ВЕСТНИК

Сибирского государственного
аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 5(45)

Красноярск 2012

ВЕСТНИК

Сибирского государственного аэрокосмического университета
имени академика М. Ф. Решетнева

Выпуск 5(45)

Главный редактор
доктор технических наук
Ковалев И. В.

Заместители главного редактора:
доктор физико-математических наук
Логинов Ю. Ю.

доктор физико-математических наук
Сенашов С. И.

доктор технических наук
Михеев А. Е.

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

Редакционная коллегия:
Аплеснин С. С.
Головенкин Е. Н.
Ерыгин Ю. В.
Краев М. В.
Лаптенок В. Д.
Ловчиков А. Н.
Медведев А. В.
Москвичев В. В.
Сафонов К. В.
Смирнов Н. А.
Сомов В. Г.

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

© Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2012

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 каталоги:
российской 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

Редакторы Т. Е. Ильющенко, Е. Г. Некрасова, Т. А. Ермолаева, О. А. Кругликова
Редактор английского текста А. Г. Никитина
Оригинал-макет и верстка Е. К. Бурнакова
Подписано в печать 25.12.2012. Формат 70×108/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Усл. печ. л. 30,3.
Уч.-изд. л. 40,0. Тираж 1000 экз. Заказ 87/174. С 192/12.
Редакционно-издательский отдел
Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
660014, г. Красноярск,
просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.
Отпечатано в типографии ИП Суховольской Ю. П.
660125, г. Красноярск, ул. Водопьянова, 2-241

К 70-летию КРАЕВА Михаила Васильевича

Краев Михаил Васильевич – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, заслуженный работник высшей школы Красноярского края, почетный работник высшего образования РФ, ведущий профессор Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева (СибГАУ).

На протяжении более пятидесяти лет его жизнь связана с Красноярским машиностроительным заводом и заводом-втузом – филиалом Красноярского политехнического института (ныне СибГАУ), который он с отличием окончил в 1967 г.

За время обучения М. В. Краев освоил профессии токаря, