выдержки в растворе № 2 на образцах:

- с МДО-покрытием разрушений не обнаружено;
- с анодированием наблюдается частичный сход покрытия.

В растворе № 3 на образцах:

- с МДО-покрытием разрушений не обнаружено;
- на образцах с анодированием имеются небольшие участки утонения.

Для количественного выражения скорости коррозии для образцов, выдержанных в растворах № 1 и № 3, производили расчет весового показателя в соответствии с методикой, представленной в [4], согласно которой изменение веса образца определяется как разность между весом образца до испытания и его весом после испытания со снятием продуктов коррозии (убыль веса):

$$K_{\text{вес}}^{-} = \frac{g_0 - g_1}{S_0 \tau} \quad (\text{г/м}^2 \text{ ч}). \quad (1)$$

При увеличении веса образца показатель коррозии определяется как разность между весом образца с продуктами коррозии после испытаний и весом образца до испытаний (привес):

$$K_{\text{вес}}^{+} = \frac{g_2 - g_0}{S_0 \tau} \quad (\text{г/м}^2 \text{ ч}), \quad (2)$$

где $K_{\text{вес}}^{-}$ – отрицательный весовой показатель коррозии, г/м² ч; $K_{\text{вес}}^{+}$ – положительный весовой показатель коррозии, г/м² ч; g_0 – начальный вес образца, г;

g_1 – вес образца после коррозии по удалении продуктов коррозии, г; g_2 – вес образца с продуктами коррозии, г; S_0 – поверхность образца, м²; τ – время коррозии в ч.

Глубинный показатель коррозии (проницаемость) определяется по формуле

$$П = \frac{K_{\text{вес}}^{-}}{d_{\text{ме}}} \cdot 8,76 \quad (\text{мм/год}), \quad (3)$$

где $П$ – глубинный показатель коррозии, мм/год; $K_{\text{вес}}^{-}$ – отрицательный весовой показатель коррозии, г/м² ч; $d_{\text{ме}}$ – плотность металла (покрытия), г/м³.

Оценка покрытий по отношению к группам коррозионной стойкости осуществлялась по результатам расчета глубинного показателя коррозии согласно ГОСТ 5275–68 [5]. Результаты расчетов скорости коррозии представлены в табл. 2.

На рис. 13 представлено соотношение коррозионной стойкости покрытий, полученных микродуговым оксидированием и анодированием.

По результатам расчетов коррозионной стойкости следует, что покрытия, полученные микродуговым оксидированием, в соответствии с десятибалльной шкалой коррозионной стойкости по ГОСТ 5275–68 относятся к группам стойких и весьма стойких, а анодированные покрытия – к группам пониженно-стойких и малостойких [5].

Таблица 2

Результаты расчетов

Покрытие	Раствор № 1			Раствор № 3		
	Скорость коррозии, мм/год	Баллы	Группа стойкости	Скорость коррозии, мм/год	Баллы	Группа стойкости
МДО	0,08883	5	Стойкие	0,0029	2	Весьма стойкие
Анодирование	0,4175	6	Понижено-стойкие	1,1342	8	Малостойкие

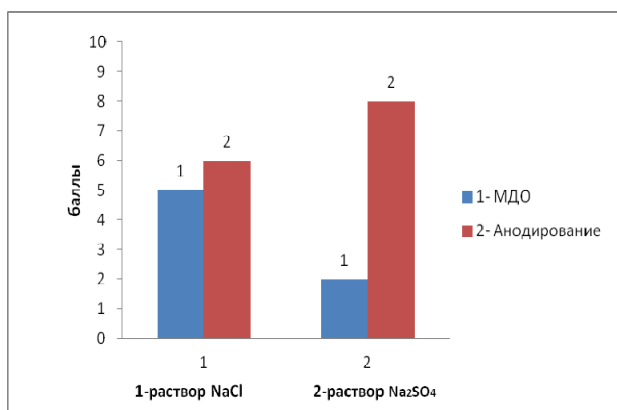


Рис. 13. Соотношение коррозионной стойкости оксидных покрытий

В ходе проведенных исследований выявлены химические процессы, протекающие при формировании покрытий методом микродуговой обработки в силикатно-щелочном электролите, в результате которых образуется оксид алюминия (α -, γ - Al_2O_3) и муллит ($2\text{SiO}_2 \cdot 3 \text{Al}_2\text{O}_3$).

Установлено, что на защитные свойства покрытий оказывают влияние технологические режимы обработки. Наиболее устойчивым к коррозии является покрытие с максимальным содержанием оксида алюминия, которое образуется при соотношении катодной и анодной составляющих по току $I_k/I_a = 0,8$.

Библиографические ссылки

1. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И. В. Суминов [и др.]. М. : Экомет, 2005. 368 с.

2. Тихонов В. Н. Аналитическая химия алюминия. М. : Наука, 1971. 266 с.

3. Михеев А. Е. [и др.] Химические процессы при микродуговом оксидировании // Вестник СибГАУ. 2013. Вып. 2 (48). С. 212–216.

4. Жук Н. П. Коррозия и защита металлов: расчеты. М. : МАШГИЗ, 1957. 330 с.

5. ГОСТ 5272–68. Коррозия металлов: термины // Защита от коррозии. Ч. 4. Общие требования и методы натурных испытаний : сб. ГОСТов. М. : Изд-во стандартов, 1993.

References

1. Suminov I. V. et al. *Mikrodugovoe oksidirovanie: teoriya, tekhnologiya, oborudovanie* (Microarc oxidation theory, technology, equipment). Moscow, Ekomet Publ., 2005, 368 p.

2. Tihonov V. N. *Analiticheskaya himiya aluminiuma* (Analytical chemistry of aluminum). Moscow, Nauka Publ., 1971, 266 p.

3. Miheev A. E., Trushkina T. V., Girn A. V., Iva-sev S. S. *Vestnik SibGAY*. 2013, no. 2 (48), p. 212–216.

4. Gyk N. P. *Korroziya i zashita metallov: rascheti* (Corrosion and Protection of Metals: calculations). Moscow, MASHGIS Publ., 1957, 330 p.

5. *GOST 5272-68. Korroziya i zashita metallov: termini. Zashita ot korrozii. Ch. 4. Obshchiye trebovaniya i metody naturnykh ispytaniy* [GOST 5272-68. Corrosion of metals: terms. Corrosion protection. Ch 4. General requirements and methods of field tests: Sat Guest]. Moscow, Isdatelstvo standartov Publ., 1993.

© Трушкина Т. В., Михеев А. Е., Гирн А. В., 2014

РАЗДЕЛ
4



ЭКОНОМИКА



УДК: 332.146.2

ИНСТРУМЕНТЫ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ РЕСУРСНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО РЕГИОНА

Н. Т. Аврамчикова, М. Н. Чувашова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: avr-777@yandex.ru

Рассматриваются проблемы, связанные с недостаточной разработанностью методических и теоретических основ оценки технологического состояния экономики ресурсно-ориентированного региона. Отмечается высокая практическая значимость повышения удельного веса отраслей высокого технологического уклада в экономике ресурсно-ориентированного региона, способствующих увеличению конкурентоспособности и инновационной восприимчивости в соответствии с вызовами экономической глобализации. Уточнена система показателей, позволяющая осуществить оценку структуры экономики в соответствии с этапами трансформации, и определены возможные источники финансирования инновационных разработок.

Ключевые слова: ресурсно-ориентированный регион, технологический уклад, структура экономики, система показателей.

ESTIMATING TOOLS OF THE TECHNOLOGICAL STATE OF THE ECONOMIC BRANCHES IN THE REGION WHICH FOCUSES ON RESOURCES

N. T. Avramchikova, M. N. Chuvashova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: avr-777@yandex.ru

In this paper some economic problems connected with insufficiency of studying methodological and theoretical bases for the estimation of the technological mode of the branches in the region focused on resources are considered. Much attention is paid to the necessity of increasing the specific weight of manufacture in the regional economics. It lets to increase competitiveness and innovation in the region in the process of globalization. The authors concentrate on a wide range of things which raise special problems of the industries development in the region. Also the authors suggest the indicators system which lets to realize the assessments of economic structure according to the process of transformation and innovation development.

Keywords: region is focused on resources, economic structure, the indicators system.

Существующие в настоящее время методы управления развитием региональных социально-экономических систем осуществляются с использованием данных официальной статистической отчетности, содержащей ограниченное число показателей, характеризующих технологическое состояние отраслей экономики ресурсно-ориентированного региона. Актуальность данных исследований обозначена в Послании Президента к Федеральному собранию 12 декабря 2013 г., посвященному 20-летию Конституции РФ: «...предлагаю создать систему статистической оценки уровня технологического состояния отраслей экономики, чтобы иметь объективную картину нашей конкурентоспособности» [1].

Данное направление особенно актуально для оценки экономического развития ресурсно-ориентированных регионов, специфические особенности которых связаны с неравномерностью развития экономики и наличием высокого удельного веса в структуре

экономики отраслей с низким технологическим укладом [2]. Для экономики российских регионов характерно присутствие нескольких технологических укладов, профили которых обусловлены традиционно сложившейся специализацией и наличием ресурсов. Проведенные исследования позволили выявить наличие в регионах технологических укладов, отраженных в табл. 1.

Основываясь на результатах систематизации профилей технологических укладов, можно сделать вывод о том, что состояние экономики регионов различается по уровню технологического развития [3]. Причем 6-й технологический уклад, отрасли которого динамично развиваются в развитых странах рыночной экономики, в регионах России представлен весьма слабо. Структура экономики ресурсно-ориентированного региона в разрезе профилей технологических укладов (на примере Красноярского края) приведена в табл. 2.

Проведенные исследования свидетельствуют, что технологическое состояние отраслей экономики ресурсно-ориентированного региона характеризуется наличием высокого удельного веса отраслей 4-го технологического уклада, отрасли которого связаны в основном с добычей продукции угольной промышленности, добычей и первичной переработкой цветных металлов и нефтепереработкой [3]. Для обеспечения конкурентоспособности ресурсно-ориентированных регионов на национальном и мировом рынках и обеспечения инновационного содержания их экономики необходима трансформация структуры экономики в пользу более высоких технологических укладов [4].

Данное обстоятельство обуславливает необходимость более полной оценки технологического состояния отраслей экономики ресурсно-ориентированных регионов, введения в связи с этим на региональном уровне дополнительной отчетности по учету наличия и состояния имеющихся технологий, разработки системы показателей оценки структуры отраслей технологических укладов и динамики соответствующих структурных сдвигов в экономике регионов данного типа. Нами разработаны инструменты оценки технологического состояния отраслей экономики, которые представлены в табл. 3 системой показателей, характеризующей трансформацию структуры экономики.

Таблица 1

Соответствие основных отраслей промышленности профилю технологического уклада

Профиль технологического уклада	Основные отрасли промышленности профилей технологических укладов
Первый	Пищевая, текстильная, кожевенная, деревообрабатывающая
Второй	Угольная промышленность, добыча и обогащение железных руд и строительные материалы
Третий	Целлюлозно-бумажная промышленность, тяжелое машиностроение, химическое производство органических соединений, металлургия в части производства стали и проката черных металлов
Четвертый	Добывающая промышленность в части добычи нефти и газа, добычи и обогащения цветных металлов; нефтепереработка; химическое производство синтетических полимерных материалов и органических соединений; производство резиновых и пластмассовых изделий, неметаллических минеральных продуктов; цветная металлургия; производство транспортных средств; энергетика
Пятый	Электронная промышленность, вычислительная техника, программное обеспечение, авиационная промышленность, телекоммуникации, информационные услуги
Шестой	Биотехнологии, основанные на достижениях молекулярной биологии и генной инженерии, нанотехнологии, системы искусственного интеллекта, глобальные информационные сети и интегрированные высокоскоростные транспортные системы

Таблица 2

Структура экономики Красноярского края в разрезе профилей технологических укладов в 2007–2010 гг.

Профиль технологического уклада	Удельный вес профиля технологического уклада в структуре экономики, %			
	2007	2008	2009	2010
Всего, В том числе уклады:	100	100	100	100
Первый	6,2	7,7	7,6	7,2
Второй	2,7	3,9	7,0	4,5
Третий	6,7	8,1	6,8	7,2
Четвертый	83,6	79,3	77,7	80,2
Пятый	0,8	1,0	0,9	0,9

**Система показателей оценки профиля технологического состояния отраслей экономики
ресурсно-ориентированного региона**

Профили технологического уклада	Группы показателей трансформации структуры экономики	Экономическое содержание показателей
Технологические уклады, отражающие сырьевую направленность экономики региона (первый–четвертый)	1. Научно-инновационный потенциал	1. Состав квалифицированных кадров, их занятость в разрезе инновационных отраслей и сфер хозяйства, специальностей, в том числе в расчете на 1000 человек населения административно-территориального образования и др. Длительность процесса подготовки и разработки инновации, длительность производственного цикла инновации, разработка и внедрение инноваций-продуктов и инноваций-процессов, динамика обновляемости портфеля инноваций. Затраты на научные исследования, количество разработок или внедрений нововведений-продуктов и нововведений-процессов, состав и количество предприятий, занятых использованием новой технологии и созданием новой продукции, численность и структура сотрудников, занятых НИОКР и др.
	2. Показатели инновационного трансфера и распространения инноваций	2. Число коммерциализированных инноваций. Количество авторских прав на научно-технические разработки и производство инноваций, переданных юридическим и физическим лицам. Число совместных инновационных проектов, созданных с предприятиями-партнерами. Наличие организационных структур по управлению продвижением инноваций. Численность сотрудников, занятых управлением продвижения инноваций. Объем затрат на продвижение инноваций
	3. Показатели стратегических и законодотворческих инициатив	3. Наличие инвестиционных проектов и бизнес-инициатив, в том числе рассмотренных органами ОМСУ, поданных заявок и предложений по изменению существующего законодательства в области инновационной деятельности и изменению инновационного климата и др.
Высокие технологические уклады (пятый–шестой)	1. Показатели, характеризующие наличие отраслей высоких технологических укладов	1. Число отраслей, имеющих критические технологии, утвержденные Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899. Число критических технологий по сферам: биотехнологии; медицина и здравоохранение; новые материалы и нанотехнологии; транспортные и космические системы; рациональное природопользование; энергоэффективность и энергосбережение; лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии. Число технологий, опережающих мировой уровень
	2. Показатели трансформации технологического состояния отраслей экономики	2. Удельный вес в структуре экономики отраслей имеющих профили технологических укладов. Темпы роста объема производства отраслей 5-го и 6-го технологических укладов. Показатели источников трансформации доходов от реализации продукции низких технологических укладов в развитие отраслей высоких технологических укладов

Предложенные показатели дополняют существующую систему и обладают новыми аналитическими возможностями, позволяющими определить направления качественного изменения (трансформации) технологического состояния отраслей экономики ресурсно-ориентированного региона в связи с глобализацией экономических процессов.

Авторское определение и содержание понятия «трансформация технологического состояния отраслей экономики ресурсно-ориентированного региона» трактуется как «диверсификация экономики ресурс-

но-ориентированного региона, основанная на последовательном изменении структуры его экономики в пользу отраслей высоких технологических укладов за счет средств добывающих отраслей». Финансовым инструментом реализации трансформации в рамках региональной экономической политики, способствующей диверсификации, на наш взгляд, является трехлетний бюджет субъекта Федерации, обеспечивающий переход от функционального финансирования объектов к проектному «бюджетированию» целей развития [5]. Учитывая особенности структуры эко-

номики ресурсно-ориентированного региона при формировании проекта трехлетнего бюджета и реализации региональной экономической политики, необходим концептуальный подход к реализации структурных новаций, способствующий решению первостепенных задач по диверсификации экономики ресурсно-ориентированного региона, основными положениями которого являются:

- создание механизмов перераспределения доходов от реализации продукции добывающих отраслей в пользу отраслей высоких технологических укладов;
- обоснование необходимости введения дополнительной отчетности по учету технологического состояния отраслей экономики на региональном уровне;
- определение приоритетов в развитии инновационных процессов в регионе;
- дальнейшее развитие транспортной и энергетической инфраструктуры региона, обеспечивающих инновационность развития;
- законодательное разграничение расходных полномочий между органами власти разных уровней, что должно в полной мере соответствовать конституционному разграничению предметов ведения;
- сведение к минимуму финансирования «вертикального» выравнивания уровней социально-экономического развития регионов, способствующего росту числа дотационных регионов;
- развитие практики, в соответствии с мировым опытом, межрегионального проектного финансирования, что стимулирует рост инициативы, ответственность регионов в сфере повышения эффективности развития.

Данный концептуальный подход к решению задач диверсификации экономики требует серьезных изменений в бюджетном и налоговом законодательствах. Подход основывается на принципе финансовой самообеспеченности регионов при наличии достаточной налоговой базы.

Таким образом, для решения задачи оценки технологического состояния отраслей экономики ресурсно-ориентированных регионов с целью определения направлений ее дальнейшей диверсификации и повышения инновационности развития необходима разработка инструментов, таких как:

- дополнительная отчетность по учету технологического состояния отраслей экономики на региональном уровне;
- система показателей, позволяющих определить степень развития профилей технологических укладов в экономике ресурсно-ориентированных регионов;
- система мер, осуществляемых в области региональной экономической и правовой политик, способствующих

щих трансформации структуры экономики ресурсно-ориентированного региона от низких отраслей технологических укладов к более высоким.

Библиографические ссылки

1. Послание Президента РФ к Федеральному собранию 12 декабря 2013 года, посвященному 20-летию Конституции РФ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/news/17118> (дата обращения: 15.12.2013 г.).
2. Аврамчикова Н. Т. Перспективы развития региона с разреженным экономическим пространством в условиях глобализации // Региональная экономика. 2010. № 5 (140). С. 16–19.
3. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Красноярскому краю [Электронный ресурс]. URL: <http://www.krasstat.gks.ru> (дата обращения: 25.09.2013 г.).
4. Попова Е. А. Новая парадигма государственного регулирования развития регионов современной России как важнейший инструмент модернизации // Государственное и муниципальное управление: ученые записки СКАГС. 2011. № 1. С. 73–80.
5. Porter M., Stern S. The Global Competitiveness Report 2001–2002. [Электронный ресурс]. New York: Oxford University Press, 2001. URL: <http://www.isc.hbs.edu/econ-innovative.htm> (accessed 11.09.2013).

References

1. *Poslanye Prezidenta Rossyaskia Federatsia Federalnoy Sbornie 12 Dekabrya 2013* (The message of the Russian President to Federal Assembly of the 12th of December 2013 year to devoted 20 - to the Anniversary of the Constitution of the Russian Federation). Available at: <http://www.kremlin.ru/news/17118>. (accessed 15.12.2013 г.).
2. Avramchikova N. T. *Regionalnaya ekonomika*. 2010, no. 5 (140), p. 16–19.
3. *Territorialnaya organ Federalnoy sluygbe gosudarstvennoy statistike po Krasnoyarskomu krayu* (Federal State Statistics Service in Krasnoyarsk region). Available at: <http://www.krasstat.gks.ru> (accessed 11.09.2013).
4. Popova N. A. *Gosudarstvennoye i munitsipal'noye upravleniye: uchenyye zapiski SKAGS*. 2011, no. 1, p. 73–80.
5. Porter M., Stern S. The Global Competitiveness Report 2001–2002. New York: Oxford University Press, 2001. Available at: <http://www.isc.hbs.edu/econ-innovative> (accessed 11.09.2013).

© Аврамчикова Н. Т., Чувашова М. Н., 2014

УДК 65.011.8

РОЛЬ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА В РАЗВИТИИ ПРЕДПРИЯТИЙ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

В. Г. Бревнов, Л. В. Ерыгина

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Tailor1991@mail.ru, Erigina@sibsau.ru

Изучен вопрос о роли инновационного потенциала в развитии предприятий оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации. Перечислены мероприятия, имеющие непосредственное отношение к развитию инновационного потенциала в рамках осуществляемой государством политики модернизации предприятий оборонно-промышленного комплекса. Проведен анализ сущности и содержания понятий «потенциал», «инновация» и «инновационный потенциал». Выделены критерии, которыми должна обладать инновация, с целью применения в производственном процессе. Предложено понятие инновационного потенциала оборонно-промышленного комплекса, выделены основные его составляющие, которые позволяют охарактеризовать текущее состояние, угрозы и перспективы дальнейшего развития.

Ключевые слова: инновации, инновационный потенциал, оборонно-промышленный комплекс.

INNOVATIVE POTENTIAL ROLE FOR THE DEVELOPMENT OF THE DEFENSE INDUSTRY ENTERPRISES

V. G. Brevnov, L. V. Erygina

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: Tailor1991@mail.ru, Erigina@sibsau.ru

Authors have studied the question of innovative potential role for the Russian Federation defense industry enterprises. The actions carried out by the government for the development of the defense industry innovative potential are defined. The essence analysis of the definitions "potential", "innovation" and "innovative potential" is carried out. Criteria which "innovation" for the purpose of application in production has to possess are allocated. The concept of the defense industry innovative potential which components will allow to characterize current state, threats and prospects of further development is offered.

Keywords: innovation, innovative potential, defense industry.

Инновационное развитие отечественного оборонно-промышленного комплекса (ОПК) происходит под влиянием различных экономических и политических преобразований. На современном этапе в Российской Федерации формируются стратегии качественного обновления ОПК, которые ориентированы прежде всего на модернизацию производственных мощностей, совершенствование исследовательских программ, выполнение государственного оборонного заказа, обновление кадрового потенциала и насыщение международных рынков конкурентоспособной высокотехнологичной продукцией.

Одной из важнейших задач стратегического планирования для предприятий ОПК является реализация поставленных целей, прежде всего федеральных целевых программ и государственных программ вооружений. Предприятия и производственные комплексы, имеющие высокий уровень развития собственного потенциала, как показывает практика, оказываются рентабельными, конкурентоспособными и эффективными.

В целях устойчивого развития ОПК, потенциал отрасли, в том числе инновационная составляющая, должен находиться на достаточно высоком уровне, вне зависимости от влияния как внешних, так и внутренних факторов.

Инновационный потенциал является важной составляющей совокупных возможностей предприятий ОПК, поскольку с его помощью руководство предприятий способно распоряжаться набором существующих и перспективных ресурсов, осуществлять их поиск и систематизацию, управлять развитием производственного процесса, обеспечивать генерирование новых либо улучшенных технологий, необходимых для производства конкурентоспособной продукции военного и двойного назначения.

Неслучайно современные условия развития ОПК предъявляют высокие требования к данному качеству российской продукции, что проявляется как соотношение цены и качества. В этой связи необходимо в рамках системы управления производственным

комплексом и отдельных предприятий создать благоприятные условия для проведения инновационной деятельности. Существенным моментом в данном случае является выбор инструментов управления предприятиями ОПК, которые включают оценку инновационного потенциала.

В границах настоящего исследования, в целях определения роли инновационного потенциала предприятий ОПК, необходимо подвергнуть анализу понятие «инновационный потенциал», но для начала необходимо проанализировать сущность и содержание терминов «потенциал» и «инновация».

Неотъемлемой составляющей понятия «потенциал» является слово «потенция» (от лат. *potentia* – сила). В толковом словаре даётся следующее определение: «Потенция – возможность, то, что существует в скрытом виде и может проявиться при известных условиях» [1].

Отталкиваясь от базового понятия «потенция», необходимо исследовать понятие «потенциал», некоторые из толкований которого представлены в табл. 1.

В приведённых толкованиях понятия «потенциал» замечено много общего. Так, в большинстве понятий идёт речь о совокупности средств, возможностей, источников, но в некоторых понятиях также говорится о совокупности условий, запасов и степени мощности, которые необходимы или могут быть использованы

в определённой области, сфере для чего-нибудь, реализации плана, задачи, цели. Согласно толковому словарю Ожегова, данные понятия обладают следующим содержанием (табл. 2).

Обобщая вышеизложенное, считаем, что более подробно отражают содержание понятия «потенциал» следующие его составляющие: средство, возможность, запас и источник. На основании чего в целях настоящего исследования следует применять понятие потенциала, изложенное в большом энциклопедическом словаре под редакцией А. М. Прохорова: «Потенциал – это источники, возможности, средства, запасы, которые могут быть использованы для решения какой-либо задачи, достижения определённой цели; возможности отдельного лица, общества, государства в определённой области» [2].

В научной литературе применимо к предприятиям либо производственным комплексам встречается множество видов потенциала, например, рыночный, трудовой, интеллектуальный, производственный, научно-технический, экономический, инновационный и др.

Многогранность понятия «потенциал» следует объяснить множеством объектов, к которым его возможно применить. Каждый потенциал содержит общность возможностей, средств, запасов и источников, которые применимы в определённой области и направлены на достижение поставленных целей.

Таблица 1

Анализ понятия «потенциал»

Автор	Понятие
Ожегов С. И., Шведова Н. Ю. Толковый словарь. М. : ИНФОТЕХ, 2009. 944 с.	Степень мощности в каком-нибудь отношении, совокупность средств, возможностей, необходимых для чего-нибудь
Ефремова Т. Ф. Современный толковый словарь русского языка. В 3 т. Т. 1. АСТ, 2006. 1168 с.	Совокупность всех имеющихся возможностей, средств в какой-либо области, сфере
Ушаков Д. Н. Большой толковый словарь современного русского языка. Славянский дом книги, 2010. 1239 с.	Совокупность средств, условий, необходимых для ведения, поддержания, сохранения чего-нибудь
Большой энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. 2-е изд. перераб., доп. 2004. 1456 с.	Источники, возможности, средства, запасы, которые могут быть использованы для решения какой-либо задачи, достижения определённой цели; возможности отдельного лица, общества, государства в определённой области
Большая советская энциклопедия. В 30 т. / гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. Советская энциклопедия, 1978. 18240 с.	Средства, запасы, источники, имеющиеся в наличии, которые могут быть мобилизованы, приведены в действие, использованы для достижения определённой цели, осуществления плана, решения какой-либо задачи

Таблица 2

Анализ содержания понятия «потенциал»

Средство	Прием, способ действия для достижения чего-нибудь
Возможность	Средство, условие, обстоятельство, необходимое для осуществления чего-нибудь
Источник	То, что дает начало чему-нибудь, откуда исходит что-нибудь
Условие	Обстоятельство, от которого что-нибудь зависит
Запас	То, что запасено, приготовлено, собрано для чего-нибудь
В свою очередь, степень мощности состоит из двух понятий – степени и мощности	
Степень	Мера, сравнительная величина чего-нибудь
Мощность	Физическая величина, характеризующая работу, совершаемую в единицу времени

Однако в целях анализа понятия «инновационный потенциал» следует проанализировать понятие «инновация».

Родоначальником теории инноваций считают Йозефа Шумпетера, рассматривавшего инновацию как средство предпринимательской деятельности, предназначенное для получения прибыли. Шумпетер рассматривал пять случаев для определения инноваций [3]:

- 1) выпуск нового товара, не знакомого потребителю, или придание товару новых качеств;
- 2) создание метода производства, ранее не применявшегося в определённой отрасли промышленности, при этом новый производственный метод не обязательно должен быть результатом научного открытия, может состоять в новой форме коммерческого обращения товара;
- 3) открытие нового рынка сбыта в определённой стране, на котором товары из данной отрасли промышленности ранее не продавались, независимо от сроков функционирования данных рынков;
- 4) открытие нового источника факторов производства;
- 5) создание новой организации отрасли.

На сегодняшний день в экономической науке понятие «инновация» применяется как обособленно, так и для обозначения таких терминов, как «инновационный процесс», «инновационная деятельность», «инновационное решение», а также в ряде других.

В рамках настоящего исследования изучено двадцать семь толкований понятия «инновация», предложенных как отечественными, так и зарубежными учёными. Из числа исследователей следует отметить Й. Шумпетера, Ф. Никсона, А. С. Кулагина, Р. Н. Минниханова, А. Б. Титова и др.

Анализ содержания понятия «инновация» позволил выделить несколько распространённых в научной литературе точек зрения.

Первая приравнивает инновации к новшествам в определённой области, к их числу следует причислять: результаты исследовательского процесса, интеллектуальной деятельности, нового открытия в виде новых потребительских стоимостей, нового продукта, товара или услуги, способов (технологий) их производства или применения, результата научного исследования, нового метода продаж или метода деловой практики, организации рабочих мест или внешних связей, новые бизнес-модели и создание новых рынков сбыта.

Новшества могут применяться в организационной, финансовой, научно-исследовательской, юридической, коммерческой, культурной, социальной, образовательной, медицинской, бюджетной, банковской, страховой и других сферах.

Вторая определяет инновации с точки зрения процесса производства, создания новых изделий, технологий, проведения производственных и коммерческих мероприятий, внедрения новшеств в сфере управления производством.

Третья точка зрения рассматривает инновацию с позиций внедрения в производство новых элементов, подходов, изделий, кардинально отличающихся от

предшествующих, при этом внедрение происходит по результатам проведённого исследования либо сделанного открытия.

Отличие рассмотренных терминов свидетельствует об отсутствии единого подхода к содержанию понятия «инновация». В рамках данного исследования считаем неприемлемым приравнивать понятия «инновация» и «новация», поскольку понятие «инновация» в определённой степени включает в себя содержание термина «новация», не следует забывать и о том, что новшество становится инновацией в случае коммерциализации. Кроме того, на наш взгляд, не следует приравнивать понятия «инновация» и «инновационный процесс», поскольку инновации – это новые или улучшенные идеи, представленные в одном из пяти случаев, определённых родоначальником теории инноваций Шумпетером. Инновационный процесс представляет набор действий, посредством реализации которых новые идеи воплощаются в определённый коммерческий результат.

По нашему мнению, инновация должна быть востребованной, способной быть внедрённой в определённый процесс на настоящий момент времени либо в перспективе, обладать новизной, способной принести, прежде всего, экономические выгоды. В рамках настоящего исследования придерживаемся второй точки зрения, определяющей инновации с позиций процесса создания новых изделий, технологий, проведения необходимых производственных и коммерческих мероприятий, внедрения новшеств в сфере управления производством.

Изучив понятия «потенциал» и «инновация», необходимо подвергнуть анализу понятие «инновационный потенциал». Понятие «инновационный потенциал» вошло в обиход и получило широкое применение в 80-х гг. двадцатого столетия и отразило в своей структуре содержание инновационной деятельности. На сегодняшний день существует множество толкований понятия «инновационный потенциал», проводятся научные исследования, состоящие в анализе подходов к данному понятию.

Проведённый нами анализ понятия «инновационный потенциал» показывает отсутствие единой точки зрения по вопросам определения его содержания, что позволяет обратить внимание на некоторое количество подходов к его обоснованию. Рассмотрим наиболее распространённые из них.

1. Ресурсный подход наиболее распространён и определяет инновационный потенциал в виде совокупности ресурсов, посредством использования которых осуществляется инновационная деятельность в рамках инновационных систем. Данной точки зрения придерживаются следующие исследователи: А. А. Бовин, Л. Водачек, О. Водачкова, Г. М. Гукасян, И. П. Дежкина, Г. И. Жиц, П. Н. Завалин, А. Т. Зуб, Г. А. Кирюхин, А. И. Николаев, В. И. Сулов, Л. Э. Чередникова, Л. Ф. Шабайкова и В. А. Якимович.

2. Производительный подход рассматривает инновационный потенциал как совокупность научно-технических, инфраструктурных, финансовых, технологических, социокультурных, правовых и иных

возможностей, обеспечивающих генерирование инноваций. Приверженцами данного мнения являются такие учёные, как А. А. Дынкин, Я. И. Иванцов, Д. И. Кокурин, Б. К. Лисин, Н. А. Салтыков, С. А. Трухин, В. Н. Фридлянов, Н. Чухрай.

3. Структурный подход подвергает изучению отдельные составляющие инновационного потенциала. По общему правилу он отождествляется с понятиями интеллектуального, научно-технического, научного и экономического потенциалов. Данную точку зрения разделяют следующие учёные: М. Данько, И. А. Коршунов, О. П. Коробейников, И. В. Новиков и А. А. Трифилова.

4. Обобщающий подход определяет структуру инновационного потенциала с точки зрения сбалансированности, а также готовности к осуществлению инновационной деятельности. Учёными, разделяющими данные взгляды, являются В. Н. Гунин, Н. Л. Зайцев, С. И. Кравченко, И. С. Кладченко, В. Г. Матвейкин, А. М. Мухамедьяров, Р. А. Фатхудинов.

В настоящем исследовании применимо к ОПК следует рассматривать инновационный потенциал с позиций, отражающих содержание и характер задач, стоящих перед предприятиями данной отрасли. Таким образом, «инновационный потенциал – это способность предприятия (производственного комплекса) создавать, накапливать, совершенствовать и эффективно использовать совокупность имеющихся в наличии и предназначенных для достижения инновационных целей (осуществления инновационных программ, проектов, стратегий) ресурсы (интеллектуальные, материально-технические, кадровые, управленческие, финансовые, инфраструктурные, информационные, инвестиционные и иные), с целью дальнейшего развития технологических процессов производства, создания новых разработок (новшеств), уникальной продукции и услуг, отвечающих современным требованиям мирового рынка».

Приведённое нами понятие позволяет обозначить основные составляющие инновационного потенциала предприятий оборонно-промышленного комплекса. Так, к их числу следует отнести интеллектуальную, материально-техническую, кадровую, управленческую, финансовую, инфраструктурную, информационную, инвестиционную и маркетинговую (рыночную) составляющие. Наличие, недостаточный уровень развития либо отсутствие составляющих инновационного потенциала у определённого предприятия или производственного комплекса свидетельствуют

о необходимости создания данного элемента либо его дальнейшего развития.

Обобщая всё вышеизложенное, целесообразно сделать следующий вывод.

Инновационный потенциал является своего рода индикатором, определяющим способность экономической системы к изменению, переходу от текущего состояния к становлению на прогрессивный путь развития посредством реализации возможностей, которыми данная экономическая система обладает.

Роль инновационного потенциала в современных условиях заключается в том, что он выступает катализатором прогрессивного развития предприятий, производственных комплексов и, как следствие, экономики всего государства, поскольку уровень развития инновационного потенциала показывает современное состояние, способствует концентрации и обоснованному применению ресурсов, отражает перспективы дальнейшего развития предприятия, производственного комплекса. В настоящее время инновационный компонент предприятий оборонно-промышленного комплекса позволяет осуществлять выпуск уникальной в своём роде, разнообразной, наукоёмкой продукции, тем самым удовлетворяя потребности отечественного заказчика и зарубежных покупателей российской продукции.

Библиографические ссылки

1. Ожегов С. И., Шведова Н. Ю. Толковый словарь. М. : ИНФОТЕХ, 2009. 944 с.
2. Большой энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. 2-е изд., перераб., доп. М. : Большая Российская энциклопедия, 2004. 1456 с.
3. Шумпетер Й. Теория экономического развития. М. : Прогресс, 1982. 203 с.

References

1. Ozhegov S. I., Shvedova N. Yu. *Tolkovyy slovar'* (Dictionary). Moscwa, INFOTEKH Publ., 2009. 944 p.
2. Prokhorov A. M. *Bol'shoy entsiklopedicheskiy slovar'* (The big encyclopedic dictionary). Under the editorship of Prokhorov A. M. Prod. the 2nd, reslave. Additional, 2004, 1456 p.
3. Shumpeter Y. *Teoriya ekonomicheskogo razvitiya* (Theory of economic development). Moscwa, Progress Publ., 1982, 203 p.

© Бревнов В. Г., Ерыгина Л. В., 2014

РЕГЛАМЕНТАЦИЯ ИННОВАЦИОННЫХ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

К. И. Горлевский, А. В. Кукарцев

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: kempf@sibsau.ru

Рассмотрена роль и состояние ракетно-космической промышленности в российской экономике на современном этапе. Показаны проблемы управления инновационной деятельностью предприятий ракетно-космической промышленности. Обоснована необходимость повышения эффективности управления инновационными бизнес-процессами предприятий ракетно-космической промышленности. Рассмотрены подходы к регламентации бизнес-процессов и этапы реализации методики регламентации инновационных бизнес-процессов. Разработан алгоритм регламентации бизнес-процессов наукоемкого предприятия как базовый инструмент совершенствования инновационной деятельности предприятия ракетно-космической промышленности. Универсальная методика регламентации предлагается к использованию наукоемкими предприятиями.

Ключевые слова: ракетно-космическая промышленность (РКП), инновационный бизнес-процесс, регламентация бизнес-процессов, предприятия РКП.

RULEMAKING OF INNOVATIVE BUSINESS-PROCESSES OF SPACE-ROCKET INDUSTRY ENTERPRISE

K. I. Gorlevsky, A. V. Kukartsev

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: E-mail: kempf@sibsau.ru

The role and condition of the space-rocket industry in Russian economics at the present stage are considered in this article. The problems of management of innovative activity in the space-rocket industry enterprises are shown. The necessity of increasing of management effectiveness of innovative business-process with using rulemaking methods for the science-intensive enterprise is justified. The modern approaches to innovative business-process rulemaking are considered. The approaches of the method for innovative business-process rulemaking are offered in this article. The decision procedure of rulemaking of innovative business-process of knowledge-intensive enterprise as the base instrument for improvement of innovative activity of space-rocket industry enterprise is made. The universal method of business-process rulemaking is offered for using by knowledge-intensive enterprises.

Keywords: space-rocket industry, innovative business-process, rulemaking of business-process, space-rocket industry enterprise.

Россия – одна из немногих стран мира, создавших значительный ракетно-космический потенциал, позволяющий решать стратегические задачи развития ракетно-космической техники в интересах безопасности, социально-экономического развития страны, науки, международного сотрудничества, обеспечения постоянного доступа и необходимого присутствия Российской Федерации в космическом пространстве.

В Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года целью государственной политики в ракетно-космической промышленности (РКП) является создание экономически устойчивой, конкурентоспособной, диверсифицированной ракетно-космической промышленности, которая обеспечит увеличение объема промышленной продукции к 2015 г. в 1,8 раза по сравнению с 2007 г. [1].

В последние десятилетия усиливается значение ракетно-космической промышленности как главного источника национальной безопасности России. Важным показателем, характеризующим место РКП в экономике страны, являются затраты на НИОКР. Они составляют более 40 % всех затрат из федерального бюджета в целом по российской экономике.

Масштабы предприятий и наукоемкое производство обуславливают высокие требования к управлению предприятиями ракетно-космической отрасли. Управление инновационными бизнес-процессами таких предприятий требует от современных менеджеров высокого уровня владения современными информационными технологиями и инструментами.

В соответствии с положениями Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г. была разработана

Стратегия развития ракетно-космической промышленности на период до 2015 г., в рамках которой предусмотрено создание отечественной ракетно-космической техники (РКТ) мирового уровня. Однако в силу ряда причин, связанных с устаревшими методами проектирования и несовершенной технологией изготовления РКТ, дефицитом квалифицированных кадров, неэффективными методами управления, сроки реализации новых проектов увеличиваются, а затраты на них значительно возрастают [1].

РКП России все еще развивается в рамках индустриального технологического уклада прошлого века, и лишь отдельные ее предприятия в значительной мере используют современные производственные и управленческие технологии.

Регламентация бизнес-процессов является одним из важнейших инструментов упорядочения деятельности наукоемкого предприятия. Она особенно актуальна для российских предприятий РКП, так как степень описания, прозрачности их бизнес-процессов на сегодняшний день не является достаточно высокой. Бизнес-процессы предприятий РКП являются инновационными по определению, жизненный цикл проектов наукоемких предприятий часто занимает годы, и поэтому главной задачей управления инновационной деятельностью является эффективное управление в сфере НИОКР.

Многие предприятия инициируют проекты описания и регламентации бизнес-процессов. Для успешного выполнения таких проектов необходимо разработать соответствующую методику и подобрать подходящий программный инструмент для описания и последующего документирования бизнес-процессов. Наличие в организации эффективной методики регламентации и квалифицированных сотрудников, способных ее применять на практике, является важнейшим фактором успеха такого проекта [2].

Под регламентацией бизнес-процесса понимается разработка нормативно-методических документов, частично или полностью устанавливающих порядок управления бизнес-процессом, порядок выполнения бизнес-процесса и требования к ресурсам, необходимым для его выполнения.

Регламентация бизнес-процесса осуществляется с помощью различных документов, как относящихся непосредственно к рассматриваемому процессу, так и определяющих общие требования для ряда бизнес-процессов предприятия. В зависимости от целей регламентации, объектов и сроков выполнения проекта можно выделить несколько общих подходов к регламентации бизнес-процессов предприятия (табл. 1).

Также при реализации проекта регламентации бизнес-процессов необходимо придерживаться следующих базовых принципов:

- регламентировать следует только то, что действительно необходимо;
- стремиться к простоте при описании бизнес-процессов;
- создавать комплексные регламенты (вместо множества частных);
- учитывать квалификацию персонала и особенности культуры;
- переносить акцент при детализации бизнес-процессов с описания управления на детальное представление технологии выполнения бизнес-процесса.

При использовании первых трех подходов для создания регламентов бизнес-процессов необходимо придерживаться алгоритма, состоящего из трех базовых этапов, указанных на рис. 1.

При описании реальной модели «Как есть» должны быть отражены действия конкретных сотрудников предприятия и их решения. Для каждого шага надо внимательно следить за логическим уровнем описания, т. е. необходимо каждый раз наглядно представлять себе верхний уровень регламентации либо уже вложенные бизнес-процессы второго и/или третьего уровня. Описывать следует те операции, действия, работы, которые не просто формализованы, а действительно выполняются [3].

Любой бизнес-процесс должен быть проанализирован в соответствии с заданными требованиями. Эти требования могут быть установлены как самим предприятием, так и внешними организациями. Кроме того, каждый бизнес-процесс можно сравнивать с аналогичными процессами на других предприятиях.

Таблица 1

Подходы к регламентации бизнес-процессов предприятия РКП

Наименование подхода	Цель регламентации бизнес-процесса	Объекты регламентации	Предельный срок выполнения
Формализация существующего бизнес-процесса	Формализация существующего бизнес-процесса	Бизнес-процесс, не требующий изменений	2 недели
Быстрое принятие решений	Незначительные улучшения отдельных показателей процесса (снижение затрат, длительность цикла)	Бизнес-процесс, нуждающийся в незначительных изменениях	3 месяца
Перепроектирование бизнес-процесса	Кардинальное изменение логики и принципов выполнения бизнес-процесса	Бизнес-процесс, который неэффективен в существующем виде	2 недели
Разработка нового бизнес-процесса	Внедрение в практику предприятия нового бизнес-процесса	Бизнес-процесс, не существующий, но необходимый для эффективного управления	от 3 месяцев

При этом можно использовать метод бенчмаркинга бизнес-процессов, заключающийся во внедрении шаблонов лучших образцов процессов, эффективно реализуемых конкурентами.

На предприятиях РКП существуют специальные виды деятельности, которые должны выполняться в аналогичной последовательности в каждом структурном подразделении. Примером подобных бизнес-процессов является работа с документацией.

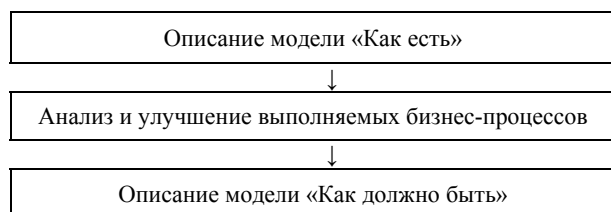


Рис. 1. Алгоритм процедур совершенствования бизнес-процессов

Структура типовой документированной процедуры имеет следующий вид:

- назначение документа и область его применения;
- нормативные ссылки;
- специальные термины и определения;
- общее описание процедуры документирования;
- матрица ответственности бизнес-процесса;
- документирование и архивирование;
- порядок внесения изменений в регламент;
- рассылка регламентов;
- лист регистрации изменений;
- ознакомление сотрудников;
- формы документов.

Регламент выполнения бизнес-процесса является нормативно-методическим документом, предназначенным для комплексного описания бизнес-процессов на верхнем и среднем уровнях. Шаблон регламента выполнения бизнес-процесса стоит использовать при формализации ключевых бизнес-процессов предприятия. Он может применяться для регламентации как межфункциональных (сквозных) бизнес-процессов, так и для тех процессов, которые выполняются в рамках подразделений предприятия РКП [2].

При заполнении шаблона регламента бизнес-процесса сотрудники должны вести поиск, анализ и систематизацию информации обо всех основных элементах бизнес-процесса: входе (ресурсах), выходе (продукте), механизме (исполнителях и инфраструктуре предприятия), управлении (предписывающей документации). Далее необходимо провести анализ и закрепить в матрице ответственности бизнес-процесса действия руководителей и исполнителей.

Опыт использования шаблонов регламентов инновационных бизнес-процессов на предприятиях РКП показывает, что трудоемкость их заполнения является достаточно высокой. Документ сложно согласовывать со всеми заинтересованными сотрудниками. Шаблон регламента показывает деятельность бизнес-процесса в контексте логики процессного подхода к управле-

нию. С его помощью следует описывать основные бизнес-процессы предприятия РКП.

Эффективность применения шаблона регламента выполнения бизнес-процесса зависит от культуры управления, сложившейся на конкретном предприятии. Шаблоны регламента заполняются только после того, как уже сформирована система бизнес-процессов, а сотрудники ознакомлены с основами процессного управления.

Можно выделить следующие этапы регламентации бизнес-процессов предприятия РКП:

- 1) разработка структуры нормативно-методической документации предприятия;
- 2) разработка форм регламентов бизнес-процессов;
- 3) разработка и согласование процедур управления документацией предприятия;
- 4) разработка и утверждение плана регламентации бизнес-процессов;
- 5) разработка нормативно-методической документации верхнего уровня предприятия;
- 6) разработка положений о подразделениях, регламентов выполнения бизнес-процессов.

Разрабатываемые регламенты будут различаться в зависимости от цели и объекта регламентации бизнес-процессов предприятия РКП (табл. 2).

Состояние инновационного и производственного потенциала на предприятиях РКП, характеризующееся недостаточной конкурентоспособностью на внешних рынках, неэффективный менеджмент большинства наукоемких предприятий, а также недостаточный уровень планируемых объемов бюджетных инвестиций на развитие оборонно-промышленного комплекса, приводят к необходимости разработки методик управления инновационными бизнес-процессами предприятий РКП. Это позволит учитывать характер и условия осуществления инновационной деятельности, обеспечить не только эффективное использование ограниченных ресурсов, но и устойчивое развитие предприятий РКП и отрасли в целом, позволяющее успешно решить проблемы повышения обороноспособности государства.

Приведем описание общего алгоритма регламентации инновационного бизнес-процесса предприятия РКП, который можно условно назвать разработкой регламента «с нуля» (рис. 2).

Работы на всех этапах регламентации должны быть выполнены с временными ограничениями согласно плану внедрения бизнес-процесса. В результате реализации данной методики предприятие РКП может инициировать проект перехода к процессному управлению.

Необходимость успешного функционирования в условиях высококонкурентной среды предъявляет свои требования к эффективности управления инновационными бизнес-процессами предприятий РКП. Решение задачи повышения эффективности управления неразрывно связано с обеспечением информационной поддержки бизнес-процессов. Одним из ключевых инструментов решения этой задачи и является регламентация инновационных бизнес-процессов предприятия.

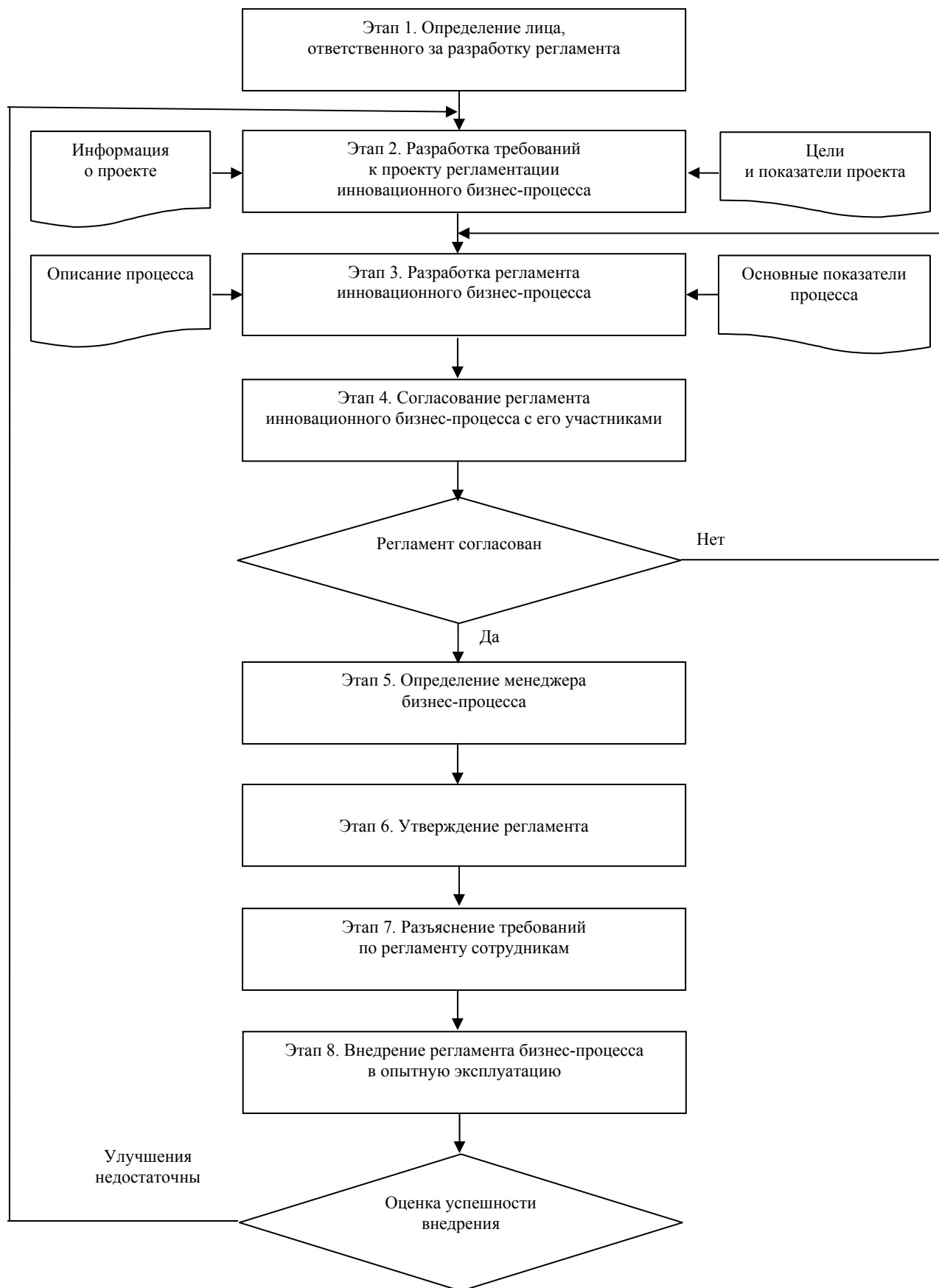


Рис. 2. Алгоритм регламентации инновационного бизнес-процесса

Объекты регламентации бизнес-процессов предприятия РКП

Объект регламентации	Основные документы	Цель
Бизнес-процессы управления	Положение о системе управления предприятием	Структурирование деятельности предприятия в виде системы процессов и методов управления ими
Типовые бизнес-процессы	Формализованная процедура управления документацией (ISO 9001:2000)	Формализация бизнес-процесса, норм, зон ответственности, изменений и пр.
Бизнес-процессы верхнего уровня	Регламент выполнения бизнес-процесса (шаблон)	Подробное описание бизнес-процесса
Деятельность структурных подразделений	Положение о подразделении предприятия	Определение задач, ответственности, функций, показателей взаимодействия
Бизнес-процессы операционного уровня	Операционная карта процесса, должностная инструкция, рабочая инструкция	Регламентация деятельности конкретных сотрудников предприятия

Библиографические ссылки

References

1. Бойко А. А., Бахмарева Н. В. Инструменты процессно-ориентированного управления воспроизводством основных фондов предприятий ракетно-космической промышленности : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. 128 с.

2. Репин В. В. Бизнес-процессы компании: построение, анализ, регламентация. М. : РИА «Стандарты и качество», 2007. 240 с.

3. Яшкин В. И., Яшкин В. И. Регламентация как инструмент управления бизнес-процессами предприятия // Проблемы повышения эффективности региона : межвуз. сб. науч. тр. Красноярск, 2010. 6 с.

1. Boiko A. A. *Instrumenty protsessno-orientirovannogo upravleniya vosproizvodstvom osnovnykh fondov predpriyatij raketno-kosmicheskoy promyshlennosti* (The tools of process-oriented management of key assets reproduction of space-rocket industry enterprises). SibSAU, 2012. 128 p.

2. Repin V. V. *Biznes-processy kompanii: postroyeniye, analiz, reglamentatsiya* (Enterprise business-process: making, analysis, rulemaking). Moscow, RIA "Standards and quality" Publ., 2007, 240 p.

3. Yashkin V. I. *Reglamentatsiya kak instrument upravleniya biznes-protsessami predpriyatiya* (Rulemaking as a tool for management of enterprise business-process). Krasnoyarsk, 2010. 6 p.

© Горлевский К. И., Кукарцев А. В., 2014

УДК 65.011.8

ИНСТРУМЕНТЫ КОНТРОЛЛИНГА ПРОИЗВОДСТВА ГРАЖДАНСКОЙ ПРОДУКЦИИ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ ОПК

Л. В. Ерыгина, Н. Е. Гильц

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: erigina@sibsau.ru, negilts@mail.ru

В работе выявлены и систематизированы факторы, оказывающие влияние на эффективность производства инновационной продукции гражданского назначения на предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК). Исследованы особенности производства гражданской продукции и предложен на их основе концептуальный подход и принципы, которые позволили разработать методику контроллинга производства гражданской продукции на предприятии ОПК.

Ключевые слова: инструменты контроллинга, оборонно-промышленный комплекс, гражданская продукция.

PRODUCTION MONITORING TOOLS OF THE CIVILIAN GOODS ON THE ENGINEERING ENTERPRISE OF DIC

L. V. Erygina, N. E. Giltis

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: erigina@sibsau.ru, negiltis@mail.ru

In the modern Russian economics military-industrial enterprises are known as high-precision production in scientifically advanced technical sphere and it allows to produce competitive goods. Production of civilian goods plays an important role in ensuring the defense industry. In this regard the new requirements of organization, maintenance and management tools are needed. One of these tools is monitoring.

The factors influencing the effectiveness of production of innovative civilian goods on the enterprises of the defense-industrial complex are identified and systematized in this article. The features of production of civilian goods are analyzed and it allows to develop a technique of monitoring the civilian production on the enterprise of the defense-industrial complex.

Keywords: monitoring tools, defense-industrial complex, civil products.

На предприятиях оборонно-промышленного комплекса сосредоточен основной производственный и интеллектуальный потенциал страны. Устойчивое развитие предприятий ОПК, достигаемое также за счет расширения военно-технического сотрудничества и развития производства гражданской продукции, является важнейшим условием для решения проблемы обеспечения обороноспособности страны и развития экономики в целом.

Конкурсное распределение гособоронзаказа, сложность воспроизводства инновационного потенциала, вероятностный характер заключения договоров на все виды деятельности заставляет предприятия ОПК наращивать долю производства продукции гражданского назначения [1]. Это играет значимую роль в обеспечении их текущей хозяйственной деятельности и, как следствие, повышает запас финансовой прочности, позволяет обеспечить воспроизводство инновационного потенциала и устойчивость предприятия в долгосрочной перспективе. В связи с этим предприятиям ОПК необходимо искать новые, эффективные инструменты управления. Одним из таких инструментов является контроллинг [2].

При этом набор инструментов контроллинга напрямую зависит от целей функционирования предприятия [3]. В настоящее время предприятия ОПК можно условно разделить на две группы. Первая группа предприятий – это предприятия, которые осуществляют свою деятельность в рамках государственного заказа. Они финансово зависимы от субсидий, выделяемых государством на осуществление основной деятельности. Производство продукции гражданского назначения для таких предприятий нацелено на поддержание устойчивого состояния, которое обеспечивается путем производства продукции, технологически связанной с основной деятельностью предприятия.

Вторая группа – это предприятия ОПК, работающие в условиях открытого рынка. Государственный заказ в объемах их производства занимает небольшую долю. Такие предприятия ОПК реализуют большое

количество коммерческих проектов и программ. Для них производство гражданской продукции является дополнительным источником получения финансирования инновационных проектов с целью обеспечения опережающего воспроизводства инновационного потенциала. Как правило, такие предприятия объединены в корпорации и заинтересованы в открытии новых бизнесов, расширении номенклатуры производства.

Таким образом, выбор инструментов контроллинга связан с реализацией различных целей предприятия ОПК: достижение устойчивого развития и (или) опережающего воспроизводства инновационного потенциала.

Решение задачи разработки инструментов контроллинга производства продукции гражданского назначения требует комплексного исследования факторов, оказывающих влияние на эффективность деятельности предприятий ОПК.

В ходе исследования были выявлены и систематизированы следующие факторы: доля специализированных производств; износ основных производственных фондов; вид продукции; наличие гособоронзаказа; наличие альтернативных рынков, их емкость и темпы роста; уровень конкурентоспособности продукции на рынках; объем затрат на НИОКР и сроки их осуществления; объем и источники финансирования проектов предприятий ОПК; надежность поставщиков; наличие субститутов на рынке; возрастной состав персонала; уровень квалификации персонала; организация переподготовки и повышения квалификации специалистов и др.

Выбор признаков систематизации факторов обусловлен необходимостью учета их взаимного влияния на различные сферы деятельности предприятия, источника их влияния, а также возможности управления ими на оперативном и стратегическом уровнях, исходя из характера предоставляемой информации.

Анализ выявленных в работе факторов позволяет сделать вывод о том, что при производстве гражданской продукции предприятие должно осуществлять деятельность в новых для него сферах, таких как мар-

кетинг, финансы, логистика и др. Большинство из этих факторов оказывают существенное влияние на эффективность производства гражданской продукции в данных сферах, являются слабо регулируемыми, информация о них носит стохастический характер, они подлежат учету при разработке инструментов контроллинга.

Существенное влияние таких факторов, как наличие гособоронзаказа, государственного финансирования проектов предприятий ОПК, наличие альтернативных рынков создают условия для существования двух взаимосвязанных производств – оборонного и гражданского и определяют необходимость учета их взаимного влияния при производстве продукции гражданского назначения. Это выражается в учете целей развития предприятия. Если предприятие ориентировано на достижение устойчивого развития, то при производстве гражданской продукции, технологически связанной с основным производством, такой фактор, как доля специализированного оборудования, не будет оказывать существенного влияния на эффективность производства гражданской продукции. Для предприятий, ориентированных на опережающее воспроизводство инновационного потенциала и диверсификацию своей деятельности, этот фактор будет сдерживающим, поскольку предприятия могут производить гражданскую продукцию, технологически не связанную с основным производством.

Таким образом, наличие двух видов деятельности предприятий ОПК – оборонного и гражданского производства и, как следствие, возможности использования технологий двойного назначения является одной из самых важных их особенностей. При этом также следует учитывать инновационный характер основного производства. Предприятия этой отрасли вынуждены постоянно совершенствовать, улучшать и создавать новые образцы военной техники. Такие факторы, как вид продукции, доля высококвалифицированного персонала предприятия, доля использования специализированных материалов и др., оказывают существенное влияние на эффективность производства инноваций.

Коммерциализация инноваций возможна при условии диффузии их в производство гражданской продукции. Это обуславливает инновационный характер производимой гражданской продукции и становится ее конкурентным преимуществом. При этом разные инновации (рыночные, технические, сырьевые, технологические, продуктовые) по-разному могут сочетаться в определенном виде гражданской продукции. Поэтому влияние таких факторов, как объем затрат на НИОКР и сроки их осуществления для отдельных видов, – значительно. Особенно важно это для предприятий, целью которых является опережающее воспроизводство инновационного потенциала, поскольку для продукции, технологически не связанной с основным производством, необходимы дополнительные объемы затрат на НИОКР.

Таким образом, инновационный характер основного производства и диффузия инноваций в производство продукции гражданского назначения является от-

личительной особенностью предприятий ОПК и обуславливает наличие неопределенности при производстве продукции гражданского назначения.

Систематизация факторов и определение особенностей деятельности предприятий ОПК позволили обобщить основные положения концептуального подхода к контроллингу производства продукции гражданского назначения, которые заключаются в учете:

- взаимосвязанности и взаимозависимости производства основной и гражданской продукции, состоящих в коммерциализации имеющегося инновационного потенциала предприятия ОПК;
- целей создания продукции гражданского назначения: обеспечение финансовой устойчивости в условиях вероятностного характера получения и снижения объемов гособоронзаказа; обеспечение опережающего воспроизводства инновационного потенциала предприятия как для производства основной продукции, так и для производства продукции гражданского назначения;
- возникновения новых сфер деятельности предприятия при производстве гражданской продукции, не характерных для основного производства (маркетинговая, финансовая и др.);
- инновационного характера производства основной продукции и продукции гражданского назначения.

Реализация предложенного концептуального подхода требует разработки принципов контроллинга, определяющих требования к методическому инструментарию.

В ходе проведенного исследования были изучены и проанализированы основные принципы контроллинга: целенаправленность; унификация; комплексность; согласованность; соответствие; интеграция; системность и др [1; 3]. Однако перечисленные принципы не учитывают особенности функционирования предприятий ОПК. В связи с этим в рамках проведенного исследования были сформулированы следующие специфические принципы контроллинга: полифункциональность; учет инновационного характера производимой продукции; декомпозиция; соответствие методов контроллинга уровню неопределенности.

Принципы контроллинга производства гражданской продукции должны учитывать выявленные особенности предприятий ОПК, цели и условия их развития. Сформулированные принципы и их соответствие предложенным концептуальным положениям представлены в таблице.

Принцип полифункциональности. Для эффективной работы системы осуществления контроллинга необходим целенаправленный и комплексный подход, поскольку на машиностроительных предприятиях ОПК параллельно существуют два производства – оборонное и гражданское. Через производство гражданской продукции происходит коммерциализация инноваций, а также окупаемость инвестиций государства в основное производство. Наличие на одном предприятии производства продукции военного и гражданского назначения обуславливает применение принципа полифункциональности.

Принцип декомпозиции. Предполагает выделение целей функционирования предприятий, сфер деятельности предприятия, видов продукции, производственных затрат и т. д. Особенностью реализации данного принципа в предлагаемой системе является введение двух уровней контроллинга: по обобщающим показателям для выделенных сфер деятельности и по частным показателям, определяемым в зависимости как от сферы деятельности, так и от причин отклонений обобщающих показателей.

Принцип учета инновационного характера производимой продукции. Предполагает, что при передаче инноваций из основного производства в гражданское при расчете себестоимости продукции гражданского назначения необходимо учитывать возникающие при этом риски, связанные с ними затраты на освоение и коммерциализацию.

Соответствие методов контроллинга уровню неопределенности. Одной из особенностей продукции гражданского назначения является открытый рынок ее реализации, в отличие от продукции военного назначения, которая распределяется государством. В связи с этим производство гражданской продукции зависит от частых и хаотичных изменений, происходящих на рынке. Поэтому вывод инновационной гражданской продукции на рынок сопровождается высоким уровнем неопределенности. Это позволяет говорить о необходимости ее учета при разработке инструментов контроллинга.

Исследованные особенности производства гражданской продукции и предложенные на их основе концептуальный подход и принципы позволили разработать методику контроллинга производства гражданской продукции предприятиями ОПК. Этапы методики контроллинга производства гражданской продукции представлены на рисунке.

На первом этапе осуществляется идентификация типа производимой продукции гражданского назначения и формируется перечень сфер деятельности предприятия ОПК, связанных с производством гражданской продукции.

На втором этапе идентифицируются потенциальные сферы осуществления контроллинга в соответствии с проведенной систематизацией факторов. Опре-

делены следующие сферы осуществления контроллинга: производственная, маркетинговая, научно-техническая, финансовая, материально-технического снабжения, кадровая. На этом этапе происходит качественный анализ по выделенным факторам: определяются сферы, наиболее подверженные влиянию, характер влияния факторов и возможность их количественной оценки.

На третьем этапе каждая сфера осуществления контроллинга характеризуется своей системой показателей, которые разбиваются на две группы – частные и обобщающие. Контроллинг предлагается вести по двум уровням. На первом уровне контролю подлежат обобщающие показатели по выделенным сферам деятельности: затраты в сфере производства; затраты, связанные с логистикой и продвижением продукции на рынке; затраты на НИОКР; финансовые издержки; затраты на материально-техническое снабжение; затраты на оплату труда. На втором уровне определяется состав частных показателей в зависимости от сферы и выявленных причин отклонений обобщающих показателей. Контроллинг за частными показателями осуществляется с использованием инструментов мониторинга.

На четвертом этапе влияние обобщающих показателей на финансовый результат деятельности предприятия можно оценить, применяя показатели чувствительности. В работе предлагается использовать коэффициент эластичности. В этом случае такие коэффициенты будут называться коэффициентами реагирования финансовых результатов на изменения обобщающих показателей. В качестве финансового результата может выступать выручка, прибыль, маржинальный доход и др. Коэффициент реагирования прибыли на изменение обобщающих показателей показывает, что любое изменение показателей на один процент приведет к изменению прибыли на определенное количество процентов. Чем больше коэффициент реагирования, тем больше риск потери прибыли.

Таким образом, можно выбрать наиболее значимые сферы деятельности, которые могут повлиять на финансовый результат (этап 5). Это позволяет уточнить состав сфер деятельности предприятия, которые должны контролироваться со стороны предприятия.

Основные положения концептуального подхода к контроллингу производства гражданской продукции и соответствующие им принципы

№ п/п	Положения концептуального подхода	Принцип контроллинга
1	Взаимосвязанность и взаимозависимость производства основной и гражданской продукции, состоящая в коммерциализации имеющегося инновационного потенциала предприятия ОПК	Полифункциональность
2	Учет целей создания продукции гражданского назначения	Декомпозиция
3	Возникновение новых сфер деятельности предприятия при производстве гражданской продукции, не характерных для основного производства (маркетинговая, финансовая и др.)	Декомпозиция
4	Инновационный характер производства основной и продукции гражданского назначения	Учет инновационного характера. Соответствие методов контроллинга уровню неопределенности



Этапы методики контроллинга производства гражданской продукции

На шестом этапе определяются отклонения по обобщающим показателям. Границы отклонений соответствуют величине доли запаса финансовой прочности, определяемой в соответствии с размером коэффициента, характеризующего долю затрат по обобщающему показателю в соответствующей сфере к общему объему затрат. Отклонение по обобщающему показателю не должно превышать эту величину. Критерий выбора зависит от цели развития предприятия ОПК (этап 7). Если предприятие имеет госзаказ и, как следствие, гарантированное государственное финансирование своей деятельности, то цель выпуска продукции гражданского назначения – это поддержание устойчивого состояния. Если госзаказ занимает небольшую долю в общем объеме производства, а предприятие реализует множество коммерческих проектов и программ, то целью его становится опережающее воспроизводство инновационного потенциала.

Далее происходит сравнение запаса финансовой прочности предприятия (ЗФП) с установленным отклонением. Если цель предприятия – поддержание устойчивого состояния (этап 7.1.), то критерием выступает ЗФП, который определяется как разница между фактической прибылью и прибылью в точке безубыточности.

Если цель предприятия – опережающее воспроизводство инновационного потенциала (этап 7.2.), то критерии определяются как ЗФП минус дополнительный объем прибыли ($\Delta\P$), необходимой для опережающего воспроизводства инновационного потенциала ($\text{ЗФП}' - \Delta\P$).

Затем происходит сравнение отклонений обобщающего показателя по уточненным сферам контроллинга с первым критерием. При превышении отклонения обобщающего показателя (Δ) над ЗФП ($\Delta > \text{ЗФП}$) принимается решение о проведении мониторинга для выделенной сферы контроллинга по всем частным показателям. То есть происходит переход на этап 10.

При контроле над частными показателями могут применяться статистические методы. Границами отклонений при этом будет служить определяемые значения ЗФП предприятия.

Если предприятие выбирает путь опережающего развития воспроизводства, то отклонение сравнивается с разницей ЗФП и величиной дополнительного объема прибыли ($\Delta < (\text{ЗФП}' - \Delta\P)$). Если отклонение по показателю меньше разницы запаса финансовой прочности и дополнительного объема прибыли, то

происходит переход на восьмой этап принятия управленческих решений для стабилизации достигнутого состояния. Если отклонение больше или равно установленной величины, то необходимо перейти к этапу 10.

После завершения этапа мониторинга необходимо проверить полученный результат и вернуться на этап 6. Возвращение на данный этап будет происходить только тогда, когда предприятие ОПК начинает выпускать новый продукт гражданского назначения. Если тип гражданского продукта не изменится, возвращаться на этап 6 не нужно, принимаются решения для стабилизации достигнутого состояния (этап 8 и 9).

Таким образом, предложенные инструменты контроллинга развития производства гражданского назначения инновационного типа на машиностроительных предприятиях ОПК позволят в едином информационном пространстве отслеживать динамику изменений контролируемых показателей и корректировать управленческие решения, что обеспечит долгосрочную основу для полноценной работы предприятия в условиях конкуренции.

Библиографические ссылки

1. Гильц Н. Е. Современное состояние и тенденции развития предприятий ОПК и РКО // Вестник СибГАУ. 2012. № 4 (44). С. 203–206.
2. Ерыгина Л. В. Принципы и инструменты стратегического контроллинга инновационной деятельности предприятий ОПК // Вестник МАИ. 2008. Т. 15, № 6. С. 39–44.
3. Ерыгина Л. В. Контроллинг инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности: методология и инструментарий : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 167 с.

Referances

1. Gilt N. E. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 4 (44), p. 203–206.
2. Erygina L. V. *Vestnik MAI*. 2008, no. 15(6), p. 39–44.
3. Erygina L. V. *Kontrolling innovatsionnoy deyatel'nosti predpriyatiy raketno-kosmicheskoy promyshlennosti: metodologiya i instrymentariy* (Controlling innovation at enterprises of space rocket industry: methodology and tools). Krasnoyarsk State Aerospace University, 2008. 167 p.

© Ерыгина Л. В., Гильц Н. Е., 2014

УДК 658.001.76; 338.2

ЗАДАЧИ ИННОВАЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА: ДЕКОМПОЗИЦИЯ И ИЕРАРХИЯ

Ю. В. Ерыгин, Е. О. Павлова

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: pavlova_89@sibsau.ru

Представлены результаты систематизации задач управления инновационными проектами на предприятиях ОПК по следующим признакам: уровень планирования, сфера деятельности, стадия инновационного процесса. Показано, что на стадии и в сфере НИОКР центральной задачей является стратегическое планирование, в рамках которого формируется программа инновационного развития предприятия ОПК. На уровне текущего планирования на стадиях опытного производства и промышленного освоения формируется производственная программа. Задачи, поставленные в сферах управления производством, материально-техническим снабжением, маркетингом, персоналом и финансами на стадии НИОКР, формируют параметры программы инновационно-развития и производственной программы промышленного предприятия ОПК.

Ключевые слова: инновационный процесс, инновационный проект.

THE PROBLEM OF INNOVATIVE PLANNING OF ENTERPRISES IN THE MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX: FUNCTIONAL DECOMPOSITION AND HIERARCHY

Yu. V. Erygin, E. O. Pavlova

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: pavlova_89@sibsau.ru

In this article the tasks of management of innovative projects have been systematized according to the following criteria: level of planning, activity area, and stage of the innovation process. It is shown that the central task is a strategic planning on the stage and in the sphere of R & D, where the program of innovative development of enterprises in the military-industrial complex are formed. The tasks in other activity areas are to form parameters of the innovative development program in the R & D stage. Industrial program is formed on the stage of experimental production and industrial development. The planning of the military-industrial complex enterprises innovative development is connected with the program of innovation development, this development of the program is restricted by parameters.

Keywords: innovative process, innovative project.

Инновационные проекты на предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК) реализуются в составе программ инновационного развития, решая задачи отдельных разделов программы по приоритетным направлениям развития предприятия.

Управление инновационным проектом – это методология организации, планирования, руководства и координации трудовых, финансовых и материально-технических ресурсов на протяжении проектного цикла, направленная на эффективное достижение его целей путем применения современных методов техники и технологии управления для достижения определенных результатов в проекте по составу и объему работ, стоимости, времени, качеству и удовлетворению участников проекта [1].

Состав задач управления инновационными проектами зависит от типа инновационного процесса и сферы управления. В связи с этим возникает необходимость исследования структуры стадий инновационного процесса (табл. 1).

Анализ результатов исследования позволяет сде-

лать вывод о том, что инновационный процесс может быть представлен четырьмя основными стадиями: фундаментальные и прикладные исследования, НИОКР, опытное производство, промышленное освоение. Увеличение числа стадий, предлагаемых разными исследователями, связано не с возникновением новых, а с необходимостью детализации указанных, что вызвано повышением их роли в осуществлении инновационной деятельности.

На стадии фундаментальных и прикладных исследований решаются три основные задачи: формирование программы инновационного развития, составление производственного графика, поиск источников финансирования. В рамках исследования эта стадия не рассматривается в связи с тем, что объектом исследования являются предприятия ОПК, в функции которых она не входит.

Для проведения дальнейших исследований авторами предлагается выделить три стадии инновационного процесса:

Таблица 1

Стадии инновационного процесса

Исследователи	Стадии инновационного процесса
Р. Норманн [2]	1. Инициация. 2. Реализация
Ф. А. фон Хайек [2]	1. Идея. 2. Реализация. 3. Социализация
Дж. Хэйдж, М. Эйкен [2]	1. Оценка. 2. Инициация. 3. Внедрение. 4. Рутинизация
С. Майерс, Д. Маргис [2]	1. Понимание проблемы. 2. Продуцирование идеи. 3. Процесс поиска решения проблемы. 4. Решение. 5. Внедрение и использование
А. Д. Макаров, А. В. Мосин [3]	1. Поисковые научно-исследовательские работы. 2. Прикладные научно-исследовательские работы. 3. Опытнo-конструкторские и проектно-конструкторские разработки. 4. Освоение производства новой продукции. 5. Коммерциализация инноваций
В. П. Меньшов [4]	1. Фундаментальные теоретические исследования. 2. Прикладные изыскания и проектно-конструкторские разработки. 3. Опытнo-конструкторские работы. 4. Разработка технологического процесса и его реализация при производстве новой продукции. 5. Подготовка к внедрению результатов разработок и обеспечение необходимых для этого условий. 6. Реализация новой продукции и ее практическое использование потребителями
И. Т. Балабанов [5]	1. Инициация. 2. Маркетинг инновации. 3. Выпуск (производство) инновации. 4. Реализация инновации. 5. Продвижение инновации. 6. Оценка экономической эффективности инновации. 7. Диффузия инновации
Г. Я. Гольдштейн [6]	1. Обзор рыночной ситуации. 2. Генерация идей. 3. Фильтрация идей. 4. Проверка концепции. 5. Экономический анализ. 6. Разработка и испытание продукта. 7. Пробный маркетинг. 8. Конечная реализация инновационного товара
Американские профессора Дж. Эванс и Б. Берман [7] рассматривают инновационный процесс с позиций стадий готовности нового продукта	1. Генерация инновации. 2. Оценка продукции. 3. Проверка концепции. 4. Экономический анализ. 5. Разработка продукции. 6. Пробный маркетинг. 7. Коммерческая реализация
Американцы Р. Хизрич и М. Петерс [8] считают, что инновационный процесс – это путь от выработки идеи до коммерческой реализации инновации на рынке (этот путь иногда называют процессом планирования новой продукции). Они выделяют пять этапов	1. Выбор идеи. 2. Концептуальная проработка. 3. Опытнo-конструкторская разработка. 4. Пробный выход на рынок. 5. Коммерческая реализация продукта
С. Д. Ильенкова [9]	ФИ – ПИ – Р – ПР – С – ОС – ПП – М – СБ, где ФИ – фундаментальные исследования; ПИ – прикладные исследования; Р – разработка; ПР – проектирование; С – строительство; ОС – освоение; ПП – промышленное производство; М – маркетинг; СБ – сбыт

1) НИОКР – на данном этапе разрабатывается опытный образец, создаются первоначальные условия конструкции для нового оборудования;

2) опытное производство – запускается в качестве эксперимента;

3) промышленное освоение – заключительная стадия инновационного процесса, на которой начинается запуск продукции в единичное или серийное производство.

Задачи управления для выявленных стадий инновационного процесса на предприятиях ОПК рассматриваются для шести сфер деятельности (НИОКР, производство, МТС, маркетинг, финансы, персонал), каждая из которых требует учета в реализации инновационных проектов. Сферы управления предприятий ОПК зависят от типа производимой продукции (гражданская, военная). В процессе изучения библиографических источников по управлению инновационными проектами И. Т. Балабанова, А. Д. Макарова, И. И. Мазура, А. А. Суриной были определены и систематизированы задачи инновационного планирования в зависимости от сферы деятельности предприятия и стадии инновационного процесса. В табл. 2 представлены результаты систематизации задач управления инновационными проектами по следующим признакам: уровень планирования, сфера деятельности, стадия инновационного процесса. Их анализ позволил сделать следующие выводы. Задачи, решаемые на разных уровнях стратегического, текущего и оперативно-календарного планирования, взаимосвязаны. Стадия НИОКР является определяющей в выборе стратегии инновационного развития, на которой формируется программа инновационного развития предприятия, определяется рынок сбыта, формы и способы финансирования. На уровне текущего планирования в сфере производства на стадиях опытного производства и промышленного освоения формируется производственная программа. Оперативно-календарное планирование осуществляется во всех сферах деятельности, обеспечивая соответствие установленным графикам производства продукции, своевременные закупки, финансирование и нормирование труда на стадии промышленного освоения.

Задачи, решаемые в сферах управления производством, материально-техническим снабжением, маркетингом, персоналом и финансами, формируют параметры программы инновационного развития промышленного предприятия ОПК на стадии НИОКР, а также условия и ограничения для производственной программы на стадиях опытного производства и промышленного освоения.

Таким образом, планирование инновационной деятельности на предприятиях ОПК связано с программой инновационного развития, реализация которой осуществляется с учетом ограничений в различных сферах деятельности.

Библиографические ссылки

1. Мазур И. И., Шапиро В. Д. Управление проектами. М. : Омега-Л, 2009. 960 с.

2. Электронная библиотека bookZ.ru [Электронный ресурс]. URL: http://bookz.ru/authors/sergei-agolkovskii/psiholog_194/page-15-psiholog_194.html.

3. Макаров А. Д., Мосин А. В. Основные этапы инновационного процесса и фазы жизненного цикла продукта (технологии) [Электронный ресурс]. URL: ftp://194.226.213.129/text/mosin_99_80_83.pdf.

4. Меньшов В. П. Стадии и модели инновационных процессов на промышленных предприятиях [Электронный ресурс]. URL: [http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99990193_West_econ_finans_2005_1\(7\)/54.pdf](http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99990193_West_econ_finans_2005_1(7)/54.pdf).

5. Балабанов И. Т. Инновационный менеджмент. СПб. : Питер, 2001. 304 с.

6. Гольдштейн Г. Я. Инновационный менеджмент. [Электронный ресурс]. Таганрог, 1998. URL: <http://www.aup.ru/books/m23/2.htm>.

7. Эванс Дж. Р., Берман Б. Маркетинг. М. : Экономика, 1993. 356 с.

8. Загашвили В. С., Хизрич Р., Питерс М. Предпринимательство, или Как завести собственное дело и добиться успеха. Вып. 3. Финансирование нового предприятия. М. : Прогресс, 1993. 192 с.

9. Ильенкова С. Д., Гохберг Л. М., Ягудин С. Ю. Инновационный менеджмент. 2 изд., перераб. и доп. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 343 с.

References

1. Mazur I. I., Shapiro V. D., *Upravlenie projektami* [Management of projects]. Moscow, Omega-L Publ., 2009. 960 p.

2. *Elektronnaya biblioteka bookZ.ru* [Electronic library bookZ.ru]. Available at: http://bookz.ru/authors/sergei-agolkovskii/psiholog_194/page-15-psiholog_194.html.

3. Makarov A. D., Mosin A. V. *Osnovnyye etapy innovatsionnogo protsesssa i fazy zhiznennogo tsikla produkta* [Main stages of the innovation process and product lifecycle phases]. Available at: ftp://194.226.213.129/text/mosin_99_80_83.pdf.

4. Menchov V. P. *Stadii i modeli innovatsionnykh protsessov na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Stages and models of innovative processes at the industrial enterprises]. Available at [http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99990193_West_econ_finans_2005_1\(7\)/54.pdf](http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99990193_West_econ_finans_2005_1(7)/54.pdf).

5. Balabanov I. T. *Innovatsionnyy menedzhment* [Innovation management]. St. Petersburg, Piter Publ., 2001. 304 p.

6. Goldstein G. Y. *Innovatsionnyy menedzhment* [Innovation management]. Available at: <http://www.aup.ru/books/m23/2.htm>.

7. Evans Dzh. R., Berman B. *Marketing*. Moscow, Ekonomika Publ., 1993. 356 p.

8. Hizrich R., Zagashvili V. S., Peters M. *Predprinimatel'stvo, ili Kak zavesti sobstvennoye delo i dobit'sya uspekha* [Entrepreneurship, or How to create your own business and succeed]. Moscow, Progress Publ., 1993. 192 p.

9. Il'yenkova S. D., Gokhberg L. M., Yagudin S. Yu. *Innovatsionnyy menedzhment* [Innovation management]. Moscow, UNITY-DANA Publ., 2003. 343 p.

УДК 338.45:623

СОСТОЯНИЕ РОССИЙСКОЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТЕНДЕНЦИИ ЕЁ РАЗВИТИЯ

Л. В. Ерыгина, Р. С. Сердюк

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: erigina@mail.sibsau.ru, dodgesrs@mail.ru

Череда неудач в ракетно-космической отрасли, являющейся одним из ключевых звеньев российского оборонного потенциала, свидетельствует о ряде накопившихся в ней проблем, требующих скорейшего решения. Значимость отрасли для эффективного инновационного развития промышленности России обусловила актуальность исследования. В настоящей работе проведён анализ современного состояния отрасли, рассмотрена динамика и структура финансирования отрасли за последние 20 лет, а также политика реформирования оборонно-промышленного комплекса. На основании исследования делается вывод о консервативном направлении развития отрасли, в то время как России требуется более инновационный путь. Определены факторы, позволившие ей преуспеть в последнее десятилетие по сравнению с уровнем 1990-х гг. Выявлены основные проблемы, преследующие ракетно-космическую промышленность (РКП) с момента перестройки.

Ключевые слова: космос, проблемы космонавтики, интеграционные системы, финансирование РКП, оборонно-промышленный комплекс.

GROWTH TRENDS OF RUSSIAN SPACE INDUSTRY

L. V. Erygina, R. S. Serdyuk

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: erigina@mail.sibsau.ru, dodgesrs@mail.ru

The series of failures in the space industry, which is one of Russian defense potential key elements, indicates a number of problems in it. The fact that the industry is significant for the effective development of the innovative industry in Russia is identified the relevance of the research. The article analyzes the dynamics and structure of industry funding over the last 20 years, the policy of reforming of the military-industrial complex, which has influenced the development of the industry. The dynamics of space launches and changes in Russian share of the market for launching spacecraft is shown in the article. On the basis of researches the importance of the conservative direction of the development of the industry in Russia is shown. The factors that allowed Russian Space Industry (RSI) to succeed in the last decade compared with the level of the 90s and the basic problems pursuing RSI since the 90s are determined.

Keywords: space, aerospace problem, integration systems, funding for Russian RSI, defense industry.

Оборонно-промышленный комплекс (ОПК) создаёт материальную основу обеспечения обороны государства и его безопасности, а также, аккумулируя передовые научно-технические достижения, определяет эффективность функционирования высокотехнологичных сфер экономики страны.

Обстоятельства сложились таким образом, что в начальный период перестройки уровень внимания к оборонно-промышленному комплексу значительно снизился. Геополитические изменения в мире, переориентация российских общественно-экономических отношений на рыночные привели к деструктивным процессам, которые поставили ОПК на грань выживания.

По современным оценкам, в СССР на двух тысячах предприятий оборонного назначения было занято свыше 5 млн человек, среди них научных сотрудников было около одного миллиона.

Спустя четверть века общая численность сотрудников организаций ОПК составляет лишь 2 млн человек, в том числе около 1,3 млн человек – в оборонных отраслях промышленности. На современном этапе в структуру ОПК входит большинство высокотехнологичных наукоёмких отраслей промышленности. Они являются основой научно-технического потенциала России и определяют ключевые направления научно-технического прогресса (см. рисунок).

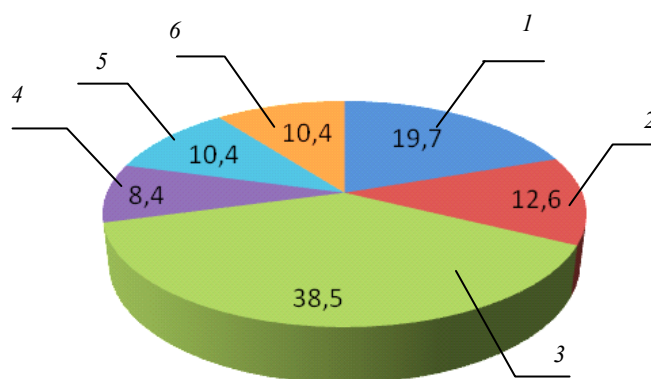
Несмотря на то, что ракетно-космическая промышленность в структуре ОПК составляет наименьшую долю, она является базовым элементом отечественного оборонного потенциала, отличается наукоёмкостью производственных процессов и высокотехнологичными изделиями. Она несёт в себе высокий инновационный потенциал, который может оказывать значительное влияние на оборонные возможности страны [1]. Развитие средств воздушно-космического нападения

иностранных государств показывает, что в ближайшее время произойдут серьёзные изменения, связанные с освоением воздушно-космического пространства, которое станет единой сферой воздушного противостояния. Изменяются качественные характеристики средств вооружённой борьбы, главенствующую роль приобретут военные действия в воздушно-космическом пространстве [2]. Именно поэтому актуальной является комплексная оценка состояния РКП. Богатейшие природные ресурсы, территориальный размах, большая протяжённость сухопутных, морских и воздушных границ определяют необходимость эффективного использования потенциала страны в области освоения космического пространства, основными

элементами которого являются: наземная космическая инфраструктура; орбитальная инфраструктура; ракетно-космическая промышленность; научные организации, проводящие исследования в области космической деятельности; образовательные учреждения и организации, осуществляющие подготовку специалистов для РКП.

Отметим, что состояние наземной и орбитальной инфраструктур зависит от уровня развития ракетно-космической промышленности, на которое, в свою очередь, оказывают влияние образовательные учреждения и научные организации, проводящие исследования в области космической деятельности.

Сводный реестр организаций ОПК (1353 организации), %



Структура ОПК по видам деятельности:

1 – авиационная; 2 – судостроительная; 3 – радиоэлектронный комплекс; 4 – ракетно-космическая; 5 – обычных вооружений; 6 – боеприпасов и спецхимии

В целом на фоне положительных мировых тенденций в освоении космоса, РКП России в 1990 г. находилась в кризисном состоянии. За 10 лет (1990–2000 гг.) финансирование космонавтики существенно сократилось по многим направлениям в 15–20 раз. К 2000 г. космическая группировка сократилась в 2–2,5 раза, при этом 84 % космических аппаратов (КА), работающих на орбитах, выработали свой ресурс. Основными негативными тенденциями в этот период явились: резкое снижение объёмов производства в рамках государственного оборонного заказа, резкое снижение объёмов инвестиций (во время раздела имущества космическая отрасль ввиду низкой рентабельности оказалась на втором плане), падение темпов обновления основных фондов практически до нуля, а также интенсивный отток из отрасли квалифицированного персонала. Это повлекло за собой подорожание разработок в области космических НИОКР, снижение качества и надёжности производимой техники и оборудования и утрату уникальных технологий. Единственным исключением стала программа коммерческих запусков, при реализации которой активно использовались снятые с вооружения и переоборудованные советские и российские межконтинентальные баллистические ракеты (такие, как сокращённые по

договору СНВ-1 системы «Днепр», «Зенит» и «Рокот»). Благодаря этой программе удавалось получать хоть какие-то доходы, позволившие в 1990-х гг. спасти российскую космическую отрасль от полного краха.

После 2000 г. положение в отечественной космонавтике стало стабилизироваться, увеличилось финансирование. В 2003 г. доля космических аппаратов, эксплуатирующихся в пределах гарантийных сроков, увеличилась до 40 % по сравнению с 16 % в 1999 г. Проводится запуск новых КА, к 2004 г. численность космической группировки возросла до 91 КА, из них 42 КА – оборонного назначения, 16 КА – двойного применения, 33 КА – научного и социально-экономического назначения.

Наибольший подъём отрасли произошёл в последние годы, в результате реализуемой в настоящее время стратегии развития ракетно-космической промышленности на период до 2015 г., а также стабильного повышения бюджетного финансирования. Так, в 2007 г. выделено денег из бюджета на развитие космоса почти в 6 раз больше, чем в 2001 г. (32 915 млн руб. против 5 690 млн руб.). В табл. 1 приведена динамика финансирования отрасли с 2007 г. по текущий момент.

Таблица 1

Динамика финансирования ФКП*

Год	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Общий бюджет, млрд руб.	32,91	44,01	95,56	85,92	95,43	139,23	167,62
ФЦП «Федеральная космическая программа «2006–2015», млрд руб.	24,40	30,67	58,22	67,03	75,29	104,48	128,33

*Источник: федеральные законы РФ о федеральных бюджетах за текущие даты.

Таблица 2

Финансирование отрасли из бюджетных источников, предусмотренное приложением № 4 к ФЦП «Федеральная космическая программа «2006–2015»*

Год	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Расходы на ФКП, финансируемые за счёт средств федерального бюджета, млрд руб.	24,3	31,1	58,6	67,5	76,2	105,5	134,5

*Источник: приложение № 4 к ФКП.

Как мы можем видеть, затраты по федеральной целевой программе (ФЦП) «Федеральная космическая программа «2006–2015» (ФКП) планомерно увеличиваются в среднем на 20–30 % к расходам предыдущего года. Отметим, что такое нарастание оправданно: в период развёртывания программы и увеличения объёма работ (2007–2008 гг.) и ближе к завершению (2012–2013 гг.) происходит всплеск затрат.

Настораживающим является недофинансирование из федерального бюджета расходов на реализацию ФКП. Сравним уровень фактически затраченных бюджетных средств вплоть до 2012 г. с уровнем финансирования, предусмотренного приложением № 4 к ФКП (табл. 2) [3].

Суммарное недофинансирование по программе с 2006 по 2012 гг. составляет 3,3 млрд руб. Если включить сюда утверждённый бюджет на 2013 г. (сумма затрат на ФКП 128,3 млрд руб.), то общее количество недоинвестированных средств составит уже 8 млрд руб.

Если сравнить финансирование отрасли с аналогичными вложениями в других странах, то можно сделать неутешительный вывод о том, что Россия находится на 4 месте в мире по уровню выделения средств на гражданские космические программы и отстаёт от лидера (США) более чем в 5 раз. К слову о гражданских космических программах, в структуре финансирования ФКП наибольший удельный вес занимает пилотируемое направление, на которое в разные годы выделялось до 60 % общего бюджета ФКП, что привело к недофинансированию научных исследований и создания новых прорывных технологий [3; 4].

На развитие РКП, кроме увеличения бюджета, существенное влияние оказала государственная политика реформирования ОПК, в частности, ФЦП «Развитие оборонно-промышленного комплекса РФ на 2007–2010 гг. и на период до 2015 г.», в результате которой механизмы внутренней оптимизации, поддержания и развития основных фондов предприятий осуществляются путём формирования интегрированных структур – крупных корпораций, в которых объединены предприятия, связанные единой направленно-

стью деятельности и отношениями собственности [5]. Целью формирования интегрированных структур (ИС) в отрасли является создание рациональной функционально-организационной производственной структуры РКП, соответствующей направлениям государственной оборонной политики, конъюнктуре внутреннего и мирового рынков ракетно-космической техники. В свою очередь, это определило основные задачи в области развития интегрированных структур:

- внедрение новых технологий, современных форм и методов организации труда, производства продукции военного, двойного и гражданского назначения;
- эффективное использование государственной собственности;
- совершенствование системы корпоративного управления.

В соответствии с федеральной космической программой, в РКП создаются интегрированные структуры двух типов:

- вертикально интегрированные, в состав которых входят компании-разработчики и изготовители конечной продукции, объединяющие часть собственной кооперации, необходимой для производства и выпуска продукции; в результате кооперации данные предприятия получают возможность более эффективно действовать на мировом космическом рынке;
- интеграция по горизонтальному признаку технологически однородных предприятий; по сути это объединение предприятий-поставщиков для корпораций, выпускающих финальную продукцию [5].

Создание интегрированных структур должно полностью решить государственные задачи по разработке и производству космической техники.

Благодаря усилиям правительства по восстановлению РКП отрасль по состоянию на конец 2012 г. насчитывает 102 предприятия (50 федеральных государственных унитарных предприятия (ФГУП), 1 федеральное казенное предприятие, 1 федеральное государственное бюджетное учреждение и 50 акционерных обществ – ОАО и ЗАО). Научно-производственный потенциал РКП составляют 22 промышленных пред-

приятия, 59 научно-производственных объединений, центров, НИИ, КБ. Предприятия РКП размещены в шести федеральных округах России, наибольшая их часть сосредоточена в Центральном федеральном округе. Государство имеет доли участия в 37 акционерных обществах, обладая в 10-ти – 100 % акций, в 4-х – от 50 до 99 %, в 17-ти – от 25 до 50 %, в 6-ти – менее 25 %. По сравнению с 2011 г. значительно выросло количество ФГУП (рост составил 51,5 %), в то же время сократилось число ОАО и ЗАО в отрасли – на 10,7 % [2]. В РКП сформированы и функционируют 15 интегрированных структур, на которых занято более 70 % персонала отрасли.

Орбитальная группировка на конец 2012 г. насчитывает 75 спутников гражданского назначения и более 40 – военного. Значительно увеличилось и количество пусков отечественных ракет-носителей по отношению к допрограммному времени [4] (табл. 3).

В момент разворачивания ФКП и постепенного увеличения финансирования нарастает количество пусков (в 2006–2008 гг.). Пик произошёл в период с 2009 по 2011 гг., в основном за счёт увеличения запусков, осуществлённых по национальной программе. Можно сказать, что Россия постепенно избавляется от статуса «космического извозчика», однако отметим и то, что в процессе реализации ФКП из года в год доля России в космических запусках постепенно уменьшалась, начиная с 48 % и заканчивая 30 % в 2012 г., когда после практически стабильного ежегодного роста, который наблюдался в предыдущие семь лет, произошло первое снижение количества запусков на целых 25 % по отношению к прошлому году. Снижение запусков обусловлено снижением спроса со стороны иностранных заказчиков как в силу особенностей их космических программ, так и в силу увеличения ими запусков собственных ракет-носителей. Подчеркнем и экспансию Китая, стремительными темпами набирающего обороты по покорению космического пространства и стремящегося потеснить Россию на мировом рынке космических услуг.

Несмотря на все эти достижения, неутешительным остаётся тот факт, что с момента развёртывания ФКП увеличилось количество аварий и нештатных ситуаций. Особенно это заметно в последние 3 года, во время которых произошло 7 аварийных пусков. 3 июля 2013 г. произошёл очередной конфуз – ракета «Протон-М», несущая на борту 3 спутника ГЛОНАСС, рухнула практически сразу после взлёта. В январе этого же года в связи с нештатной отработкой разгонного блока «Бриз-

М» ракета-носитель «Рокот» не смогла вывести на орбиту три спутника связи Министерства обороны. А если дополнительно изучить статистику запусков, то увидим следующее: с 2008 г. аварии потерпели всего 4 «Протона» и один «Рокот» (легкая ракета производства НПП им. Хруничева). Правда, все пять – из-за разгонных блоков «Двина-ДМ» и «Бриз-М» производства того же самого НПП. Самая надёжная некогда ракета-носитель регулярно подводит, странно после этого задаваться вопросом, почему спрос на услуги российских носителей падает. На смену «Протонам» должна была прийти новая высокотехнологичная ракета «Ангара», контракт на изготовление которой Министерством обороны был заключён ещё в 1992 г. «Ангара» должна стать первой ракетой, разработанной и построенной в России после эпохи СССР, её отличительными характеристиками являются большая мощность, универсальность и высокая экологичность. Изначально испытания были назначены на 2001 г., потом были перенесены на 2003 г. Затем первый запуск был назначен на 2010 г., далее его отложили на 2011 г. В итоге ракету обещают запустить в космос «гарантированно» в 2014 г.

Ситуация с «Ангарой» не единственная. Количество новых разработок, вводимых в эксплуатацию, в аэрокосмической промышленности продолжает уменьшаться. Так, в 2010 г. доля проектов, относящихся к области космических технологий, в общем объеме новых инновационных разработок составляла всего 3–4 % против 7 % в 2005 г. Для сравнения, доля инновационных проектов в сфере информационных технологий равнялась 24 %, а в сфере энергосберегающих технологий – 22 % [6].

Потери многообещающих, дорогостоящих аппаратов, изменения в сроках запусков – эти проблемы не помогают решить ни кадровые перестановки, ни увеличение финансирования. Ряд неудач ракетно-космической отрасли побудил Правительство Российской Федерации взяться за ее реформирование, выработку для этого организационных, кадровых, технических и иных мер. Президент РФ поручил в III квартале 2013 г. разработать предложения по структурированию системы управления ракетно-космической отраслью. Согласно распоряжению Президента РФ от 26 июня 2013 г., займется этим специально созданная одноименная комиссия.

Очевидно, что объединения предприятий в ИС и растущего бюджета недостаточно, необходимо комплексно воздействовать на причины технологического отставания.

Таблица 3

Число запусков ракет-носителей за период с 2001–2012 гг.*

Год	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Количество пусков	23	24	21	22	26	25	26	27	32	31	32	24
Число запусков, несущих российские спутники	20	11	8	12	10	8	9	14	13	15	22	17
Число неудачных пусков	0	2	0	1	3	2	1	1	1	1	4	1

*Источник: специализированные сайты Интернета (www.roskosmos.ru, www.militaryparitet.com).

В ходе исследования были выявлены факторы, которые оказывают существенное влияние на развитие отечественного космоса: состояние основных производственных фондов, состояние кадрового состава отрасли, система государственного управления и ситуация на рынке аэрокосмических услуг.

От состояния основных производственных фондов непосредственно зависят качество и количество выпускаемых продуктов в любой промышленности. Объективно известно, что предприятия РКП до сих пор в своей работе используют в основном базовый потенциал, заложенный ещё до 1992 г. [7]. Это касается как зданий и сооружений, так и производственного оборудования. В условиях конверсии оборонных мощностей и избыточности производственного потенциала в части разработки и производства продукции РКП до 2003 г. инвестиционный процесс по обновлению основных фондов был практически приостановлен. Катастрофически медленный процесс обновления фондов привёл к тому, что на текущий момент доля активной части фондов возрастом до 10 лет составляет менее 5 %.

Следующим фактором, от которого зависит производственный и научный потенциал отрасли, является состояние кадрового состава. Обратим внимание на следующее: средний возраст всех сотрудников ракетно-космической промышленности составляет 44 г., представителей руководства – более 50 лет, работников профильных научных организаций – около 64 лет. Это говорит о том, что в отрасли сложилась ситуация с дефицитом опытных специалистов среднего возраста. Квалифицированные сотрудники, имеющие практический опыт внедрения разрабатываемых образцов и технологий в стадию промышленного производства, либо переходят в коммерческий сектор, либо выходят на пенсию. В итоге их знания практически не передаются последующему поколению. Космос сегодня не очень интересует и молодых учёных и специалистов. По данным опроса НАИРИТ, из общего числа выпускников 10 ведущих московских профильных вузов менее 1 % выразили желание работать в космической отрасли [6]. Отчасти все это связано с невысокими заработными платами, отчасти – с подорванным престижем аэрокосмических специальностей.

Сильное влияние на результативность ФКП оказывает система государственного управления космической деятельностью. Сейчас основным органом, который устанавливает цели по развитию отечественного космоса, является Федеральное космическое агентство, оно же и несет ответственность за их достижение. Результатом явился выбор консервативного пути развития, что видно из структуры затрат на ФКП. Интересам отечественной космонавтики более соответствует инновационное развитие, направленное не только на расширение российской доли рынка пусковых услуг, но и на проведение различных исследований, создание ноу-хау в области космонавтики, наращивание орбитальной группировки исследовательских спутников.

Сохранение существующего положения в российской космонавтике определит ее постепенное вытеснение с международной арены более энергичными

конкурентами и, в конечном счете, создаст предпосылки к импорту космической продукции и услуг. Перечисленные выше факторы неоднородны и не на все из них можно воздействовать, чтобы изменить ситуацию к лучшему. Необходимо проводить дополнительные исследования по систематизации факторов, поиску инструментов, позволяющих снизить их влияние на развитие отрасли.

Библиографические ссылки

1. Сенкевич В. П. Современное общество и космонавтика // *Земля и Вселенная*. 2003. № 4. С. 3–15.
2. Зелин А. Н. Состояние воздушно-космической обороны РФ критическое – главноком ВВС. [Электронный ресурс]. URL: <http://ria.ru/society/20080119/97338791.html> (дата обращения: 17.07.2013).
3. Федеральная космическая программа России на 2006–2015 гг., утвержденная Постановлением Правительства РФ от 22 октября 2005 г. № 635 (с Приложениями 1–4). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pandia.ru/text/77/132/456.php>.
4. Роскосмос [Электронный ресурс]. URL: <http://federalspace.ru> (дата обращения: 10.07.2013).
5. Макаров Ю. Н., Хрусталев Е. Ю. Финансово-экономический анализ ракетно-космической промышленности России // *Аудит и финансовый анализ*. 2010. № 2. С. 145–155.
6. Ускова О. А. Российские выпускники не хотят работать в космической отрасли // *Российская бизнес-газета*. 2010. № 795 (13). С. 43.
7. Ерыгин Ю. В., Цветных А. В. Инструменты стратегического планирования инновационного развития предприятий ОПК / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. 2009. С. 172.

References

1. Senkevich V. P. *Zemlja i Vselennaja*, 2003, no. 4, p. 3–15.
2. Zelin A. N. *Sostojanie vozdušno-kosmicheskoj oborony RF kritičeskoe – glavkom VVS* [State aerospace defense critical RF – Air Force Commander]. Available at: <http://ria.ru/society/20080119/97338791.html> (accessed 17 July 2013).
3. *Federal'naja kosmicheskaja programma Rossii na 2006–2015 gody* (Federal Space Program of Russia 2006–2015). Available at: <http://www.pandia.ru/text/77/132/456.php>.
4. Roskosmos, *Official site*. Available at: <http://federalspace.ru> (access 10 July 2013).
5. Makarov Ju. N., Hrustalev E. Ju. *Audit and Financial Analysis*. 2010, no. 2, p. 145–155.
6. Uskova O. A. [Russian graduates do not want to work in the space industry]. *Russian business Newspaper*, 2010, no. 795 (13), p. 43.
7. Erygin Ju. V., Cvetnyh A. V. *Instrumenty strategičeskogo planirovanija innovacionnogo razvitiya predpriyatij OPK* (Strategic planning tools innovative development of facilities of Defense Industry), Krasnoyarsk, Siberian aerospace university, 2009, p. 172.

© Ерыгина Л. В., Сердюк Р. С., 2014

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ПОКАЗАТЕЛИ И МЕТОДЫ

Н. О. Макаренко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: aaa@mail.sibsau.ru

Рассматривается необходимость воспроизводства инновационного потенциала предприятий ракетно-космической промышленности. Выделены наиболее существенные типы инноваций, присущие предприятиям отрасли, с целью определения места и роли каждой из них в процессе планирования инновационных стратегий развития промышленных предприятий. Описана разнокомпонентная структура инновационного потенциала, ключевыми составляющими которого являются трудовой, научно-технический и маркетинговый потенциалы. Предлагаются инструменты оценки инновационного потенциала, а именно, матрицы стратегического анализа инновационных проектов, основанных на учете выделенных типов инноваций с целью их диффузии, реализации и коммерциализации для воспроизводства инновационного потенциала предприятий РКП.

Ключевые слова: инновации, инновационный потенциал, воспроизводство, ракетно-космическая промышленность.

STRATEGIC PLANNING OF INNOVATIVE DEVELOPMENT THE ENTERPRISES OF SRI: INDICATORS AND METHODS

N. O. Makarenko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: aaa@sibsau.ru

In this article the necessity of the innovative capacity reproduction of the space-rocket industry enterprises is considered. The most essential types of innovations present in the enterprises of the branch for the purpose of the definition of a place and role of each of them in the course of innovative strategic planning of the industrial enterprise development are identified. A different structure of the innovative potential which key components are labor, scientific and technical and marketing potentials is described. There are tools of an assessment of innovative potential, namely matrix of the strategic analysis of the innovative projects based on the accounting of allocated types of innovations for the purpose of their diffusion, realization and commercialization for reproduction of innovative capacity of the CSR enterprises.

Keywords: innovations, innovative potential, reproduction, space-rocket industry.

В современный период быстрого технологического развития инновации являются главной движущей силой динамического роста общества. Форсированное и масштабное производство новых технологий приводит к тому, что экономическое развитие предприятия все больше определяется той долей продукции, оборудования и технологией, которая содержит прогрессивные наукоемкие знания. Несмотря на трудности экономического развития страны последних 20 лет, ракетно-космическая промышленность (РКП) в числе немногих отраслей промышленности продолжает оставаться по многим позициям конкурентоспособной на мировом уровне, что дает основание рассматривать ее как реальную базу для развития инновационных проектов национального масштаба [1].

На сегодняшний день происходит рост промышленного производства. Правительством России была принята Государственная программа вооружений на период 2011–2020 гг. [2], и РКП стоит перед серьезными задачами дальнейшего инновационного развития и реформирования.

Для создания стабильного экономического роста предприятиям РКП необходимо эффективно использовать накопленный в отрасли инновационный потенциал. Отличительной особенностью такого развития является воспроизводство инновационного потенциала путем коммерциализации военных разработок в продукцию гражданского назначения.

С учетом особенностей развития важной задачей является определение типов инноваций, присущих предприятиям РКП, для того чтобы четко определить место и роль каждой инновации в процессе планирования инновационных стратегий. Наиболее существенные типы инноваций выделены по следующим классификационным признакам: по назначению, по глубине вносимых изменений, по характеру, по распространенности и степени конкурентоспособности (табл. 1).

Основополагающим типом инноваций предприятий РКП являются военные инновации, продуктового и технологического характера, обладающие радикальными или улучшающими свойствами. Возможность диффузии этих инноваций с точки зрения воспроиз-

водства инновационного потенциала предприятий РКП определяет развитие особого вида инноваций, таких как подрывные и поддерживающие. Подрывные – это инновации, меняющие привычный способ использования продуктов, оказания услуг, поддерживающие – обеспечивающие совершенствование существующих продуктов, технологий [3]. Тем самым, инновационный потенциал предприятий РКП необходимо реализовывать и коммерциализировать на потребительских рынках, создавая новые потребности и новые рынки, что обеспечит устойчивое воспроизводство инновационного потенциала. Таким образом, очевидна важность осуществления подрывных и поддерживающих инноваций для предприятий РКП.

Таблица 1
Классификация инноваций предприятий РКП

Признак классификации	Классификационные группировки инноваций
По назначению	Военные, гражданские
По глубине вносимых изменений	Радикальные, улучшающие
По характеру	Продуктовые, технологические
По распространенности	Единичные, диффузные
По степени конкурентоспособности	Подрывные, поддерживающие

Важной особенностью инновационного потенциала является его разнокомпонентная структура для внедрения выделенных типов инноваций. Общепринятыми составляющими инновационного потенциала являются трудовой, научно-технический, маркетинговый потенциалы, которые в совокупности составляют интеллектуальный потенциал предприятия, а также производственный, сырьевой, экологический, финансовый и организационно-управленческий потенциалы. С точки зрения воспроизводства иннова-

ционного потенциала именно интеллектуальный потенциал главным образом влияет на разработку и коммерциализацию подрывных и поддерживающих инноваций. В связи с этим предлагается следующая система показателей оценки интеллектуального потенциала (табл. 2).

Однако разработанная система оценки интеллектуального потенциала является недостаточным инструментом для планирования инновационной деятельности предприятий РКП. С учетом отраслевых особенностей и многообразия факторов, определяющих дальнейшую стратегию инновационного развития предприятий отрасли в рамках конверсионного производства, необходимым является разработка методических подходов с учетом факторов, сдерживающих продвижение инноваций на потребительский рынок. А именно, необходимо провести параллели между состоянием интеллектуального потенциала и способностью предприятия осуществлять диффузию инноваций, их реализовывать и коммерциализировать. В связи с этим возникает необходимость в разработке специальных матриц стратегического анализа инновационных проектов, основанных на учете особенностей разработки подрывных и поддерживающих инноваций с целью их диффузии, реализации и коммерциализации для воспроизводства инновационного потенциала предприятий РКП (см. рисунок).

Данная матрица в совокупности работает с такими матрицами, как матрица «научно-технический потенциал – реализуемость инноваций» и «маркетинговый потенциал – коммерциализация инноваций».

Показатели, характеризующие диффузию, реализуемость и коммерциализацию инноваций, а также уровни выделенных элементов представлены в табл. 3.

На основе предложенных матриц описываются состояния предприятия в рамках каждого отдельного квадранта матриц, а также возможные стратегии инновационного развития предприятий РКП (табл. 4).

Диффузия инноваций	Высокая	II	III
	Низкая	I	IV
		Низкий	Высокий
		Трудовой потенциал	

Пример матрицы «трудовой потенциал – диффузия инноваций»

Таблица 2

Показатели оценки интеллектуального потенциала предприятий РКП

№ п/п	Составляющие интеллектуального потенциала	Показатели, определяющие потенциал	Формула расчета	Уровень		Примечание
				Высокий	Низкий	
1	Трудовой потенциал	Обеспеченность предприятия персоналом	$O_{nij} = \frac{\chi_{nij}}{\chi_{\phi ij}} \rightarrow 1$	≤ 1	> 1	где χ_{nij} – плановая численность работающих i категории (профессии), j уровня квалификации, чел.; $\chi_{\phi ij}$ – фактическая численность работающих i категории (профессии), j уровня квалификации, чел.
		Обеспеченность предприятия интеллектуальными трудовыми ресурсами	$O_{\text{инт}} = \frac{\chi_{\text{НИОКР}}}{\chi_{\text{общ}}} \cdot 100 \%$	$\geq 60 \%$	$< 60 \%$	С учетом особенностей РКП трудовые ресурсы в сфере НИОКР должны составлять не менее 60 % относительно всего количества производственного персонала
		Уровень квалификации персонала	$Y_{\text{кв}i} = \frac{\text{Тр}_{\phi i}}{\text{Тр}_{\text{п}i}}$	≥ 7	< 7	где $\text{Тр}_{\phi i}$ – фактический средний тарифный разряд i категории (профессии); $\text{Тр}_{\text{п}i}$ – плановый средний тарифный разряд i категории (профессии)
		Средний возраст персонала	$N_{\text{ср}} = \frac{\sum \chi \cdot N}{\chi_{\text{общ}}}$	> 35 < 45	≥ 45	где χ – численность работников, чел.; N – возраст работников, лет
		Соответствие фактического среднего возраста работающих условно допустимому	$B_{cij} = \frac{B_{\phi ij}}{B_{\phi ij}} \rightarrow 1$	1	< 1	где $B_{\phi ij}$ – условно допустимый средний возраст работающих, лет; $B_{\phi ij}$ – фактический средний возраст работающих, лет
		Общий объем НИОКР на одного работника	$P = \frac{V_{\text{НИОКР}}}{\chi_{\text{НИОКР}}}$			где $V_{\text{НИОКР}}$ – общий объем НИОКР, ед.; $\chi_{\text{НИОКР}}$ – численность работников НИОКР, чел.
2	Научно-технический потенциал	Коэффициент имущества, связанного с технологическими инновациями	$F_i = \frac{\sum_{j=1}^4 f_j k_j}{F}$	$\geq 0,25$	$< 0,25$	где f_i – стоимость имущества, связанного с технологическими инновациями, руб.; F – стоимость всего имущества производственного назначения, руб.; k_i – коэффициент уровня новизны нововведения; j – номер типа инновации; $0 < k_i \leq 0,9$ – уровень новизны поддерживающих инноваций; $0,9 < k_i \leq 1$ – уровень новизны подрывных инноваций
		Коэффициент инноваций в технологическом обеспечении предприятия	$T_i = \frac{\sum_{j=1}^4 t_j k_j}{T}$	$\geq 0,25$	$< 0,25$	где t_i – стоимость инноваций, связанных с техническим обеспечением, руб.; T – общая стоимость технологий предприятия, руб.

№ п/п	Составляющие интеллектуального потенциала	Показатели, определяющие потенциал	Формула расчета	Уровень		Примечание
				Высокий	Низкий	
		Коэффициент обеспеченности интеллектуальной собственностью	$L_i = \frac{\sum_{j=1}^4 l_j k_j}{L}$	$\geq 0,10$	$< 0,10$	где l_i – стоимость патентов (лицензий), относящихся к продукции (работ, услуг), руб.; L – общая стоимость видов продукции (работ, услуг), произведенных предприятием, руб.
		Коэффициент освоения новой техники	$R_i = \frac{\sum_{j=1}^4 r_j k_j}{R}$	$\geq 0,35$	$< 0,35$	где r_i – стоимость вновь введенной техники, оборудования, руб.; R – общая стоимость основных производственных фондов предприятия, руб.
3	Маркетинговый потенциал	Коэффициент рыночной доли с учетом степени концентрации рынка (индекс Герфиндаля – Гиршмана) [4]	$HHI = \sum si_i^2$	$\rightarrow 1$	$\rightarrow 0$	где si – доля рынка i -й фирмы; наибольшее значение, которое может принять H , равно 1, и приближается к нему по мере того, как доля рынка крупнейшей фирмы стремится к 1, а доля рынка остальных фирм стремится к 0; следовательно, H увеличивается по мере роста концентрации
			$K_{РД} = \frac{V_{пред}}{V_{общ}}$	$\geq 0,3$	$< 0,3$	где $V_{пред}$ – объем продаж продукта предприятия, руб.; $V_{общ}$ – общий объем продаж продукта на рынке, руб.
		Коэффициент доли экспорта в объеме продаж	$K_{экс} = \frac{V_{экс}}{V_{общ}}$	$\geq 0,4$	$< 0,4$	где $V_{экс}$ – объем экспорта предприятия, руб.; $V_{общ}$ – общий объем продаж продукта на предприятии, руб.
		Коэффициент уровня цен	$K_{ц} = \frac{\Pi_{max} + \Pi_{min}}{2\Pi_{пред}}$	≤ 1	> 1	где Π_{max} – максимальная цена товара на рынке, руб.; Π_{min} – минимальная цена товара на рынке, руб.; $\Pi_{пред}$ – цена товара, установленная фирмой, руб.; показывает рост или снижение конкурентоспособности фирмы за счет динамики цен на продукт
		Сбытовые возможности	$\Delta\Pi_{сб} = 3_{сб.пр} - 3_{сб.ин} = \frac{(V_{пр.пр} - V_{пр.ин}) K_{расх.ин}}{V_{пр.ин}}$	≥ 0	< 0	где $3_{сб.пр}$ – сбытовые затраты на ед. продукции по предприятию до реализации инновации, руб.; $3_{сб.ин}$ – сбытовые затраты на ед. продукции по предприятию после реализации инновации, руб.; $V_{пр.пр}$ – объем продаж предприятия до реализации инновации, руб.; $V_{пр.ин}$ – объем продаж предприятия после реализации инновации, руб.; $K_{расх.ин}$ – коммерческие расходы, руб.

Таблица 3

Показатели оценки уровня диффузии, реализации и коммерциализации инноваций [5]

Показатели	Примечание
Диффузия инноваций	Прирост доходов за счет дополнительного расширения областей использования инновации
	Прирост доходов за счет дополнительного использования производственного оборудования
	Прирост доходов после продажи лицензии
	Прирост доходов после внешнего патентования и расширения региона продаж инновации
Реализуемость инноваций	Коэффициент соотношения собственных и заемных средств
	Показатель реализуемости инновации в целом по совокупной группе факторов
Коммерциализация инноваций	Расширение сегментов рынка
	Стратегическое партнерство

Таблица 4

Возможные стратегии инновационного развития предприятий РКП

№ квадранта	I	II	III	IV
Матрица «трудовой потенциал – диффузия инновации»	Низкий уровень трудового потенциала и низкий уровень диффузии инновации	Низкий уровень трудового потенциала. При этом высокий уровень диффузии инновации	Высокая степень инвестиционной привлекательности и высокий уровень технологического уклада	Низкая диффузионность инноваций, высокий трудовой потенциал предприятия
Возможные стратегии	Уход в другую сферу деятельности	Кооперация Продажа инноваций	Наступательная стратегия, основанная на целой серии подрывных инноваций	Разработка поддерживающих инноваций, пользующихся спросом Покупка технологий для создания подрывной инновации
Матрица «научно-технический потенциал – реализуемость инновации»	Низкий научно-технический потенциал и нет ресурсов для реализации подрывных и поддерживающих инноваций	Низкий научно-технический потенциал, но при этом уровень производственных ресурсов достаточен для реализации инноваций	Высокий научно-технический потенциал и достаточное количество ресурсов для освоения и коммерциализации инноваций	Высокий уровень научно-технического потенциала предприятия, но отсутствуют ресурсы для реализации инноваций
Возможные стратегии	Увеличение ресурсной базы для реализации поддерживающих инноваций, пользующихся спросом на рынке	Разработка поддерживающих инноваций, обладающих спросом Покупка технологий для создания подрывной инновации	Разработка подрывных инноваций и долговременное пребывание предприятия на лидирующих позициях поддерживающих инноваций	Поиск инвесторов для реализации подрывных и поддерживающих инноваций Рассмотреть варианты кооперации Продажа лицензии, патента
Матрица «маркетинговый потенциал – коммерциализация инноваций»	Низкий маркетинговый потенциал и низкий уровень коммерциализации инноваций	Высокий уровень коммерциализации инноваций Низкий маркетинговый потенциал создает риски слабой рыночной отдачи	Высокий маркетинговый потенциал и высокий уровень коммерциализации инноваций	Низкие возможности для коммерциализации инновации, высокий маркетинговый потенциал
Возможные стратегии	Продажи лицензии на использование изобретения	Стратегическое партнерство с предприятием, имеющим узнаваемый торговый знак и дилерские сети	Радикальное опережение	Создание поддерживающих инноваций, пользующихся спросом Варианты кооперации Поиск альтернативных технологий, возможна смена сферы деятельности

Библиографические ссылки

References

1. Белоусов В. Л. Анализ конкурентоспособности фирмы [Электронный ресурс] // Маркетинг в России и за рубежом. 2001. № 5. URL: <http://mavriz.ru/articles/2001/5/37.html>.

2. Российская государственная программа развития вооружений на 2011–2020 гг. [Электронный ресурс] // Википедия – Свободная энциклопедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Российская_государственная_программа_развития_вооружений_на_2011-2020_годы.

3. Кристенсен К. М., Рейнор М. Е. Решение проблемы инноваций в бизнесе. Как создать растущий бизнес и успешно поддержать его рост : пер. с англ. М. : Альпина Бизнес Букс, 2004. 290 с.

4. Индекс Херфиндаля [Электронный ресурс] // Википедия – Свободная энциклопедия. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Индекс_Херфиндаля.

5. Трифилова А. А. Управление инновационным развитием предприятия. М. : Финансы и статистика, 2003. 176 с.

1. Belousov V. L. *Analiz konkurentosposobnosti* (Competitiveness analysis). *Marketing in Russia and abroad*. Available at: www.mavriz.ru/articles/2001/5/37.html.

2. *Rossiyskaya gosudarstvennaya programma razvitiya vooruzheniy na 2011–2020 godi* (The Russian state program of development the arms for 2011–2020). Available at: www.ru.wikipedia.org/wiki/rossiyskaya_gosudarstvennaya_programma_razvitiya_vooruzheniy_na_2011-2020_godi (accessed 29 July 2013).

3. Kristensen Kleyton M., Maykl Reynor Ye. *Reshenie problemi innovatsiy v biznese. Kak sozdat rastucshiy biznes i uspeshno poddergat ego rost* [Solution of innovation's problem in business. How to create growing business and successfully to support its growth]. Moscow, 2004. 290 p.

4. *Indeks Herfindalya* (Index Herfindalya). Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Indeks_Herfindalya (accessed 8 April 2011).

5. Trifilova A. A. *Upravlenie innovacionnim razvitiem predpriyatiya* (Management of innovative development of the enterprise). Moscow, 2003. 176 p.

© Макаренко Н. О., 2014

УДК 658.7:339.9

СБАЛАНСИРОВАННАЯ ПОДСИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЗВРАТНОЙ ЛОГИСТИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А. В. Селиванов¹, Д. А. Прокопович¹, И. И. Вашлаев²

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Институт химии и химической технологии СО РАН,
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 24
E-mail: imanselivan@gmail.com

Предлагается классифицировать возвратные материальные ресурсы с целью их повторного использования в производственной системе предприятия. Определён критерий перехода на работу с вторичным сырьём (отходами). Введена, для ООО «Машизавод», система технико-экономических показателей возникновения и переработки промышленных отходов, которая согласовывается с общепринятой на предприятии сбалансированной системой показателей. Для мотивации участников логистической системы используется разработанная методика расчёта индивидуального рейтинга, который присваивается любому работнику в динамике по месячным периодам или за определенный отрезок времени как средневзвешенная величина. Предлагается выстраивать целостную систему из локальных контуров, относящихся к разным уровням управления, что позволяет обеспечивать необходимое и достаточное качество принимаемых логистических решений.

Ключевые слова: возвратные отходы, классификация отходов, контурное управление возвратной логистикой, индивидуальный рейтинг.

THE BALANCED SUBSYSTEM OF INDICATORS OF RETURNABLE LOGISTICS OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE

A. A. Selivanov¹, D. A. Prokopovich¹, I. I. Vashlayev²

¹Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

²Institute of Chemistry and Chemical Technology RAS (Sib. Div.)
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
E-mail: imanselivan@gmail.com

It is offered to classify returnable material resources for the purpose of their reuse in industrial system of the enterprise. The criterion of transition to work with secondary raw materials (waste) is defined. It is entered, for Open Company "Machine works", system of technical and economic indicators of occurrence and processing of industrial wastes which is coordinated with the balanced system of indicators standard at the enterprise. For motivation of the participants of the logistical system the developed procedure of a personal rating which is appropriate for any worker in dynamics on the monthly periods or for a certain interval of time as the average size is used. It is offered to build a complete system from the local contours concerning different levels of management that allows providing necessary and sufficient quality of accepted logistical decisions. The decision of the described problems should be made in a local contour of the reverse logistics management.

Keywords: returnable wastes, classification of a waste, reverse logistics management, personal a rating.

Процесс движения вторичных материальных ресурсов исследуется от мест их образования, временного хранения, подготовки к использованию и до производственного потребления – изготовления новой продукции. Деятельность по обращению с отходами можно представить в виде последовательного дискретного процесса, состоящего из технологических операций по их превращению в пригодное сырьё для повторно-использования [1].

Основой использования вторичных материальных ресурсов является их потенциальная способность заменять первичные ресурсы в обороте сырья. То, что вторичные ресурсы имеют материальную ценность, предопределяет их полезность. Как и для любого товара, полезность вторичных ресурсов субъективна, а поэтому разнообразна. Следовательно, все направления коммерции и логистики вторичных ресурсов обусловлены их полезностью, экономикой и экологичностью [1; 2].

Установлено, что процесс образования отходов на предприятиях по производству металлоконструкций не отслеживается и не сопровождается необходимой документацией, не формируются их базы данных. Из-за этого возникает проблема учета имеющихся и уже использованных отходов, и, соответственно, возникает проблема с регулированием потоков вторичных ресурсов. Для устранения этой проблемы необходимо обеспечить решение ряда задач:

- классифицировать отходы по признакам;
- определить место размещения склада возвратных ресурсов;
- обосновать условия хранения (отслеживать соблюдение условий и сроков хранения);
- обеспечить экономичный раскрой материалов (использовать программные продукты, обеспечивающие эти возможности не только для одного заказа (проекта));

- систематизировать маршруты движения отходов;
- автоматизировать документооборот возвратной логистики;
- подобрать технологию утилизации отходов (повторное использование в новых проектах или продажа невостребованных отходов);
- разработать систему показателей движения возвратных ресурсов, сбалансированную с ключевыми показателями производственной системы предприятия;
- сформировать временную матричную структуру управления возвратными ресурсами;
- спроектировать систему рейтинговых оценок участников управления возвратной логистикой предприятия.

Для решения первой задачи в настоящее время предлагаются несколько классификаций возвратных потоков. Одна из классификаций представлена в работе [3], в которой возвратные материальные потоки классифицированы по источнику происхождения и по процессам управления ими. К возвратам сферы производства и обращения относятся возвратные материальные потоки, возникающие на стадии производства и распределения готовой продукции, например:

- некондиционные товары, в частности товары ненадлежащего качества;
- неликвидные товары, в частности те, которые не пользуются спросом;
- товары, не проданные в срок по договору;
- товары устаревших моделей;
- товары с ошибками поставки, в частности, товары ненадлежащего количества или поставленные с нарушением условия договора [3].

Но эта классификация не учитывает особенности промышленного производства, характерного, например, для ООО «Машзавод». Данное предприятие выполняет заказы на изготовление нестандартных металлоконструкций промышленных предприятий. Это

производство не имеет возвратов некачественной, бракованной, невостребованной продукции. Выявлено, что отходы возникают на заводе в процессе производства и состоят в основном из неиспользованного вторичного сырья и отходов. Образование отходов можно представить в виде схемы (см. рисунок). К подобному типу производства предлагается применять понятие «возвратная логистика», т. е. выстраивание такой подсистемы, которая включает определённую совокупность взаимосвязанных компонентов, необходимых и достаточных для принятия логистических решений по переработке остатков первичного сырья. Компоненты подсистемы представлены квалифицированным персоналом, средствами оргтехники, методами решения логистических задач, логистическими каналами, информационными технологиями. Применение системного подхода в управлении возвратной логистикой обусловлено необходимостью устранения потерь, вызванных недополученной выгодой предприятия.

Для результативного исследования и моделирования процессов в подсистеме возвратной логистики промышленного предприятия ООО «Машзавод» поставлены следующие задачи: расчёт баланса материальных ресурсов по заказам завода; учёт, классификация и маршрутизация отходов; разработка технологии переработки отходов; планирование баланса материальных ресурсов по заказам завода; моделирование системы документооборота внутренних материальных потоков завода; формирование системы технико-экономических показателей (ТЭП) возникновения и переработки промышленных отходов.

Отходы, образующиеся в процессе производства, можно классифицировать по признакам, указанным в табл. 1. Из данной классификации определяются значения некоторых ТЭП и оцениваются параметры текущего состояния процессов возвратной логистики на предприятии. Рекомендуемая для ООО «Машзавод» совокупность показателей (табл. 2) должна согласовываться с общепринятой на предприятии сбалансированной системой ТЭП [4; 5]. Разработанная подсистема показателей позволяет осуществлять контроль над параметрами движения отходов производства и взаимоувязывает частные результаты работы с общими показателями производственной системы предприятия. Первые пять показателей (табл. 2) отнесены к общим показателям, а остальные – к частным. Сбалансированностью показателей обеспечивается учёт положений возвратной логистики, что является основой уменьшения потерь эффективности в оборотах материальных ресурсов предприятия.

В стоимостном выражении критерием перехода на работу с вторичным сырьём (отходами) рекомендуется принять неравенство

$$Z_{\text{сум.п.с}} > Z_{\text{доп.в.с}} + Z_{\text{тран.в.с}} + Z_{\text{хран.в.с}}, \quad (1)$$

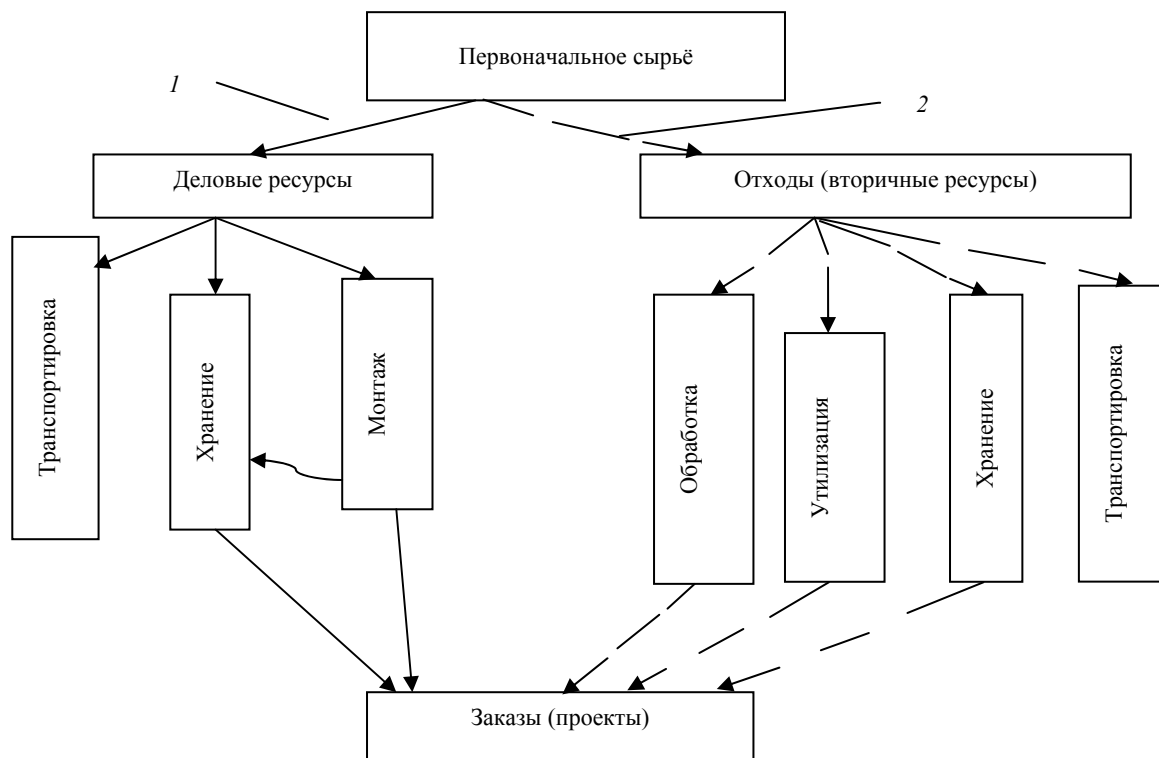
где $Z_{\text{сум.п.с}}$ – суммарные затраты на использование первичного сырья, тыс. руб.; $Z_{\text{доп.в.с}}$ – дополнительные затраты на использование вторичного сырья (деловые отходы), тыс. руб.; $Z_{\text{тран.в.с}}$ – транспортные затраты на перемещение отходов, тыс. руб.; $Z_{\text{хран.в.с}}$ – затраты на временное хранение отходов, тыс. руб.

Решение таких задач, как определение места размещения склада возвратных отходов, обоснование условий их хранения, систематизация маршрутов движения отходов, имеет свои особенности для конкретных типов производств, которые учитываются разработчиками алгоритмов переработки операционных данных выбранного предприятия с целью выявления рациональных ответов. К важным задачам следует отнести экономичный раскрой материалов и автоматизацию документооборота возвратной логистики с привлечением информационных технологий.

Отметим, что переработка отходов приносит ещё и экологические выгоды не только самому предприятию. Развитие системы возвратной логистики должна сопровождаться материальной заинтересованностью её участников [6]. Предлагаемая система должна быть выгодной предприятию, её работникам и настраиваться на меньшую нагрузку по отношению к окружающей среде.

Выстраивание целостной системы из локальных контуров, включающей разные уровни управления, позволяет обеспечивать необходимое и достаточное качество принимаемых логистических решений. Решающее значение при этом приобретает интеграция локальных контуров, которая способствует образованию эмерджентных свойств системы. Такая необходимость связана с потребностью сопровождения решений всего комплекса логистических задач возвратной логистики, которые подчинены единой политике руководства предприятием.

Решение перечисленных задач должно производиться в локальном контуре управления процессами возвратной логистики [7]. Под контуром управления понимается стадия, включающая определённую совокупность взаимосвязанных компонентов, необходимых и достаточных для принятия управленческих решений. Компоненты контура представлены не только квалифицированным персоналом, но средствами оргтехники, каналами связи, информационными технологиями и логистической инфраструктурой. Так, специалисты разных подразделений предприятия (проектно-технического и планово-финансового отделов, заготовительного участка, складского хозяйства, транспортной службы и диспетчера, а также инженера по качеству) образуют временную матричную структуру, которая способна подключаться к разрешению поставленных задач, что в итоге способствует повышению качества принимаемых управленческих решений и устранению упущенной выгоды в области возвратной логистики.



Принципиальная схема движения материальных ресурсов на промышленном предприятии:
 1 – направления движения первичного сырья; 2 – направления движения вторичного сырья (отходов)

Классификация отходов производства промышленного предприятия

Таблица 1

Номенклатурный номер, наименование	Признаки классификации								
	Марка, сорт	Геометрические размеры			Масса, кг	Остаточная стоимость, руб.	Срок хранения, мес.	Условия хранения	Направление использования
		Ширина	Длина	Высота					
Металл	Мс1	a_1	b_1	c_1	m_1	$P_{ост1}$	t_1	Temp ₁	Проект А
Трубы	Мс2	a_2	b_2	—	m_2	$P_{ост2}$	t_2	Temp ₂	Проект В
Уголок	Мс3	a_3	b_3	c_3	m_3	$P_{ост3}$	t_3	Temp ₃	Проекты А, С
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Система показателей возвратной логистики промышленного предприятия

Группы	Показатель	Алгоритм расчёта	Рациональная область применения показателя
Общие показатели	Рентабельность продукции $K_{р.п}$	Прибыль от продаж/себестоимость продукции	$K_{р.п} > 0$, превышение результатов над затратами
	Удельная материалоемкость $m_{уд}$ [5]	$m_{уд} = \frac{M}{Q},$ где M – суммарная материалоемкость продукции; Q – объем производства конечной продукции за плановый период	Обеспечивать снижение
	Коэффициент использования материалов $K_{и.м}$ [5]	$K_{и.м} = \frac{M_{г.п}}{M_Q},$ где $M_{г.п}$ – масса материала, введенного в готовую продукцию; M_Q – масса материала, введенного в технологический процесс предприятия	$K_{и.м} \leq 1$, расход материалов не превышает нормативной потребности
	Экономия расхода первичных материальных ресурсов (на заданный объем работ Q) $\mathcal{E}_м$	$\mathcal{E}_м = (M_{пер} - M_{воз}) \cdot \Pi_{1M} \text{ или}$ $\mathcal{E}_м = (H_{перM} \cdot Q \cdot k_{измН} - M_{воз}) \cdot \Pi_{1M},$ где Π_{1M} – цена единицы материального ресурса (МР); $M_{воз}$ – масса возвратного ресурса (ВР); $M_{пер}$ – масса первичного МР; $H_{перM}$ – норма расхода первичного МР; $k_{измН}$ – коэффициент изменения нормы ($= 0,94-1$)	$\mathcal{E}_м \geq 0$, не допускать перерасхода материальных ресурсов, $M_{воз} \neq 0$
	Чистый дисконтированный доход ЧДД	$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{(R-3)}{(1+E)^t},$ где R – результаты; 3 – затраты (без амортизационных отчислений); E – норма дисконта; t – шаг планирования	Показатель ЧДД возрастает за счет факторов возвратной логистики
Частные показатели	Коэффициент использования возвратных МР (на заданный объем работ Q) $k_{и.воз}$	$k_{и.воз} = \frac{\sum_i M_{возi} \cdot \Pi_{1возi}}{\sum_i M_{перi} \cdot \Pi_{1перi}},$ где индексы i – для первичного и для возвратного ресурса совпадают по технологическим требованиям использования данного МР; $M_{возi}$ – масса i -го ВР; $\Pi_{1возi}$ – цена единицы i -го ВР; $M_{перi}$ – масса i -го первичного материала; $\Pi_{1перi}$ – цена единицы i -го первичного ресурса	$0 \leq k_{и.воз} \leq 1$, поддержание оборота возвратных ресурсов
	Коэффициент включения возвратных материалов (в проектных работах) $k_{вкл}$	$k_{вкл} = \frac{M_{возi}}{M_{пер.прji}},$ где $M_{пер.прji}$ – стандартная (минимальная сборочная единица) потребность i -го первичного МР в данном j -м проекте	$k_{вкл} \geq 1$, кратное включение возвратных ресурсов
	Коэффициент обмена ВР $k_{об.воз.рес}$ (учет работы группы предприятий или объединений холдингового формата)	$k_{об.воз.рес} = \frac{\sum_i M_{возi}^c \cdot \Pi_{1возi}^c + \sum_j M_{возj}^{пр} \cdot \Pi_{1возj}^{пр}}{\sum_i M_{перi} \cdot \Pi_{1перi}},$ где $M_{возi}^c$ – собственные возвратные МР; $M_{возj}^{пр}$ – привлеченные возвратные МР j -й сторонней организации или из группы холдинга; $\Pi_{1возi}^c$ ($\Pi_{1возj}^{пр}$) – цена единицы i -го собственного (j -го привлеченного) ВР	$0 \leq k_{об.воз.рес} \leq 1$, выгодно замещать возвратными потоками; $k_{и.воз} \leq k_{об.воз.рес}$
	Трудоемкость доставки ВР на рабочее место T_d	$T_d = T_{под} + T_{хр} + T_{дв},$ где $T_{под}$ – трудоемкость подготовки к хранению, дн.; $T_{хр}$ – время хранения, дн.; $T_{дв}$ – время доставки ВР на рабочее место, дн.	$T_d < T_{пер}$ где $T_{пер}$ – трудоемкость доставки первичного МР, дн.
	Коэффициент срока хранения возвратных МР $k_{ср.хран}$	$k_{ср.хран} = \frac{\sum_i T_{возi}}{\sum_i T_{прji}},$ где $T_{возi}$ – срок хранения возвратных МР; $\overline{T_{прji}}$ – средний срок выполнения j -го проекта с i -м видом МР	$k_{ср.хран} \leq 1$, повышать оборачиваемость возвратных МР

Группы	Показатель	Алгоритм расчёта	Рациональная область применения показателя
	Коэффициент пролёживания металлолома $k_{\text{прол}}$	$k_{\text{прол}} = \frac{\sum_i M_{\text{ли}}}{g \cdot k_{\text{исп}}},$ где $M_{\text{ли}}$ – i-я масса металлолома на хранении; g – грузоподъёмность автомашины под металлоломом; $k_{\text{исп}}$ – коэффициент использования грузоподъёмности	$k_{\text{прол}} \geq 1$, не допускать чрезмерного накопления металлолома

Для мотивации участников логистической системы предлагается производить расчёт индивидуально-го рейтинга (R_i) по выражению

$$R_i = (k_1 \cdot \text{ККУ}_i + k_2 \cdot \text{КТУ}_i) t_i / \sum_{i=1}^n (k_1 \cdot \text{ККУ}_i + k_2 \cdot \text{КТУ}_i) t_i, \quad (2)$$

$$k_1 + k_2 = 1;$$

$$\sum_{i=1}^n R_i = 1,$$

где R_i – значение индивидуального рейтинга i -го участника, балл; ККУ_i – коэффициент квалификационного уровня i -го участника, балл; КТУ_i – коэффициент трудового участия i -го участника, балл; k_1 (k_2) – принятый в подразделении вес ККУ (КТУ), доли единиц; например, $k_1 = 0,6$ – $0,7$; $k_2 = 0,3$ – $0,4$; t_i – фактически отработанное время i -м участником в текущем месяце (по таблице учета рабочего времени), ч; n – списочная численность участников подразделения (или системы в целом), чел. [6].

Значение ККУ_i можно рассчитать как

$$\text{ККУ}_i = Z_i / Z_{\min},$$

где Z_i – средняя заработная плата i -го участника (работника) за прошедший период, руб./чел.-мес.; $Z_{\min}$ – минимальная средняя заработная плата за прошедший период в подразделении, руб./чел.-мес. [8].

По другому способу ККУ_i можно устанавливать по решению совета подразделения (или предприятия) с учётом результатов экспертных заключений его членов [6] и нормативных данных табл. 3.

Чтобы рассчитать размер КТУ_i , можно применять следующее выражение:

$$\text{КТУ}_i = \sum_{i=1}^p \text{ПВ}_i + \sum_{i=1}^m \text{ПН}_i,$$

где ПВ_i (ПН_i) – размер повышающего (понижающего) показателя КТУ i -го участника (который устанавливается советом подразделения с учётом данных табл. 4 в текущем месяце работы), балл; p (m) – общее количество положительных (отрицательных) значений, присвоенных советом i -му участнику в текущем месяце работы подразделения, ед.

Совокупность подсчитанных (за отчётный месяц) значений индивидуальных рейтингов R_i (по выражению (2)) упорядочивается в возрастающий ряд [6]:

$$R_1 \leq R_2 \leq \dots \leq R_n. \quad (3)$$

Значение R_i может рассчитываться для любого работника в динамике по месячным периодам или за определенный отрезок времени как средневзвешенная величина. Необходимость расчета R_i связана с подготовкой объективной информации по каждому участнику (работнику) и служит интегрированным показателем для формирования «социально-производственной иерархии» на предприятии [6].

Элементы упорядоченного ряда (3) могут умножаться на коэффициент (10 или 100 для образования целых частей каждого R_i , с сохранением упорядоченности этого ряда) и использоваться в качестве одного из основных показателей ценности участника (работника), служить объективным критерием поощрения и отбора кандидатов на продвижение по службе. Значение R_i можно также использовать для распределения премии (образованной из сумм экономии по реализованным логистическим мероприятиям) между участниками логистической системы. Так, например, размер премии каждого участника за дополнительный объём работ или другие результаты может рассчитываться по выражению

$$\Pi_i = \Pi_{\text{общ}} \cdot R_i, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \Pi_i = \Pi_{\text{общ}},$$

где Π_i – размер премии i -го участника за текущий месяц, тыс. руб./чел.-мес.; $\Pi_{\text{общ}}$ – общий размер премии (или экономии) по результатам выполнения объёмов работ за текущий месяц (составляет 40–45 % от суммы экономии на условно-постоянных расходах, при росте объёмов работ или по другим статьям), тыс. руб./мес.; R_i – значение индивидуального рейтинга i -го работника (рассчитанного по выражению (2)), балл; n – количество работников, участвующих в распределении премии ($\Pi_{\text{общ}}$), чел.

Внедрение рекомендуемой методики учёта и расчёта рейтинговых оценок участников управления возвратной логистикой предприятия дополняет предложенные рекомендации контурно-интегрированного управления логистическими процессами, способствует повышению качества принимаемых решений в области логистического менеджмента, развитию коллективных форм работы подразделений предприятия и в итоге устраняет упущенную выгоду по исследуемому объекту.

Таблица 3

Балльная оценка коэффициента квалификационного уровня (ККУ)

Наименование профессии, должности	ККУ, баллы
Директор, главный инженер	13,0–16,0
Зам. главного инженера, главные специалисты, начальники отделов	8,0–13,0
Зам. главных специалистов и начальников отделов	6,0–11,5
Начальники цехов, зам. начальников цехов	6,2–7,8
Старшие механики	5,0–6,3
Механики	3,9–5,4
Начальники участков, зам. начальников участков	4,7–6,5
Начальники смен	4,0–5,5
Старшие мастера, мастера, бригадиры	3,5–5,1
Ведущие специалисты	4,3–6,5
Специалисты с категориями	3,2–4,7
Специалисты без категорий	3,0–3,9
Техники	3,3–3,7
Служащие	2,0–2,5
Водители 5-6 разрядов	2,7–4,9
Водители 3-4 разрядов	1,3–3,4
Операторы оборудования 4-5 разрядов	2,5–4,1
Операторы оборудования 2-3 разрядов	1,7–2,5
Рабочие с разрядом	1,2–1,7
Рабочие без разряда, ученики	1,0–1,3

Таблица 4

Перечень показателей, повышающих и понижающих коэффициент трудового участия (КТУ)

Показатели, повышающие КТУ _i (ПВ _i)	Размер КТУ _i , балл (+)	Показатели, понижающие КТУ _i (ПН _i)	Размер КТУ _i , балл (–)
Высокий уровень выполнения производственных заданий	0,15–0,30	Невыполнение или несвоевременное выполнение производственных заданий	0,10–0,35
Срочность выполнения неплановых заданий	0,10–0,23	Нарушение графика поставок материальных ресурсов	0,10–0,25
Творческий подход к выполнению производственных заданий, недопущение брака	0,17–0,40	Наличие сверхнормативных потерь материалов, ГСМ	0,05–0,35
Инициативность, проявленная при участии в работе временных матричных структур	0,10–0,45	Сверхнормативные простои транспорта под погрузкой или разгрузкой	0,10–0,20
Транспортирование груза без потерь	0,05–0,15	Увеличение сверхнормативных остатков материалов на складе	0,10–0,25
Перевыполнение планов-графиков по сопровождению логистических процессов	0,12–0,30	Нарушение норм, правил и инструкций по охране труда	0,15–0,30
Предотвращение недопоставок материальных ресурсов, уменьшение излишних запасов	0,10–0,25	Нарушение графиков планово-предупредительных ремонтов специализированного оборудования	0,15–0,40
Выполнение заданий по подготовке кадров	0,12–0,35	Несвоевременное выполнение предписаний руководства подразделения или контролирующих органов	0,20–0,40
Экономия материальных ресурсов предприятия, соблюдение условий хранения	0,10–0,30	Нарушение трудовой и производственной дисциплины (или непринятие мер к нарушениям)	0,15–0,40
Повышение квалификации	0,15–0,25	Нарушение графика движения автотранспорта	0,15–0,30
Своевременное оформление сменной документации	0,10–0,30	Соккрытие сведений брака в работе, искажение отчетности	0,25–0,35

Библиографические ссылки

References

1. Букринская Э. М. Реверсивная логистика : учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГУЭФ, 2010. 79 с.
2. Селиванов А. В., Вашлаев И. И. Методика эколого-экономического управления горным производством // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2009. № 11. С. 241–245.
3. Терентьев П. А. Классификации и модели логистики возвратных потоков // Логистика сегодня. 2010. № 4 (40). С. 242–251.
4. Дыбская В. В. Взаимодействие смежных служб компаний при управлении логистическим сервисом // Логистика: современные тенденции развития : материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. СПб. : СПбГИЭУ, 2012. С. 92–94.
5. Горелик О. М. Производственный менеджмент: принятие и реализация управленческих решений : учеб. пособие. М. : КНОРУС, 2010. С. 208–209.
6. Формирование информационной технологии социального менеджмента на карьере / В. И. Ганицкий, А. В. Селиванов, Д. Б. Нехорошев, И. И. Вашлаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 6. С. 124–125.
7. 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 Intern. Conf. (14–16 June 2012, Celje). Slovenia : Published by University of Maribor, Faculty of Logistics, 2012. P. 279–283.
8. Экономика предприятия : учебник для вузов / под ред. В. Я. Горфинкеля. 5-е изд. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2008. 767 с.
1. Bukrinskaja Je. M. *Reversivnaja logistika: uchebnoe posobie* (Reverse logistics : a tutorial). St. Petersburg, Izd-vo SPbGUJeF. 2010. 79 p.
2. Selivanov A. V., Vashlaev I. I. *Gornyj informacionno analiticheskij bjulleten'*. 2009, no. 11, p. 241–245.
3. Terent'ev P. A. *Logistika segodnja*. 2010, no. 4 (40), p. 242–251.
4. Dybskaja V. V. *Logistika: sovremennye tendencii razvitiia: materialy XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (Logistics: Current Trends development: Materials XI Intern. scientific-practical. conf.) St. Petersburg, Izd-vo SPbGIJeU. 2012, p. 92–94.
5. Gorelik O. M. *Proizvodstvennyj menedzhment: prinyatie i realizacija upravlencheskih reshenij: ucheb. posobie* (Production management : adoption and implementation of management decisions : Proc. posobbt). Voscov, KNORUS Publ., 2010, p. 208–209.
6. Ganickij V. I., Selivanov A. V., Nehoroshev D. B., Vashlaev I. I. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*. 2003, no. 6, p. 124–125.
7. Selivanov A. V., Vashlayev I. I., Prokopovich D. A. *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.
8. *Jekonomika predpriyatija: Ucheb. dlja vuzov* (Enterprise Economics : Uchebnyik for universities. 5th ed.) Ed. V. Y. Gorfinkel). Moscow, Izd-vo JuNITI-DANA, 2008, 767 p.

© Селиванов А. В., Прокопович Д. А.,
Вашлаев И. И., 2014

УДК.658

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ РИСКАМИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В. Н. Товстонощенко

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

Обоснована необходимость управления рисками инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности. Сформулированы принципы управления рисками инновационной деятельности, являющиеся важнейшими элементами методологии управления рисками и позволяющие разработать и выбрать инструменты управления рисками. Проанализирован один из этапов управления рисками – оценка инновационных рисков и рассмотрен метод экспертных оценок. Особое внимание уделяется матрице рисков, рекомендованной для использования во многих стандартах по управлению рисками. Сделан вывод о том, что использование удобных методов оценки рисков позволяет осуществлять управление рисками инновационной деятельности предприятий ракетно-космической промышленности.

Ключевые слова: управление рисками, принципы риска, метод оценки, матрица рисков, экспертные методы.

METHODOLOGICAL APPROACH TO RISK MANAGEMENT AT THE ENTERPRISES OF THE ROCKET AND SPACE INDUSTRY

V. N. Tovstonoshenko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: teachervalua@mail.ru

The necessity of risk management of innovative activity of the enterprises of the rocket-space industry is shown. Principles of risk management innovation activities as critical components of the risk management methodology which can be used to develop and choose tools of risk management are formed. One of the stages of risk management – assessment of innovation risks and the method of expert estimates is analyzed. Special attention is paid to the risk matrix recommended for use in many standards on risk management. It is concluded that the use of the convenient methods of risk assessment manages the risks of innovative activity of the enterprises of the rocket-space industry.

Keywords: risk management, the principles of risk, valuation method, risk matrix, expert methods.

Ракетно-космическая промышленность (РКП) на протяжении многих лет является лидером инновационного промышленного сектора России. Последние события, связанные с неудачным запуском космических аппаратов, показали допущенные ошибки как следствие недоработки на стадиях производства и проектирования, в ходе которых не были учтены требования, предъявляемые к технологии выпуска космического аппарата.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что основными причинами возникновения таких ошибок являются состояние производственной базы предприятий, недостаток квалифицированных кадров, а также ограниченные финансово-экономические возможности государства и происходящая реструктуризация ракетно-космической промышленности. Изменчивость экономической среды функционирования инновационной деятельности, высокий уровень неопределенности принимаемых решений обуславливают необходимость совершенствования инструментов и методов управления рисками инновационной деятельностью предприятий ракетно-космической промышленности.

Управление рисками – это процесс, направленный на идентификацию инновационного риска, его анализ и оценку, а также разработку путей защиты от них. В ходе осуществления инновационных проектов могут возникнуть неблагоприятные события, приводящие к финансовому ущербу предприятия и оказывающие влияние на окружающую среду и здоровье населения.

Важнейшим элементом методологии управления рисками инновационной деятельности являются методологические принципы, позволяющие выбрать и разработать инструменты управления рисками, а также обеспечивающие целенаправленность, обоснованность и последовательность управления рисками на предприятиях ракетно-космической промышленности.

В ходе исследования были рассмотрены и выбраны основные принципы управления инновационными рисками на предприятиях ракетно-космической промышленности, к которым относятся обоснованность, целенаправленность, последовательность, экономичность, информированность, непрерывность, системность, сопоставимость и синтез.

Принцип целенаправленности предполагает установление взаимосвязей между потребностями

в создании мер управления рисками и возможностями их осуществления.

Принцип экономичности показывает необходимость создания сметы расходов на управление инновационными рисками и сравнение её с возможными потерями в случае возникших рисков событий на предприятии.

Принцип синтеза заключается в следующем: так как используемые методы имеют свои преимущества и недостатки, то их необходимо синтезировать в научно-методологический подход, обеспечивающий наилучший результат.

Принцип последовательности – полное рассмотрение каждого этапа формирования и реализации методов управления рисками.

Принцип ответственности – обеспечение ответственности каждым работником на своем участке управления риском. От степени обоснованности возможного риска зависят потери предприятия в процессе его деятельности.

Представленные методологические принципы управления рисками на рисунке разделены на две группы: базовые принципы и дополняющие.

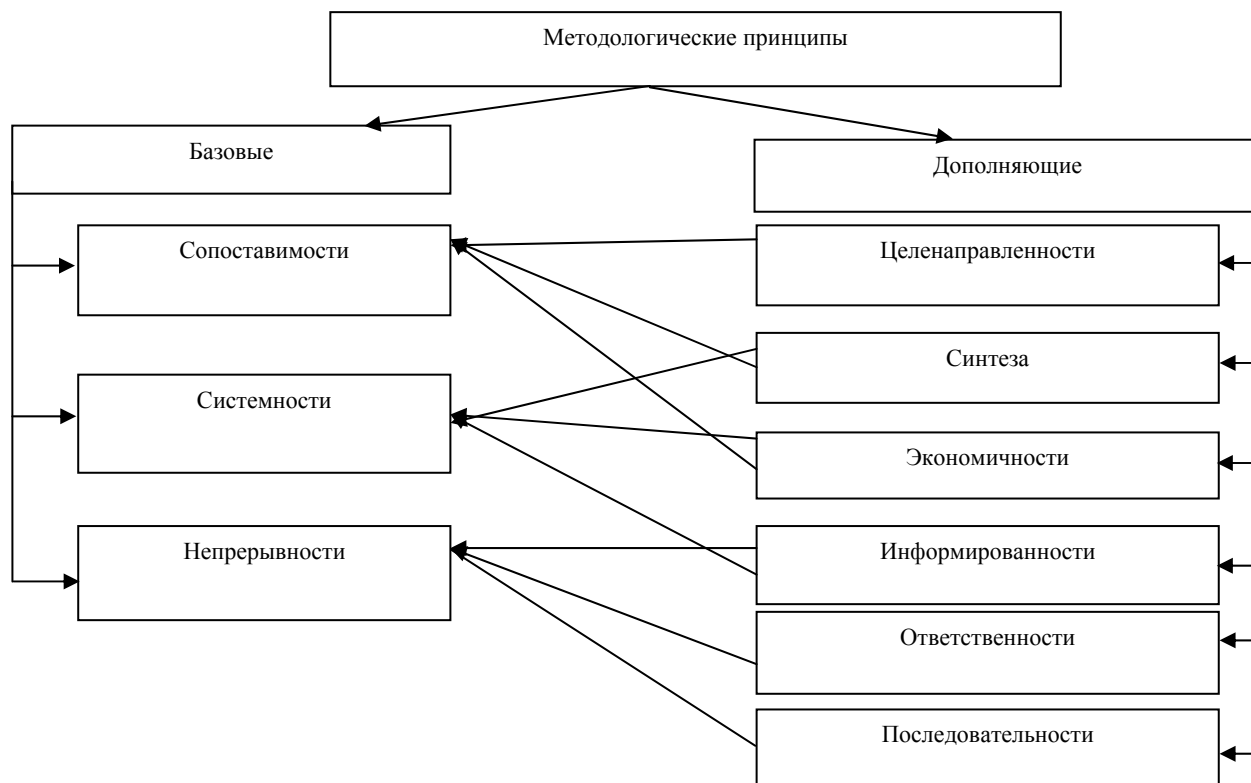
Выделенные на рисунке жирным шрифтом принципы являются базовыми методологическими принципами управления рисками. К ним относят обеспечение сопоставимости оценки полезности и меры риска за счет определения обоих показателей в общих единицах измерения.

Следующий принцип – принцип системности, т. е. взаимодействие всех подразделений в процессе выявления, оценки и управления рисками.

Принцип непрерывности – постоянный мониторинг и контроль рисков, соотнесение их со стадиями жизненного цикла инновационного проекта и методами оценки рисков.

Остальные принципы дополняют базовые и относятся к категории дополняющих, к которым необходимо добавить принцип декомпозиции, позволяющий рассмотреть риски не только на каждом этапе инновационного проекта, но также на всех уровнях создания космического аппарата.

Одним из важных этапов управления рисками на предприятиях ракетно-космической промышленности является оценка инновационного риска.



Методологические принципы управления инновационным риском

Оценка инновационного риска представляет собой совокупность мероприятий, позволяющих спрогнозировать возможность получения потерь от возникших рисков ситуаций при разработке и реализации инновационного проекта на предприятиях данной промышленности.

Для оценки риска используются различные количественные и качественные методы, позволяющие сравнить величину риска различных вариантов решения и выбрать тот, который отвечает стратегии управления риском на предприятии.

В рамках данной статьи рассмотрим метод экспертных оценок. Метод экспертных оценок основан на обобщенном мнении экспертов о вероятности риска на каждом этапе жизненного цикла инновационного проекта, что позволяет вовремя определить ущерб и принять правильное решение по отношению к риску. Несмотря на свое многообразие, экспертные методы включают в себя основные этапы:

1. Обучение. Персонал организации, вовлеченный в процессы управления рисками, обучается теоретическим основам деятельности по управлению рисками, а также конкретным практическим методам управления рисками, которые будут использоваться в организации.

2. Мозговой штурм. Метод, показывающий свою эффективность в ходе идентификации рисков, а также выработки предложений по их устранению.

3. Тестовые листы. Списки критериев, описывающих наиболее безопасное состояние какой-либо из сис-

тем организации, позволяют проводить оперативный контроль в деятельности по управлению рисками.

4. Опросные листы. Метод, позволяющий получить мнение сотрудников организации по отношению к рискам и управлению ими без включения данных сотрудников в фокус-группу с целью экономии времени.

5. Матрица рисков. Метод, позволяющий оценить уровень рисков и отнести их к определенным группам на основании вероятности возникновения событий риска и последствий событий риска.

Более подробно остановимся на матрице рисков, так как данный метод рекомендуется использовать во многих стандартах [1; 2], он обладает наглядностью и простотой, благодаря которым может применяться специалистами широкого круга без долгой предварительной подготовки.

Следует отметить, что оценка вероятности возникновения и последствий риска дается качественным образом через экспертную оценку фокус-группы или отдельных экспертов. Для использования конкретных количественных значений вероятностей и количественных измерений последствий (в денежном или процентном выражении) применяются различные модификации матрицы рисков [3].

ГОСТ Р ИСО 17666–2006 предлагает структуру матрицы рисков, изображенную в табл. 3, с характеристикой используемых вероятностей в табл. 1 и характеристикой тяжести последствий в табл. 2 [1].

Таблица 2

Характеристики последствий событий риска

Оценка в баллах	Тяжесть последствий	Характеристики последствий, его воздействие на стоимость проекта
5	Катастрофическая	Приводит к прекращению работ по проекту
4	Критическая	Проектная стоимость увеличивается более заданного процента
3	Значительная	Проектная стоимость увеличивается более заданного процента
2	Существенная	Проектная стоимость увеличивается менее заданного процента
1	Незначительная	Минимальное воздействие или его отсутствие

Риски, попадающие в зоны с очень низким и низким уровнем риска, относятся к «зеленой» категории: данные риски принимаются к управлению, в их отношении вводится система контроля и они могут страховаться.

Риски, попадающие в зоны со средним уровнем риска, относятся к «желтой» категории: данные риски могут приниматься к управлению, но в отношении них меняются меры контроля, ужесточаются меры контроля или вырабатываются меры по устранению этих рисков или их смягчению во вторую очередь.

Риски, попадающие в зоны с высоким или очень высоким уровнем риска, относятся к «красной» категории: данные риски являются неприемлемыми, разрабатываются в приоритетном порядке меры по их устранению, они контролируются особо тщательным образом.

Таблица 1

Характеристики вероятностей событий риска

Оценка	Вероятность возникновения события риска	Характеристика появления опасного события
5	Максимальная	Произойдет обязательно, один или более одного раза за проект
4	Высокая	Будет происходить часто, приблизительно один раз на 10 проектов
3	Средняя	Будет происходить иногда, приблизительно один раз на 100 проектов
2	Низкая	Будет происходить редко, приблизительно один раз на 1 000 проектов
1	Минимальная	Почти никогда не будет происходить, один раз на 10 000 проектов или реже

Подводя итог вышесказанному, важно отметить, что устоявшийся подход в российской практике по управлению рисками акцентируется в основном на страховании, что не является оптимальным.

Процесс управления рисками на российских предприятиях ракетно-космической промышленности выражен недостаточно полно. Российским организациям следует более подробно и конкретно прописывать все существующие процессы управления рисками, регламентирование которых должно быть полным, чем при прохождении сертификации системы менеджмента качества. За каждую значимую часть проекта должен быть назначен ответственный за риски данной части проекта, обязанностью которого должен являться строгий контроль за всеми идентифицированными и проанализированными рисками.

Таблица 3

Матрица риска

Вероятность

E	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий	Очень высокий
D	Низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
C	Очень низкий	Низкий	Низкий	Средний	Высокий
B	Очень низкий	Очень низкий	Низкий	Низкий	Средний
A	Очень низкий	Очень низкий	Очень низкий	Очень низкий	Низкий

1

2

3

4

5

Тяжесть последствий

На предприятиях ракетно-космической промышленности должны организовываться фокус-группы для идентификации рисков и для последующей выработки предложений по устранению или смягчению рисков. Предприятия ракетно-космической промышленности должны использовать удобные методы оценки рисков (например, подходящие разновидности матрицы рисков), должны способствовать беспрепятственному движению информации о имеющихся рисках внутри предприятия, должны осуществлять перманентный мониторинг за изменениями в рисках.

Таким образом, правильно выстроенная структура процесса управления рисками в соответствии с международными стандартами и координация действий всех подразделений и сотрудников сможет поднять качество продукции российских ракетно-космических промышленных предприятий и в дальнейшем сократить число провальных миссий.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р ИСО 17666–2006. Менеджмент риска. Космические системы / Научно-исследовательский

центр контроля и диагностики технических систем. М. : Стандартиформ, 2006.

2. ISO 17666:2003. Space systems – Risk management / International Organization for Standardization. Geneva. 2003.

3. Reuven Dar, Sergio Guarro, Jim Rose. Risk Management Best Practices. The Aerospace corporation Nasa, 2004.

References

1. GOST R ISO 17666-2006 Menedzhment riska. Kosmicheskiye sistemy [State Standard R ISO 17666-2006 Risk Management. Space systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2006.

2. International Organization for Standardization. ISO 17666:2003 Space systems – Risk management. Geneva. Switzerland. 2003.

3. Reuven Dar, Sergio Guarro, Jim Rose. Risk Management Best Practices. The Aerospace corporation Nasa. 2004.

© Товстонощенко В. Н., 2014

УДК 005.591.6+338.46:339

АДАПТИВНО-ИННОВАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКИМИ СТРУКТУРАМИ С УЧЕТОМ ДРАЙВ-ФАКТОРОВ БИЗНЕС-СРЕДЫ

А. Н. Чаплина, Е. А. Герасимова

Торгово-экономический институт Сибирского федерального университета
Российская Федерация, 660075, г. Красноярск, ул. Л. Прушинской, 2
E-mail: elenasvo@mail.ru

Показана необходимость и возможность внедрения адаптивно-инновационного управления в деятельность предпринимательских структур. Проанализированы факторы бизнес-среды Красноярского края, г. Красноярска на основе статистической и аналитической информации. Предложен разработанный организационно-экономический механизм адаптивно инновационного управления на основе формирования адаптационного поведения предпринимательской структуры, модель взаимосвязей и взаимозависимостей потенциалов развития предпринимательских структур с выделением доминирующего инновационного потенциала. Рассмотрена возможность расчета интеграционного потенциала развития организации на основе частных показателей.

Ключевые слова: адаптивное управление, адаптивное поведение, потенциал развития, инновационный потенциал, предпринимательские структуры.

ADAPTIVE AND INNOVATIVE MANAGEMENT ENTERPRISE STRUCTURES IN THE VIEW OF BUSINESS ENVIRONMENT DRIVE FACTOR

A. N. Chaplina, E. A. Gerasimova

Institute of Economics and Trade, Siberian Federal University
2, L. Prushinskaya str., Krasnoyarsk, 660075, Russian Federation
E-mail: elenasvo@mail.ru

The given article shows the necessity and possibility of implementing adaptive - innovative management business organizations activities. The factors of business environment of Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk on the basis of statistical and analytical information are studied. Developed organizational and economic mechanism of adaptive-innovation management through the development of adaptive behavior of business structure is proposed. The relationship and interdependence of development potentials of business structures with the release of the dominant innovation capacity is modeled. The possibility of calculating the integration potential of the organization on the basis of specific indicators is studied.

Keywords: adaptive management, adaptive behavior, development potential, innovative ability, entrepreneurial structure.

Инновационная ориентированность предпринимательских структур (ПС) становится характерной особенностью их стратегического поведения в современной экономике России. Приоритет развития инновационной привлекательности организаций определен в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 г. и в программах реализации в отдельных регионах России, в частности, в «Стратегии–2020» Красноярского края [1; 2]. Это предопределяет диверсификацию системы менеджмента организаций предпринимательского типа. Приоритет отдается в пользу инновационного менеджмента как типа современного управления в условиях неопределенности бизнес-среды, обеспечивающего создание и коммерциализацию разного рода инноваций. При этом доминирующим драйв-фактором, определяющим современную особенность отечественной бизнес-среды, является вхождение России в ВТО.

Вступление России в ВТО – это, прежде всего, стабильность условий работы на внешних рынках, снижение барьеров в торговле, а также возможность участия России в формировании правил международного экономического сотрудничества [3]. Многие годы (с 1993 г.) аббревиатура ВТО была для россиян чем-то далеким и недостижимым, тайным кодом, к которому нам всем хотелось приобщиться. Приобретенная сегодня возможность определяет необходимость формирования адекватных систем менеджмента, которые позволят принимать разноуровневые (стратегические, тактические) управленческие решения для удовлетворения потребностей населения страны (регионов) в качественных товарах и услугах разного рода.

При этом основные преимущества членства России в ВТО для торгового бизнеса следующие: во-первых, очевидная выгода для потребителя – это снижение стоимости жизни за счет снижения торговых барьеров, что способствует росту торговли, приводит к повышению как государственных, так и личных доходов; во-вторых, преимущества от присоединения к ВТО получают экспортно ориентированные предприятия; в-третьих, развитие торговли ведет в долгосрочной перспективе к повышению занятости (приток капитала в страну, в частности в форме прямых иностранных инвестиций, создает дополнительные рабочие места и повышает благосостояние населения в целом); в-четвертых, у правительства появляется больше возможностей защищать себя от действий лоббистских групп, так как все российские регулирующие органы будут обязаны публиковать проекты правовых актов,

а российские граждане и компании получают возможность направлять предложения по этим проектам (принцип открытости ВТО); в пятых, торговая система ВТО помогает беспрепятственному осуществлению торговли и обеспечивает страны конструктивным и справедливым механизмом для разрешения споров по торговым вопросам, тем самым создавая и укрепляя международную стабильность и сотрудничество.

Таким образом, развитие интеграционных процессов в экономике и взаимосвязей между территориями открывают перспективы роста объемов предоставления услуг и делают этот сектор весьма привлекательным для инвестиций и приложения предпринимательской активности. Очевидно, выйти на данный рынок и закрепить на нем свои позиции смогут те предприятия, услуги которых будут соответствовать мировым стандартам качества и обладать высокой ценностью для потребителей, выгодой от ее приобретения. Это обуславливает необходимость и возможность повышения эффективности, качества деятельности и менеджмента предприятия, которое предлагает на рынке не только услугу, а качество своей деятельности. Данная позиция определяет систему целей предприятия и выдвигает ряд особых требований к управлению, которое должно учитывать близость к потребителю, изменения предпочтений, особую роль человеческого фактора, важность информационной поддержки услуг и др. и обладать адаптивными свойствами и критериями, обеспечивающими достижение этих целей.

Красноярский край в течение всего 2012 г. занимал первое место среди субъектов Сибирского федерального округа по обороту розничной торговли, обогнав Новосибирскую область [4]. В 2012 г. оборот розничной торговли по краю составил 428,3 млрд руб., индекс физического объема составил 112,1 %; для сравнения, оборот Новосибирской области составил 393,4 млрд руб., Кемеровской области – 311,5 млрд руб., Омской области – 262,1 млрд руб. Оборот розничной торговли по МФО в 2012 г. составил 2 309,3 млрд руб., индекс физического объема к соответствующему периоду предыдущего года составил 106,1 %. Увеличение оборота влияет и на рост оборота розничной торговли на душу населения, в 2012 г. он составил 150,9 тыс. руб. на человека, это на 18,3 % больше, чем в 2011 г. (127,6 тыс. руб.), что свидетельствует об увеличении доходов и платежеспособности населения. При этом сложилась и определенная структура оборота в Красноярском крае в 2012 году. Большую часть

в структуре розничного оборота занимают индивидуальные предприниматели, реализующие товары вне рынков и ярмарок, их доля составляет 41,9 % (2010 г. – 46,3 %; 2011 г. – 45,5 %); малые предприятия (включая микропредприятия) составляют 26,5 % (2010 г. – 24,2 %; 2011 г. – 25,6 %); крупные организации и субъекты среднего предпринимательства занимают около 28,1 % в структуре розничного товарооборота (2010 г. – 22,3 %; 2011 г. – 23,8 %); реализация продукции на ярмарках и розничных рынках составляет 3,5 % (2010 г. – 7,2 %; 2011 г. – 5,1 %). В 2012 г. в структуре оборота розничной торговли удельный вес пищевых продуктов, включая напитки и табачные изделия, составил 41,9 %, непродовольственных товаров – 58,1 % (в 2011 г. – 43,7 и 56,3 % соответственно).

Сфера торговли является значимой бюджетобразующей отраслью Красноярского края, занятость населения в данной отрасли от общего количества занятых в экономике составляет более 16 %. Следует отметить, что с каждым годом все больше товаров в крае реализуется через торговые сети, так как сети являются одним из крупных и современных сегментов рынка, что соответствует стратегии развития торговли. Оборот торговых сетей в 2012 г. составляет 14,3 % от общего оборота розничной торговли в Красноярском крае (в 2011 г. – 12,1 %). В 2012 г. оборот розничных торговых сетей составил 61,6 млрд руб., индекс физического объема составил 126,8 % в сравнении с аналогичным периодом прошлого года (45,9 млрд руб.).

На Красноярском рынке представлены крупные региональные, федеральные и транснациональные торговые сети, с их развитием формируется и развивается современный рынок товаров и услуг, создаются условия для конкуренции, за счет чего оказывается влияние на формирование ценовой политики торговых предприятий, развивается культура торговли, что очень важно в условиях вхождения России в ВТО. Одними из крупных торговых сетей в крае являются региональные сети, которые занимают лидирующее место на рынке, развиваются и являются сильными конкурентами (сеть универсамов «Командор», сеть универсамов «Красный Яр», сеть универсамов «Каравай», SPAR, сеть магазинов «Красноярский хлеб»). При этом активно развиваются собственные сети производителей края, такие как лавка «Полезные продукты», мясная лавка «Премьер», «Чистые луга». На красноярском рынке также представлены федеральные и транснациональные сети, которые сегодня тоже привлекают местных производителей по реализации их продукции через свою сеть («О'кей», «Леруа Мерлен», «Метро Кэш энд Кэрри» и др.).

В определенном смысле XXI в. можно было бы назвать веком российского менеджмента. Это определяет возможность и необходимость в условиях современной экономики использования интеграции современных подходов, принципов и инструментов, методов адаптивного управления предприятиями сферы услуг. Большинство отечественных предприятий сферы услуг, не имеющих налаженной системы адаптив-

ного управления, оказались неспособны адекватно и осознанно реагировать на постоянно изменяющиеся условия внешней среды в силу неразвитости основных его элементов: механизма управления, процесса управления, структуры управления и компетенций менеджера.

Повышение качества адаптивного менеджмента становится невозможным без управленческих и организационных инноваций, а переход к нужному равновесию предприятия требует приспособления к изменяющейся внешней среде на основе адаптивных компетенций менеджеров. Сегодня недостаточно применения прошлого портфеля знаний для построения адаптивных бизнес-моделей деятельности и менеджмента и получения с их помощью надежных прогнозов стратегического поведения предприятия и инструментов развития адаптивных компетенций. Поэтому в условиях инновационного развития торгового бизнеса и предпринимательства сферы услуг актуализируется именно адаптивный менеджмент, который рассматривается как тип современного управления и должен базироваться на интеграции диверсификации и системного подхода, программ инноваций.

Адаптивное управление, на наш взгляд, – это управление социально-экономической системой (организацией, предпринимательской структурой), которое опирается на человеческие ресурсы как основу организации, ориентирует бизнес-процессы на запросы потребителей, своевременно реагирует и проводит в организации современные организационные изменения, отвечающие вызову со стороны факторов турбулентной бизнес-среды и позволяющие добиваться реализации стратегического поведения, конкурентных преимуществ, что в совокупности дает возможность организации выживать в долгосрочной перспективе, создавая доминирующую культуру и адаптивные компетенции готовности к изменениям (рис. 1).

Для достижения конкурентных преимуществ, а следовательно, и определенного уровня конкурентоспособности организации, необходимо формировать и развивать потенциал предприятия как объекта управления и экономических исследований. Концептуальным положением здесь выступает причинно-следственная связь трех доминант: стратегическое поведение – инновационный потенциал – конкурентоспособность. Источником формирования потенциала предприятия являются ресурсы, которые, как правило, представлены материальными и нематериальными активами [4; 5]. При этом ресурсы предприятия (состав, которых известен в рамках расширенного воспроизводства) характеризуют качественный состав определенных средств. Соответственно, количество ресурсов означает величину запаса этих средств. Ресурсы, таким образом, являются количественной мерой определенных качеств – качественных составляющих потенциала предприятия. При этом потенциал, в свою очередь, характеризует степень возможностей, дееспособности ресурсов.

Потенциал предприятия – многомерное системное логическое образование, структура которого опреде-

ляется тремя принципиальными измерениями, каждое из которых соответствует определенной группе факторов, обуславливающих, в свою очередь, весь спектр ее деятельности: функциональным – основными видами функциональной деятельности; организационным – формами организации (управления) основных видов функциональной деятельности; ресурсным – ресурсами, необходимыми для организации и осуществления функциональной деятельности. Ресурсный потенциал предприятия как объекта управления представляется его интеграционным потенциалом. Интеграционный потенциал как системное образование порождает, таким образом, синергический эффект, характер проявления которого определяется степенью увлечения каждым последующим потенциалом возможности (ценности) предыдущего.

Стратегический успех предприятий зависит от множества факторов, для характеристики которых используют как финансовые показатели, так и нефинансовые (репутация у потребителей, эффективность внутренних бизнес-процессов, компетенции персонала, способность адаптации к внешней среде, знаниевые преимущества и др.), которые имеют не меньшее значение. Они могут на ранних фазах развития предприятия сигнализировать о возможных рисках, связанных с влиянием неблагоприятных факторов, угрозы от которых не улавливают еще финансовые, и считать как возможности, так и угрозы турбулентной внешней среды, проектируя при этом адекватные механизмы управления их устойчивым развитием.

В управленческой парадигме XXI в. понятие «адаптивный потенциал» стало концептуальным феноменом процесса адаптации субъектов рынка, оно развертывалось и уточнялось в ходе методологических, теоретических и эмпирических исследований и получило развитие с конца 70-х – начала 80-х гг. XX в. Основой формирования «адаптивного потенциала» выступает ресурсный (техничко-технологический) потенциал как условие эффективного трансформационного преобразования тех видов деятельности, которые служат инструментом для предотвращения негативных тенденций в развитии деятельности предприятия сферы услуг на этапах неопределенности бизнес-среды при достижении целей развития.

Важно учесть не только фактическую эффективность ресурсного потенциала предприятия, но и потенциальную эффективность интеграционного развития потенциалов фирмы, необходимых для реализации стратегического поведения в нестабильной бизнес-среде. При этом целесообразно использовать подходы и инструменты теории диверсификации. В данном исследовании придерживаемся следующей классификации: адаптивный потенциал; клиентский потенциал; финансовый потенциал; инновационный потенциал; человеческий потенциал; технико-техноло-

гический потенциал; организационный потенциал. Такой типологический анализ потенциалов увязан со стоимостной концепцией определения потенциалов, которые накапливаются по всей цепочки бизнеса. При этом, по нашему мнению, именно эти потенциалы могут интегрироваться, развивая друг друга, характеризуя качество адаптивного управления и фактическую и потенциальную эффективность использования ресурсов бизнеса. Такой социально-экономический срез предприятия раскрывает потенциальные возможности производства нематериальных ценностей – интеллектуальный капитал.

Целесообразно представить модель взаимодействия потенциалов на основе разработки Т. Питерса и Р. Уотермена «модель счастливого атома» (рис. 2) [6].

В этой модели, на наш взгляд, возможно объединение «управленческих команд потенциалов» для формирования адаптивного управления, отдавая приоритет инновационному потенциалу и созданию предпринимательской конфигурации. Все другие потенциалы создают при взаимодействии интегрированную структуру «счастливого атома»: клиентский потенциал; финансовый потенциал; адаптивный потенциал; человеческий потенциал; технико-технологический потенциал; организационный потенциал.

Инновационный потенциал – это интеграционные компетенции предприятия, характеризующие его готовность к изменениям во внешней и внутренней бизнес-среде посредством принятия эффективных разноразноуровневых управленческих решений с целью обеспечения конкурентоспособности деятельности и менеджмента функционирования и развития предприятий.

Одной из центральных проблем определения характера адаптивного управления является получение относительной оценки адаптационного потенциала в современных рыночных условиях хозяйствования. В этом плане актуален вопрос разработки обобщающего, интеграционного показателя адаптационного потенциала предприятия, включающего инновационный, инвестиционный, кадровый, финансовый и другие потенциалы. Для реализации эффективного адаптивно-инновационного управления необходима реальная оценка уровня потенциала предприятия на заданный момент времени и оценка его динамики в целях обеспечения дальнейшего перспективного развития.

С учетом вышеперечисленного считаем целесообразным оценку эффективности развития потенциала проводить в виде расчета наиболее значимых относительных показателей, объективно отражающих существующие связи и зависимости между исследуемыми процессами и явлениями (см. таблицу). В основу данного расчета легла концепция стратегических карт, предложенная Робертом Капланом и Дэвидом Нортоном в 1992 г. [7].

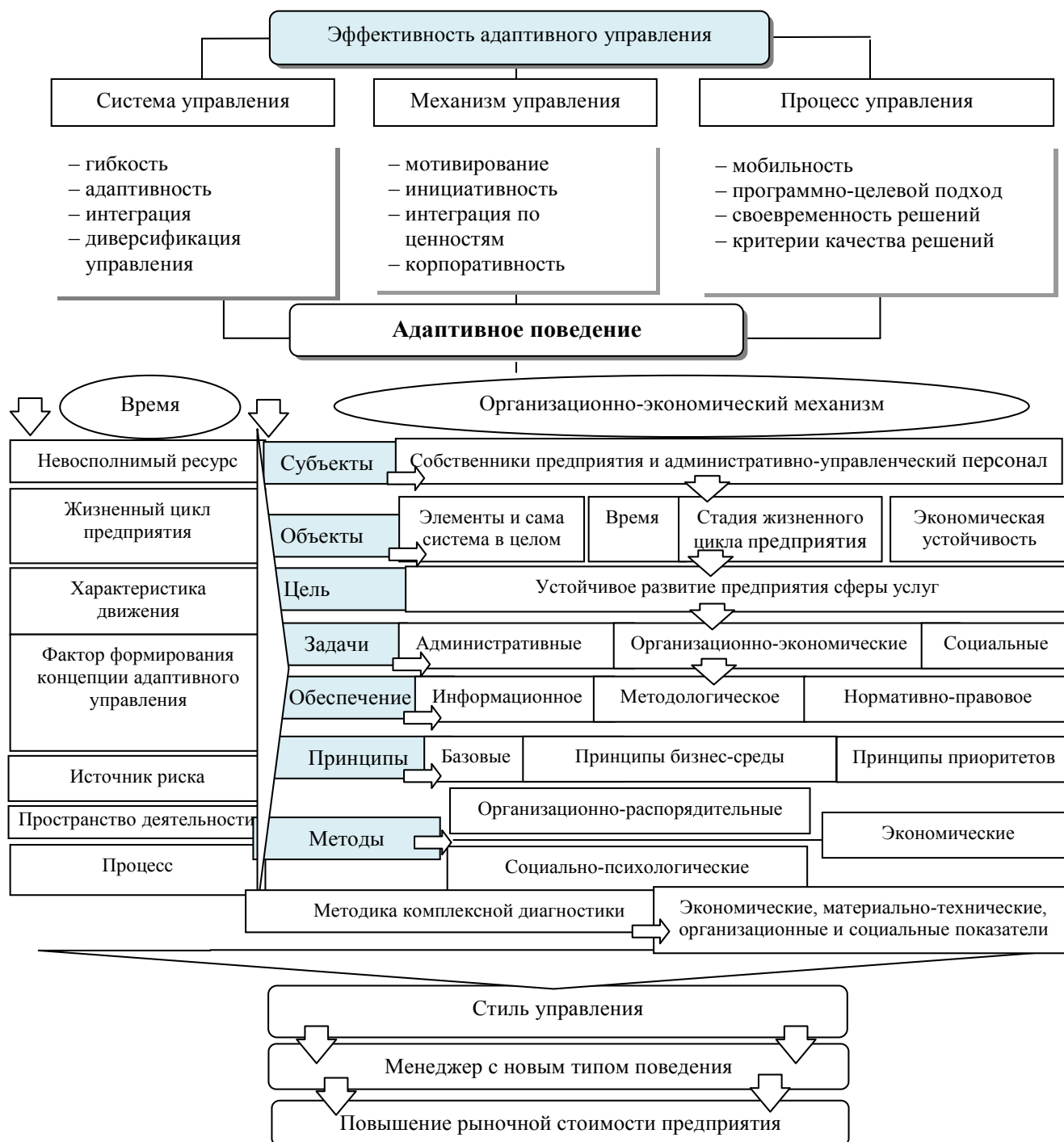


Рис. 1. Организационно-экономический механизм адаптивно-инновационного управления ПС

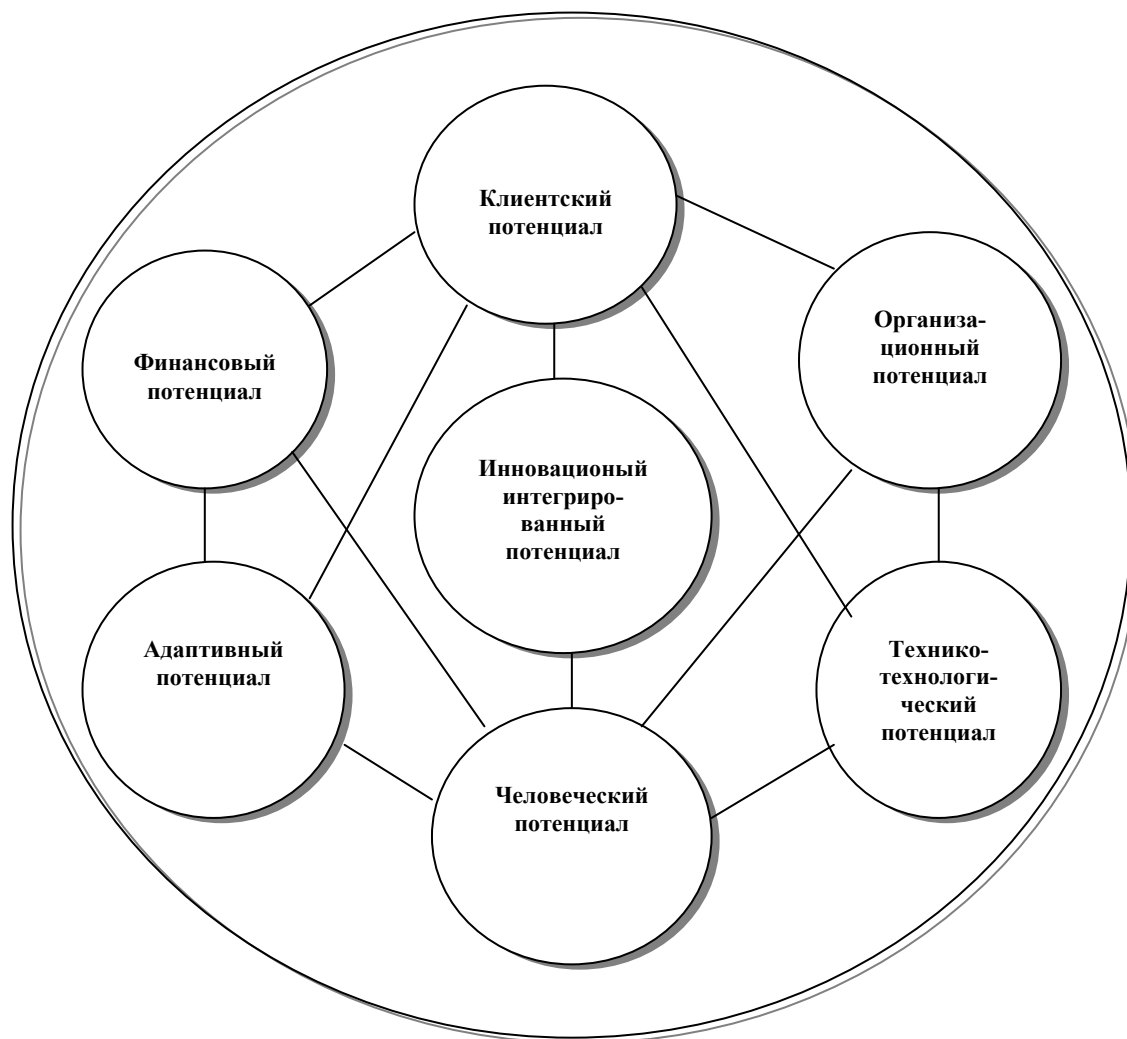


Рис. 2. Система взаимодействия потенциалов для создания инновационных способностей предприятия, составленная по схеме 7-С (П. Уотермен)

Оценка адаптационного потенциала предпринимательской структуры

Составляющие адаптационного потенциала	Примеры расчета
Финансово-экономический потенциал	Стоимость активов на одного работающего, тыс. руб.; прибыль от новых видов продуктов и услуг, тыс. руб.; рыночная стоимость (акций) фирмы, тыс. руб.; добавленная стоимость на одного работающего, тыс. руб.
Клиентский потенциал	Годовой объем продаж на одного потребителя, тыс. руб.; количество потребителей на одного работающего, в абсолютном выражении или в %; индекс удовлетворенности потребителей, %; средний размер поставок одному потребителю, тыс. руб.
Организационный потенциал	Средний срок разработки нового вида продукта; среднее время принятия решений; удельный вес расходов на информационные системы в общей сумме административных расходов, %; производительность компьютерных систем на одного работника; количество качественно выполненных заказов
Инновационный потенциал	Затраты на исследование и разработки, тыс. руб.; инвестиции на освоение новых рынков, тыс. руб.; индекс доверия работников к компании, %; удельный вес новых продуктов в ассортименте компании, %; индекс удовлетворенности работников, %; инвестиции на освоение новых рынков, тыс. руб.
Человеческий потенциал	Индекс лидерства; индекс мотивированности персонала; соотношение временных и постоянных работников, %; удельный вес работников с университетским образованием, %; численность женщин-менеджеров

Систематическая оценка инновационного потенциала и отдельных его составляющих позволит отслеживать наметившиеся позитивные или негативные тенденции, что даст возможность корректировать направления инновационного развития и прогнозировать вероятность и характер результатов деятельности ПС.

Исходя из вышеизложенного следует, что при внедрении адаптивного управления будет меняться вся система управления ПС как объекта экономических исследований с учетом членства России в ВТО как драйв-фактора в современной бизнес-среде. Вследствие этого через определенное время происходит изменение структуры и культуры управления, и тем самым вся система управления обновляется с учетом той стадии жизненного цикла, на которой она находится на сегодняшний день, соответствуя базовым принципам, принципам бизнес-среды и приоритетов функционирования и развития. При этом система адаптивного управления должна включать инструменты как формирующие, так и поддерживающие нормальные критерии конкурентных преимуществ предпринимательской структуры в конкретном регионе.

Библиографические ссылки

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ifap.ru/ofdocs/rus/rus006.pdf> (дата обращения: 23.10.2013).
2. Стратегия социально-экономического развития Красноярского края на период до 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: http://www.econ.krskstate.ru/ser_kray/strateg (дата обращения: 23.10.2013).
3. Климин А. А. Состояние и перспективы развития торговой деятельности в Красноярском крае // II Красноярский торговый форум – 2013 : сб. материалов. Красноярск, 2013. С. 19–23.
4. Чаплина А. Н., Максименко И. А. Механизм обеспечения конкурентоспособности сетевых розничных торговых предприятий : монография / Краснояр. гос. ун-т. Красноярск, 2008. 215 с.
5. Чаплина А. Н., Герасимова Е. А. Формирование стратегии комплексного развития предпринимательской структуры : монография / Краснояр. гос. торг.-экон. ин-т. Красноярск, 2009. 218 с.

6. Питерс Т., Уотермен Р. В поисках эффективного управления (опыт лучших компаний) : пер. с англ. / под общ. ред. Л. И. Евенко. М. : Прогресс, 1986. 424 с.

7. Ольве Нильс-Горан, Рой Жан, Веттер Магнус. Сбалансированная система показателей. Практическое руководство по использованию : пер. с англ. М. : Вильямс, 2006. 304 с.

References

1. *Kontsepsiya dolgosrochnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy federatsii do 2020 g.* (The concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation to 2020). Available at: <http://www.ifap.ru/ofdocs/rus/rus006.pdf> (accessed 23 October 2013).
2. *Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Krasnoyarskogo kraya na period do 2020 g.* (Strategy for Socio-Economic Development of the Krasnoyarsk Territory for the period to 2020). Available at: http://www.econ.krskstate.ru/ser_kray/strateg (accessed 23 October 2013).
3. Klimin A. A. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya trgovoy deyatel'nosti v Krasnoyarskom krae* A. A. Klimin. // *Krasnoyarskiy trgovyy forum-2013 : sb. materialov* (Status and prospects of trading activity in the Krasnoyarsk region). Krasnoyarsk, 2013, p. 19–23.
4. Chaplina A. N., Maksimenko I. A. *Mekhanizm obespecheniya konkurentosposobnosti setevykh roznichnykh trgovykh predpriyatiy* (Mechanism to ensure the competitiveness of the network of retail enterprises). Krasnoyarsk. gos. un-t. Krasnoyarsk, 2008. 215 p.
5. Chaplina A. N., Gerasimova Ye. A. *Formirovanie strategii kompleksnogo razvitiya predprinimatel'skoy struktury* (Forming strategy for the integrated development of business structure). Krasnoyarsk. gos. torg.-ekon. in-t. Krasnoyarsk, 2009. 218 p.
6. Piter T., Uotermen R. *V poiskakh effektivnogo upravleniya (opyt luchshikh kompaniy)* (In search of effective management (experience the best companies)). Moscow, Progress Publ., 1986. 424 p.
7. Ol've Nil's-Goran, Zhan Roy, Magnus Vetter. *Sbalansirovannaya sistema pokazateley. Prakticheskoe rukovodstvo po ispol'zovaniyu* (Balanced Scorecard. Practical guide to use). Moscow, Vil'yams Publ., 2006. 304 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аврамчикова Надежда Тимофеевна – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avr-777@yandex.ru.

Алексеев Артем Андреевич – инженер-конструктор, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: aaa0407@mail.ru.

Антамошкин Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.

Белозерцев Владимир Семенович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: belozerczev.v@yandex.ru.

Беляев Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Московский авиационный институт. E-mail: kaf202@mail.ru.

Бикеев Егор Вячеславович – инженер-конструктор, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: egorbikeev@rambler.ru.

Борисов Дмитрий Владимирович – студент, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dimbo2007@yandex.ru.

Браверман Владимир Яковлевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматического управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: braverman-vladimir@rambler.ru.

Бревнов Василий Григорьевич – аспирант кафедры менеджмента, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Tailor1991@mail.ru.

Бритова Юлия Александровна – кандидат технических наук, инженер по испытаниям второй категории, ОАО «Научно-производственный центр «Полус». E-mail: polus@online.tomsk.net.

Букреев Виктор Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: bukreev@tpu.ru.

Васильев Илья Сергеевич – аспирант НИ ТПУ, инженер-конструктор 3 категории отдела по разработке конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vasilyev_is@sibmail.com.

Вашлаев Иван Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории проблем освоения недр, Институт химии и химической технологии Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: vash49@gmail.com.

Вейсвер Татьяна Геннадьевна – старший преподаватель кафедры систем автоматического управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: veisver@mail.ru.

Великанов Дмитрий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук; заведующий лабораторией, Сибирский федеральный университет. E-mail: dponal@gmail.com.

Верхогляд Александр Григорьевич – заведующий лабораторией, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: verhog@tdis.nsc.ru.

Волкова Светлана Сергеевна – магистрант Института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Svetlana.volkova@mail@yandex.ru.

Выхристюк Игнат Александрович – младший научный сотрудник, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: uic@ngs.ru.

Герасимова Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента Торгово-экономического института, Сибирский федеральный университет. E-mail: elenasvo@mail.ru.

Гильц Надежда Евгеньевна – старший преподаватель кафедры логистики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: negilts@mail.ru.

Гирн Алексей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: girn007@gmail.com.

Гордеева Александра Толгатовна – доцент кафедры разговорного иностранного языка Института космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: alexandra-uk@mail.ru.

Горлевский Кирилл Игоревич – аспирант кафедры менеджмента, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kempf@sibsau.ru.

Губин Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». E-mail: gubinsv@d4.khai.edu.

Делков Александр Викторович – ассистент кафедры холодильной, криогенной техники и кондиционирования, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: delkov-mx01@mail.ru.

Денисова Анастасия Алексеевна – инженер-конструктор, ОАО «Научно-производственный центр «Полюс». E-mail: polus@online.tomsk.net.

До Мань Тунг – аспирант, Иркутская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: manhtungcvp@yahoo.com.

Должикова Екатерина Александровна – аспирант кафедры ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». E-mail: katerina.dolzhukova@yandex.ua.

Дорофеев Максим Олегович – начальник группы, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: magsau@mail.ru.

Ерыгин Юрий Владимирович – доктор экономических наук, профессор, первый проректор – проректор по образовательной деятельности, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Ерыгина Лилия Викторовна – доктор экономических наук, профессор, декан инженерно-экономического факультета, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: erigina@sibsau.ru.

Ефремов Сергей Валерьевич – заместитель начальника отдела разработки конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yefremov@iss-reshetnev.ru.

Карасева Маргарита Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и исследования операций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: karaseva-margarita@rambler.ru.

Ким Владимир Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ЭКМ НИ ТПУ, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. E-mail: kim_vs@rambler.ru.

Кишкин Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой холодильной, криогенной техники и кондиционирования, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: spsp99@mail.ru.

Ковалев Дмитрий Игоревич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: saor_sibsau@mail.ru.

Ковалев Дмитрий Сергеевич – инженер-программист, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева, аспирант кафедры защиты информации и криптографии, Национальный исследовательский Томский государственный университет. E-mail: dmisk@hotmail.com.

Ковалев Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, ректор, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: info@sibsau.ru.

Коломенцев Александр Иванович – кандидат технических наук, профессор, Московский авиационный институт. E-mail: kaf202@mail.ru.

Колчанов Игорь Петрович – ведущий инженер по наладке и испытаниям, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева; аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева.

Коплярова Надежда Владимировна – инженер, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kopyarovav@mail.ru.

Красненко Сергей Сергеевич – инженер, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева, аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: t_150@list.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Куденко Юрий Абрамович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: ykudenko@yandex.ru.

Кузнецов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kuznetsov@sibsau.ru.

Кузнецова Александра Сергеевна – научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alexakulch@rambler.ru.

Кукарцев Анатолий Викторович – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kempf@sibsau.ru.

Ладе Александра Вадимовна – преподаватель кафедры разговорного иностранного языка Института космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: withlady@yandex.ru.

Лапин Алексей Юрьевич – инженер-конструктор 2 категории, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Лапко Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук; профессор кафедры космических средств и технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: lapko@icm.krasn.ru.

Лапко Василий Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой космических средств и технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; ведущий научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: valapko@yandex.ru.

Леонардо Бартоломеу до Нассименто – магистр технических наук, стажер Московского авиационного института. E-mail: kaf202@mail.ru.

Личаргин Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры разговорного иностранного языка, Сибирский федеральный университет. E-mail: lichdv@hotmail.ru.

Лукьяненко Михаил Васильевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматического управления, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sibgau-sau@mail.ru.

Макаренко Настасья Олеговна – старший преподаватель кафедры бухгалтерского учета, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: makarenko_nastja@mail.ru.

Матыленко Михаил Геннадьевич – заместитель начальника отдела, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: mathylenko@iss-reshetnev.ru.

Мирзаев Роман Александрович – аспирант кафедры технической механики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ramirzaev@mail.ru.

Михеев Анатолий Егорович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: michla@mail.ru.

Мищенко Дарья Дмитриевна – магистрант Института космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: mddarja@gmail.com.

Монсо Даниэль – Habilitation (аналог доктора технических наук), руководитель исследований Национального центра научных исследований, Университет г. Тулузы, Институт Карно СИРИМАТ, Национальная высшая школа химии и химической технологии г. Тулузы. E-mail: daniel.monceau@ensiacet.fr.

Морозов Егор Андреевич – лаборант, Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук; магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: transserfer89@gmail.com.

Назаров Владимир Павлович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dla@sibsau.ru.

Недорезов Дмитрий Александрович – инженер, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева; аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Nd@iss-reshetnev.ru.

Некрасов Михаил Викторович – ведущий инженер-программист, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: diamond@iss-reshetnev.ru.

Непомнящий Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент, профессор, руководитель НУЛ МПС, кафедра вычислительной техники, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: 2955005@gmail.com.

Нестеров Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерного моделирования, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: misternester@gmail.com.

Нургалева Юлия Анатольевна – инженер кафедры САИО, магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: saor_nurgaleeva@sibsau.ru.

Окаб Джар – PhD (аналог кандидата технических наук), инженер Национального центра научных исследований, Университет г. Тулузы, Институт Карно СИРИМАТ, Национальная высшая школа химии и химической технологии г. Тулузы. E-mail: djar.oquab@ensiacet.fr.

Орлов Виктор Иванович – директор, ОАО «Испытательно-технический центр – НПО ПМ». E-mail: itenpopm@atomlink.ru.

Павлова Екатерина Олеговна – аспирант кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pavlova_89@mail.sibsau.ru.

Пакман Дмитрий Натанович – начальник сектора, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: packman@iss-reshetnev.ru.

Пичкалев Александр Валерьевич – начальник группы, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева.

Прокопович Дмитрий Алексеевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры логистики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: dmap@mail.ru.

Репецкий Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, президент, Восточно-Сибирский институт экономики и права. E-mail: repetskiy@vsier.ru.

Рыжиков Иван Сергеевич – аспирант Института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru.

Сарамуд Михаил Владимирович – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: saramud@bk.ru.

Саунин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Сафонов Константин Владимирович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной математики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kvsafonov@rambler.ru.

Селиванов Анатолий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: imanselivan@gmail.com.

Сенашов Владимир Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; ведущий научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук; профессор кафедры алгебры и математической логики, Сибирский федеральный университет. E-mail: sen1112home@mail.ru.

Сенашов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных экономических систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sen@sibsau.ru.

Сердюк Роман Сергеевич – аспирант кафедры менеджмента, Сибирский государственный аэрокосмический университет. E-mail: dodgers@mail.ru.

Смирнов Николай Анатольевич – доктор технических наук, профессор, директор НИИ ракетно-космической техники, заведующий кафедрой технической механики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: smirnov@sibsau.ru.

Соловьев Евгений Валерьевич – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: blackdeathangel@rambler.ru.

Стрельников Аркадий Владимирович – аспирант Института информатики и телекоммуникаций, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: arkstrelvlad@mail.ru.

Сунцов Сергей Борисович – кандидат технических наук, начальник отдела разработки конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева).

Суходоева Надежда Вячеславовна – аспирант кафедры прикладной механики Политехнического института, Сибирский федеральный университет. E-mail: me-zon@list.ru.

Тверяков Олег Викторович – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, ОАО «Научно-производственный центр «Полус». E-mail: polus@online.tomsk.net.

Телегин Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Тихомиров Александр Аполлинариевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией управления биосинтезом фототрофов, Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук; заведующий кафедрой замкнутых экологических систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

Ткачева Анастасия Александровна – аспирант кафедры ИВТ, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: tkacheva@mail.sibsau.

Товстоношенко Валентина Николаевна – доцент кафедры логистики, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: teachervalua@mail.ru.

Трифонов Сергей Викторович – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук; магистрант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

Трушкина Татьяна Владимировна – аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: Tatyana.si@mail.ru.

Турк Вивиан – PhD (аналог кандидата технических наук), преподаватель-исследователь, Университет г. Тулузы, Институт Карно СИРИМАТ, Университет Поль Сабатье. E-mail: turq@chimie.ups-tlse.fr.

Федорова Елена Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики Политехнического института, Сибирский федеральный университет. E-mail: fedorova.elena.85@gmail.com.

Федорова Наталья Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и компьютерной безопасности, Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: ran@akadem.ru.

Филишнина Елена Владимировна – ассистент кафедры информационных экономических систем, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: filyushina@sibsau.ru.

Халиманович Владимир Иванович – кандидат физико-математических наук, профессор, директор отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Хандорин Михаил Михайлович – аспирант, инженер-конструктор, ОАО «Научно-производственный центр «Полус». E-mail: m.khandorin@gmail.com.

Ходенков Алексей Александрович – ассистент кафедры холодильной, криогенной техники и кондиционирования, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: zed666-88@mail.ru.

Христич Валерий Васильевич – доцент кафедры космического машиностроения, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; главный специалист по тепловому вакуумным испытаниям, ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». E-mail: hristich@iss-reshetnev.ru.

Чаплина Альбина Николаевна – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры менеджмента Торгово-экономического института, Сибирский федеральный университет. E-mail: elenasvo@mail.ru.

Чувашова Мария Николаевна – аспирант кафедры финансов и кредита, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sadmari@rambler.ru.

Шайдуров Владимир Викторович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института космических исследований и высоких технологий, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева; директор Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: shaidurov04@mail.ru.

Шевляков Андрей Валерьевич – ведущий программист, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук. E-mail: ghost2613@mail.ru.

Шепетов Юрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего лабораторией микроспутникостроения, Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». E-mail: shepetov9@d4.khai.edu.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alekseenko Artem Andreevich – engineering designer, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: aaa0407@mail.ru.

Antamoshkin Alexander Nikolayevich – doctor of technical sciences, professor, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: oleslav@mail.ru.

Avramchikova Nadezhda Timofeevna – Doctor of Economics, associate professor, Professor of the Department of Finance and credits, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: avr-777@yandex.ru.

Belozertsev Vladimir Semenovich – Candidate of Engineering Science, associate professor, associate professor of the Department of Automatic Control System, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: belozerczev.v@yandex.ru.

Belyaev Evgeny Nikolaevich – Candidate of Engineering Science, associate professor, Moscow Aviation Institute. E-mail: kaf202@mail.ru.

Bikeev Egor Vyacheslavovich – engineering designer, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: egorbikeev@rambler.ru.

Borisov Dmitry Vladimirovich – a student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: dimbo2007@yandex.ru.

Braverman Vladimir Yakovlevich – Doctor of Engineering Science, associate professor, Professor of the Department of Automatic Control Systems, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: braverman-vladimir@rambler.ru.

Brevnov Vasily Grigoryevich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Tailor1991@mail.ru.

Britova Julia Aleksandrovna – Candidate of Engineering Science, test engineer of the second category, JSC “Scientific & Industrial Centre “Polyus”. E-mail: polus@online.tomsk.net.

Bukreev Viktor Grigoryevich – Doctor of Engineering Science, Professor, National research “Tomsk Polytechnic University”. E-mail: bukreev@tpu.ru.

Chaplina Albina Nikolaevna – Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Management of the Institute of Economics and Trade, Siberian Federal University. E-mail: elenasvo@mail.ru.

Chuvashova Maria Nikolaivna – postgraduate student of the Department of Finance and credits, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sadmari@rambler.ru.

Delcov Alexander Viktorovich – assistant of the Department of Refrigeration, air conditioning and cryogenic techniques, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: delkov-mx01@mail.ru.

Denisova Anastasia Alekseevna – engineer-designer, JSC “Scientific & Industrial Centre “Polyus”. E-mail: polus@online.tomsk.net.

Do Manh Tung – Postgraduate student, Irkutsk State Academy of Agriculture. E-mail: manhtungcvp@yahoo.com.

Dolzhikova Katerina Olexandrivna – postgraduate student of rocket-space engines and power plants of space crafts department, National Airspace University Named after N. E. Zhukovskiy ”Kharkov Aviation Institute”. E-mail: katerina.dolzhukova@yandex.ua.

Dorofeev Maksim Olegovich – director of a group, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: magsau@mail.ru.

Efremov Sergey Valeryevich – Deputy Head of the Department of On-board equipment construction design, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: yefremov@iss-reshetnev.ru.

Erygin Yuri Vladimirovich – Doctor of Economics, professor, the first vice rector, the vice rector on educational activity, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: yuri_erygin@mail.ru.

Erygina Lilia Viktorovna – Doctor of Economics, professor, dean of Engineering-economics department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: erigina@sibsau.ru.

Fedorova Elena Nikolaevna – Candidate of Engineering Science, associate professor, Department of Applied Mechanics, Polytechnic Institute of Siberian Federal University. E-mail: fedorova.elena.85@gmail.com.

Fedorova Natalya Alexandrovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, associate professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Security, Siberian Federal University. E-mail: ran@akadem.ru.

Filyushina Elena Vladimirovna – assistant of the Department of Information economic systems, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: filyushina@sibsau.ru.

Gerasimova Elena Aleksandrovna – Candidate of Economics, associate professor, associate professor of Management Department, Institute of Economics and Trade, Siberian Federal University. E-mail: elenasvo@mail.ru.

Gilts Nadezhda Evgenyevna – senior teacher of the Department of Logistics, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: negilts@mail.ru.

Girn Aleksei Vasilyevich – Candidate of Engineering Science, associate professor, associate professor of the Department of Flying vehicles, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: girn007@gmail.com.

Gordeeva Aleksandra Tolgatovna – associate professor of the Department of Conversational Foreign Language, Siberian Federal University. E-mail: alexandra-uk@mail.ru.

Gorlevsky Kirill Igorevich – postgraduate of Management Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kempf@sibsau.ru.

Gubin Sergii Victorovich – Candidate of Engineering Science, associate professor, Deputy head of the Department of Rocket-space engines and power plants of space crafts, National Airspace University Named after N. E. Zhukovskiy “Kharkov Aviation Institute”. E-mail: gubinsv@d4.khai.edu.

Hodenkov Aleksey Aleksandrovich – assistant of the Department of Refrigeration, air conditioning and cryogenic techniques, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: zed666-88@mail.ru.

Hristich Valery Vasilyevich – associate professor, chief specialist, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: hristich@iss-reshetnev.ru.

Karaseva Margarita Vladimirovna – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, associate professor of the Department of System and operation analysis, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: karaseva-margarita@rambler.ru.

Khalimanovich Vladimir Ivanovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Industrial Center for Large-Sized Foldable Mechanical Structures, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: office@iss-reshetnev.ru.

Khandorin Mikhail Mikhailovich – postgraduate student, JSC “Scientific & Industrial Centre “Polyus”. E-mail: m.khandorin@gmail.com.

Kim Vladimir Sergeevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of Electromechanical Systems and Materials Department, National Research “Tomsk Polytechnic University”. E-mail: kim_vs@rambler.ru.

Kishkin Alexander Anatolevich – Doctor of Engineering Science, Professor, head of the Department of Refrigeration, air conditioning and cryogenic techniques, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: spsp99@mail.ru.

Kolchanov Igor Petrovich – the chief engineer for adjustment and testing of JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”, postgraduate student of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev.

Kolomentsev Alexander Ivanovich – Candidate of Engineering Science, professor of Moscow Aviation Institute. E-mail: kaf202@mail.ru.

Koplyarova Nadezhda Vladimirovna – engineer, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: koplyarovav@mail.ru.

Kovalev Dmitry Igorevich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: saor_sibsau@mail.ru.

Kovalev Dmitry Sergeevich – software engineer, JSC “Information satellite system” named after academician M. F. Reshetnev”, graduate student of the Information Security and Cryptography Department, National Research Tomsk State University. Email: dmisk@hotmail.com.

Kovalev Igor Vladimirovich – Doctor of Engineering Science, rector, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: info@sibsau.ru.

Krasnenko Sergey Sergeevich – engineer of JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”, post-graduate student of Siberian Federal University. E-mail: t_150@list.ru.

Krushenko Gentry Gavrilovich – Doctor of Engineering Science, professor of the Department of Aircraft engines, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, chief researcher of the Institute of Computational Modeling of Siberian branch of Russian Academy of Sciences. E-mail: gentry@icm.krasn.ru.

Kudenko Yuri Abramovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, scientific researcher, Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Science. E-mail: ykudenko@yandex.ru.

Kukartsev Anatoly Viktorovich – Candidate of Economics, associate professor, associate professor of Management Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kempf@sibsau.ru.

Kuznetsov Alexander Alexeevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, Leading Researcher of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kuznetsov@sibsau.ru.

Kuznetsova Alexandra Sergeevna – Research Scientist, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: alexakulch@rambler.ru.

Lade Aleksandra Vadimovna – teacher of the Department of Conversational Foreign Language, Siberian Federal University. E-mail: withlady@yandex.ru.

Lapin Aleksei Yuryevich – the design engineer, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”.

Lapko Alexander Vasilyevich – Doctor of Engineering Science, professor, Leading researcher of Institute of Computational Modelling of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, professor of the Space craft and Technologies Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: lapko@icm.krasn.ru.

Lapko Vasily Alexandrovich – Doctor of Engineering Sciences, associate professor, Leading researcher of Institute of Computational Modelling of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, head of the Space craft and

Technologies Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: valapko@yandex.ru.

Lichargin Dmitry Victorovich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor of the Department of Conversational Foreign Language, Siberian Federal University. E-mail: lichdv@hotmail.ru.

Lukyanenko Mikhail Vasilyevich – Candidate of Engineering Sciences, Professor, head of Automatic Control Systems department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sibgau-sau@mail.ru.

Makarenko Nastasya Olegovna – senior teacher of Accounting Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: makarenko_nastja@mail.ru.

Matylenko Mikhail Gennadyevich – a deputy director of a department of JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: mathylenko@iss-reshetnev.ru.

Miheev Anatolii Egorovich – Doctor of engineering sciences, Professor, head of the Department of Flying vehicles, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: michla@mail.ru.

Mirzaev Roman Aleksandrovich – postgraduate student of Technical Mechanics, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: ramirzaev@mail.ru.

Mishchenko Darya Dmitrievna – Master’s Degree student, Siberian Federal University. E-mail: mddarja@gmail.com.

Monceau Daniel – Doctor of Engineering Science, director of the research centre CNRS (Directeur de Recherche CNRS), Université de Toulouse, Institut Carnot CIRIMAT. E-mail: daniel.monceau@ensiacet.fr.

Morozov Yegor Andreevich – laboratory technician, Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Science, Master’s Degree student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: transserfer89@gmail.com.

Nascimento Leonardo – Master’s degree student, Moscow Aviation Institute. E-mail: kaf202@mail.ru.

Nazarov Vladimir Pavlovich – Candidate of Engineering Sciences, professor, head of the Department of Flying vehicles, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: dla@sibsau.ru.

Nedorezov Dmitrii Aleksandrovich – programmer engineer, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: Nd@iss-reshetnev.ru.

Nekrasov Michael Viktorovich – software engineer, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems“. E-mail: diamond@iss-reshetnev.ru.

Nepomnyashy Oleg Vladimirovich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, professor of Laboratory of microprocessors system of Computer Science Department, Institute of Space and Information Technology, Siberian Federal University. E-mail: 2955005@gmail.com.

Nesterov Vladimir Anatolyevich – Candidate of Engineering Sciences, associate professor, associate professor of the Department of Computer modeling, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: misternester@gmail.com.

Nurgaleeva Yliya Anatoljevna – engineer, postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: saor_nurgaleeva@sibsau.ru.

Oquab Djar – Candidate of Engineering Science, engineer of the national centre of scientific researches (Ingénieur de Recherche), Université de Toulouse, Institut Carnot CIRIMAT. E-mail: djar.oquab@ensiacet.fr.

Orlov Viktor Ivanovich – director of JSC “TTC-NPO PM”. E-mail: itcnpopm@atomlink.ru.

Packman Dmitry Natanovich – head of sector, JSC “Academician M. F. Reshetnev “Information Satellite Systems“. E-mail: packman@iss-reshetnev.ru.

Pavlova Ekaterina Olegovna – postgraduate student of the Department of Finance and credit, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: pavlova_89@mail.sibsau.ru.

Pichkalev Aleksander Valerjevich – the chief of group, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”.

Prokopovich Dmitry Alekseevich – Candidate of Economics, associate professor, associate professor of Logistics department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: dmap@mail.ru.

Ryzhikov Ivam Sergeevich – postgraduate student of the Department of System analysis and operation research, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: ryzhikov-88@yandex.ru.

Repetskiy Oleg Vladimirovich – Doctor of Engineering Science, Professor, President of the East Siberian Institute of Economics and Law. E-mail: repetskiy@vsiep.ru.

Safonov Konstantin Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Applied Mathematics, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: kvsafonov@rambler.ru.

Saramud Mikhail Vladimirovich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: saramud@bk.ru.

Saunin Viktor Nikolaevich – Candidate of Economic Sciences, associate professor, Leading researcher, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Selivanov Anatoly Vasilevich – Candidate of Engineering Science, associate professor, associate professor of Logistics department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: imanselivan@gmail.com.

Senashov Sergey Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, head of the Department of Information economic systems, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sen@sibsau.ru.

Senashov Vladimir Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, Leading researcher of Institute of Computational Modelling of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, associate professor of the Department of Information economic systems, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: sen1112home@mail.ru.

Serdyuk Roman Sergeevich – postgraduate student of the Management Department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: dodgesrs@mail.ru.

Shaidurov Vladimir Viktorovich – Corresponding member of Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of Institute of Space Research and High Technologies of Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev; Director of Institute of Computational Modeling of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. E-mail: shaidurov04@mail.ru.

Shepetov Yurii Alekseevich – Candidate of Engineering Science, associate professor of Rocket-space engines and power plants of space crafts department, Deputy Laboratory Chair of microsatellite designing, National Airspace University Named after N. E. Zhukovskiy “Kharkov Aviation Institute”. E-mail: shepetov9@d4.khai.edu.

Shevlyakov Andrei Valeryevich – senior programmer, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. E-mail: ghost2613@mail.ru.

Smirnov Nikolay Anatolyevich – Doctor of Engineering Science, professor, director of the Institute of rocket and space technology, Head of the Department of Technical Mechanics, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: smirnov@sibsau.ru.

Solovjev Evgeny Valerjevich – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: blackdeathangel@rambler.ru.

Strelnikov Arkadiy Vladimirovich – Postgraduate student of Institute of Computer Science and Telecommunications, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: arkstrelvlad@mail.ru.

Sukhodoeva Nadezhda Vyacheslavovna – postgraduate student, the Department of Applied Mechanics, Polytechnic Institute of Siberian Federal University. E-mail: me-zon@list.ru.

Suntsov Sergey Borisovich – Candidate of Engineering Science, head of the Department of On-board equipment construction design, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”.

Telegin Sergey Vladimirovich – Candidate of Economic Sciences, associate professor, senior researcher, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Tikhomirov Alexander Apollinariyevich – Doctor of Sciences (Biology), Professor, Head of laboratory of Phototrophic Biosynthesis Control, Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Science, Head of chair of Closed EcoSystems, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

Tkacheva Anastasia Alexandrovna – Postgraduate student of the Department of Computer Science and Engineering, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: tkacheva@mail.sibsau.

Tovstonoshenko Valentina Nikolaevna – associate professor of Logistics department, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: teachervalua@mail.ru.

Trifonov Sergei Viktorovich – Candidate of Sciences (Biology), junior researcher, Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Science, Master’s Degree student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: trifonov sergei@inbox.ru.

Trushkina Tatiana Vladimirovna – postgraduate student, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Tatyana.si@mail.ru.

Turq Viviane – Candidate of Engineering Science, research instructor (Enseignant-Chercheur), Université de Toulouse, Institut Carnot CIRIMAT, Université Paul Sabatier. E-mail: turq@chimie.ups-tlse.fr.

Tveryakov Oleg Viktorovich – Candidate of Engineering Science, Deputy head of the department, JSC “Scientific & Industrial Centre “Polyus”. E-mail: polus@online.tomsk.net.

Vashlaev Ivan Ivanovich – Candidate of Engineering Science, senior staff scientist, laboratory of problems the bowels of the earth of Institute of Chemistry and Chemical Technology RAS (Sib. Div.). E-mail: vash49@gmail.com.

Vasilyev Ilya Sergeevich – postgraduate of National research “Tomsk Polytechnic University”, Department of on-board equipment construction design, designer-engineer, JSC “Information Satellite System” named after academician M. F. Reshetnev”. E-mail: vasilyev_is@sibmail.com.

Veisver Tatyana Gennadyevna – senior lecturer of the Department of Automatic Control Systems, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: veisver@mail.ru.

Velikanov Dmitry Anatolyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, senior scientific researcher, Institute of Physics named after L. V. Kirensky, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, head of the laboratory, Siberian Federal University. E-mail: dponal@gmail.com.

Verkhoglyad Aleksander Grigoryevich – head of laboratory, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. E-mail: verhog@tdisie.nsc.ru.

Volkova Svetlana Sergeevna – Master’s Degree student, Institute of Computer Science and Telecommunications, Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. E-mail: Svetlana.volkova@mail.yandex.ru.

Vykhristyuk Ignat Aleksandrovich – junior scientific worker, Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. E-mail: uic@ngs.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел 1. МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Борисов Д. В., Лапко А. В., Лапко В. А. Зависимость свойств регрессионной оценки плотности вероятности от особенностей методики её синтеза	4
Волкова С. С. Отбор информативных признаков с помощью гибридного самонастраивающегося эволюционного алгоритма оптимизации	7
Ковалев Д. И., Сарамуд М. В., Карасева М. В., Нургалеева Ю. А. Развитие методов эквивалентного преобразования ГЕРТ-сетей для анализа мультиверсионного программного обеспечения	11
Ковалев Д. С. Реализация на ПЛИС шифра Закревского на основе перестраиваемого автомата	16
Ковалев И. В., Карасева М. В., Соловьев Е. В. Модификация муравьиного алгоритма для задачи формирования мультиверсионного программного обеспечения	19
Коплярова Н. В., Орлов В. И. Об исследовании компьютерной системы диагностики электрорадиоизделий на основе данных испытаний	24
Красненко С. С., Пичкалев А. В., Недорезов Д. А., Лапин А. Ю., Непомнящий О. В. Способы реализации имитаторов радионавигационных сигналов	30
Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. Параллельный алгоритм для исследования графов Кэли групп подстановок	34
Лапко А. В., Лапко В. А., Борисов Д. В. Непараметрическая оценка кривой регрессии в условиях больших выборок	39
Личаргин Д. В., Сафонов К. В., Ладе А. В., Мищенко Д. Д., Гордеева А. Т. О функции плановых языков на современном этапе и их применении в качестве языков нетерминальных символов порождающих грамматик	44
Некрасов М. В., Пакман Д. Н., Антамошкин А. Н. Методы унификации современных средств обработки телеметрической информации в центрах управления полётами космических аппаратов	48
Нестеров В. А. Расчет заземленной балки, податливой при трансверсальном сдвиге, методом Ритца	54
Репецкий О. В., До Мань Тунг. Исследование характеристик колебаний рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров на основе моделирования уменьшенного порядка методом конечных элементов	60
Рыжиков И. С. Автоматическая идентификация линейных дифференциальных уравнений в аналитическом виде	66
Саунин В. Н., Телегин С. В. Исследования ферромагнитных порошков и покрытий на их основе	72
Сенашов В. И. Взаимоотношения почти слойно конечных групп с близкими классами	76
Сенашов С. И., Филюшина Е. В. Законы сохранения уравнений плоской теории упругости	79
Стрельников А. В. О модели активной системы	82
Ткачева А. А. Применение алгоритма Space Colonization при трехмерном моделировании сложных природных объектов	85
Федорова Н. А. Математическое моделирование предельных деформаций плоских конструкций, армированных вдоль криволинейных траекторий	91
Хандорин М. М., Букреев В. Г. Оценка остаточной емкости литий-ионного аккумулятора на основе эталонной модели	94
Шайдуров В. В. Другой сценарий тунгусских событий 1908 года	97

Раздел 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Алексеев А. А., Бикеев Е. В., Дорофеев М. О., Лукьяненко М. В., Матыленко М. Г. Система наведения крупногабаритной трансформируемой антенны	104
Беляев Е. Н., Коломенцев А. И., Насименто Л. Б., Назаров В. П. Влияние конструктивных параметров регулятора расхода на его статические и динамические характеристики	109
Васильев И. С., Сунцов С. Б., Ефремов С. В., Ким В. С. Проведение испытаний обжимных электрических соединений в бортовой кабельной сети космического аппарата с целью определения их характеристик	114
Губин С. В., Шепетов Ю. А., Должикова Е. А. Рациональное размещение фотоэлектрических батарей на микроспутниках дистанционного зондирования земли	119
Денисова А. А., Тверяков О. В., Бритова Ю. А. Разработка методики определения возмущающих моментов управляемых двигателей-маховиков на силоизмерительном стенде	124
Кишкин А. А., Колчанов И. П., Делков А. В., Ходенков А. А. К вопросу повышения чувствительности локальных методов контроля герметичности для изделий ракетно-космической техники	127

Недорезов Д. А., Пичкалев А. В., Красненко С. С., Непомнящий О. В. Применение ПЛИС для моделирования логики функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов	133
Шевляков А. В., Выхристюк И. А., Верхогляд А. Г., Халиманович В. И., Христич В. В. Автоматизированная система управления тепловыми потоками при проведении тепловакуумных испытаний космических аппаратов	137

Раздел 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Браверман В. Я., Вейсвер Т. Г., Белозерцев В. С. Слежение за стыком при электронно-лучевой сварке в атмосфере	142
Великанов Д. А. Автоматизированный вибрационный магнитометр с электромагнитом конструкции Пузея	147
Крушенко Г. Г. Технологии и механизм формирования пенометаллов и их применение в летательных аппаратах II	154
Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А. Система автоматического управления сервоприводами	161
Морозов Е. А., Трифонов С. В., Куденко Ю. А., Тихомиров А. А. Исследование влияния частоты и формы тока в растворе на распад H_2O_2 при минерализации органических отходов в замкнутых истемах жизнеобеспечения	164
Саунин В. Н., Телегин С. В. Плазмонапыленные ферритовые покрытия	168
Суходоева Н. В., Федорова Е. Н., Турк В., Монсо Д., Окаб Д. Определение физико-механических свойств защитного оксидного слоя методом наноиндентирования	174
Трушкина Т. В., Михеев А. Е., Гирн А. В. Коррозионная стойкость МДО покрытий в агрессивных средах	179

Раздел 4. ЭКОНОМИКА

Аврамчикова Н. Т., Чувашова М. Н. Инструменты оценки технологического состояния отраслей экономики ресурсно-ориентированного региона	186
Бревнов В. Г., Ерыгина Л. В. Роль инновационного потенциала в развитии предприятий оборонно-промышленного комплекса	190
Горлевский К. И., Кукарцев А. В. Регламентация инновационных бизнес-процессов предприятия ракетно-космической промышленности	194
Ерыгина Л. В., Гильц Н. Е. Инструменты контроллинга производства гражданской продукции на машиностроительном предприятии ОПК	198
Ерыгин Ю. В., Павлова Е. О. Задачи инновационного планирования на предприятиях оборонно-промышленного комплекса: декомпозиция и иерархия	204
Ерыгина Л. В., Сердюк Р. С. Состояние российской ракетно-космической промышленности и тенденции её развития	207
Макаренко Н. О. Стратегическое планирование инновационного развития предприятий ракетно-космической промышленности: показатели и методы	212
Селиванов А. В., Прокопович Д. А., Вашлаев И. И. Сбалансированная подсистема показателей возвратной логистики промышленного предприятия	218
Товстоношенко В. Н. Методологический подход к управлению рисками на предприятиях ракетно-космической промышленности	225
Чаплина А. Н., Герасимова Е. А. Адаптивно-инновационное управление предпринимательскими структурами с учетом драйв-факторов бизнес-среды	229
Сведения об авторах	236

CONTENTS

Part 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Borisov D. V., Lapko A. V., Lapko V. A. Dependence of the regression estimator properties of a probability density on singularities of its synthesis technique	4
Volkova S. S. Informative attribute selection with hybrid self-adjusted evolutionary optimization algorithm	7
Kovalev D. I., Saramud M. V., Karaseva M. V., Nurgaleeva Yu. A. Development of the equivalent transformation of GERT-networks methods for multiversion software analysis	11
Kovalev D. S. FPGA implementation of the Zakrevskij's cipher based on reconfigurable FSM	16
Kovalev I. V., Karaseva M. V., Solovyev E. V. Ant algorithm modification for the problem of multiversion software formation	19
Koplyarova N. V., Orlov V. I. About research of radio-electronic equipment diagnostics computer system on the basis of experimental data	24
Krasnenko S. S., Pichkalev A. V., Nedorezov D. A., Lapin A. U., Nepomnyashchy O. V. Methods of realizations of satellite radionavigation system simulators	30
Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. A parallel algorithm for study of the Cayley graphs of permutation groups	34
Lapko A. V., Lapko V. A., Borisov D. V. Nonparametric estimation of regression curves in the conditions of large samples	39
Lichargin D. V., Safonov K. V., Lade A. V., Mishchenko D. D., Gordeyeva A. T. About the function of planned languages at the present time and their application as the languages of non-terminal symbols of generative grammars	44
Nekrasov M. V., Packman D. N., Antamoshkin A. N. Unification methods of present telemetry processing systems in satellite control centers	48
Nesterov V. A. Analysis of shear flexible beam with both clamped ends by Ritz method	54
Repetskiy O. V., Do Manh Tung. Study of characteristics of vibrations of mistuned bladed disks of turbomachines on the basis of reduced-order modeling by finite element method	60
Ryzhikov I. S. Automatic linear differential equation identification in analytical form	66
Saunin V. N., Telegin S. V. Research of ferromagnetic powder and the coatings on their basis	72
Senashov V. I. Relationships of the almost layer finite groups with similar group classes	76
Senashov S. I., Filyushina E. V. Conservation laws equations plane theory of elasticity	79
Strelnikov A. V. About the model of the active system	82
Tkacheva A. A. Space Colonization algorithm application in three-dimensional modeling of complex natural objects	85
Feodorova N. A. Mathematical modelling for extreme deformations of planar constructions reinforced with curvilinear trajectories	91
Khandorin M. M., Bukreev V. G. Evaluation of lithium-ion battery discharge capacity based on the reference model	94
Shaidurov V. V. Another scenario of Tunguska events in 1908	97

Part 2. AVIATION AND SPACE-ROCKET ENGINEERING

Alekseenko A. A., Bikeev E. V., Dorofeev M. O., Luk'janenko M. V., Matylenko M. G. The guidance system of large flexible antenna	104
Beliaev E. N., Kolomentsev A. I., Nascimento L. B., Nasarov V. P. Influence of design parameters of a flow regulator on its static and dynamic characteristics	109
Vasilyev I. S., Suntsov S. B., Efremov S. V., Kim V. S. Testing of crimped electric connections in on-board DC harness of spacecraft for determination of their properties	114
Gubin S. V., Shepetov Yu. A., Dolzhukova E. A. Rational photovoltaic batteries mounting on the earth remote sensing microsatellite	119
Denisova A. A., Tveryakov O. V., Britova J. A. Development of disturbance moments definition method for working reaction flywheels assemblies installed on the special forces measuring stand	124
Kishkin A. A., Kolchanov I. P., Delkov A. V., Hodenkov A. A. The problem of increasing the sensitivity of local control methods for tightness products of rocket and space technology	127
Nedorezov D. A., Pichkalev A. V., Krasnenko S. S., Nepomnuashy O. V. Application FPGA for modelling of logic of functioning of spacecraft onboard radio-electronic equipment	133
Shevlyakov A. V., Vykhristyuk I. A., Verkhoglyad A. G., Khalimanovich V. I., Hristich V. V. Automated control system of heat fluxes at thermovacuum testing of spacecrafts	137

Part 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Braverman V. Ya., Veisver T. G., Belozertsev V. S. Seam tracking during electron beam welding in air	142
Velikanov D. A. Automated vibrating sample magnetometer with Puzey electromagnet	147
Krushenko G. G. The technologies and mechanism of forming the foam metals and its use on aircrafts II	154
Mirzaev R. A., Smirnov N. A. Automated control system of manipulator	161
Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A. Researching the influence of current form and frequency in solution on H ₂ O ₂ disassimilation during organic wastes mineralization in closed life support systems	164
Saunin V. N., Telegin S. V. Plasma spraying ferrite coverings	168
Suhodoeva N. V., Fedorova E. N., Turq V., Monceau D., Oquab D. Determination of the physico-mechanical properties of the protective oxide scale by nano-indentation	174
Trushkina T. V., Miheev A. E., Girne A. V. Corrosion coatings MDO composition in aggressive environments	179

Part 4. ECONOMICS

Avramchikova N. T., Chuvashova M. N. Estimating tools of the technological state of the economic branches in the region which focuses on resources	186
Brevnov V. G., Erygina L. V. Innovative potential role for the development of the defense industry enterprises	190
Gorlevsky K. I., Kukartsev A. V. Rulemaking of innovative business-processes of space-rocket industry enterprise	194
Erygina L. V., Gilts N. E. Production monitoring tools of the civilian goods on the engineering enterprise of DIC	198
Erygin Yu. V., Pavlova E. O. The problem of innovative planning of enterprises in the military-industrial complex: functional decomposition and hierarchy	204
Erygina L. V., Serdyuk R. S. Growth trends of Russian space industry	207
Makarenko N. O. Strategic planning of innovative development the enterprises of SRI: indicators and methods	212
Selivanov A. A., Prokopovich D. A., Vashlayev I. I. The balanced subsystem of indicators of returnable logistics of the industrial enterprise	218
Tovstonoshenko V. N. Methodological approach to risk management at the enterprises of the rocket and space industry	225
Chaplina A. N., Gerasimova E. A. Adaptive and innovative management enterprise structures in the view of business environment drive factor	229
Information about the authors	241

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 статьей 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.

Количество ссылок в статье ограничивается до 15, самоцитирований – до 5–10, кроме обзорных статей, заказанных редакцией.

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 подписную 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* 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), pp. 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 Cove resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i*

* Транслитерация – перевод одной графической системы алфавита в другую (то есть передача букв одной письменности буквами другой). Пример Т.: немецкий Schiller – русский «Шиллер».

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. Выходные 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 “ovye 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, pp. 267–272.

В переводных журналах ссылки на публикации в материалах конференций даются либо вообще без их заглавий докладов, 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 rezervirovaniye 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 modelirovaniye 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.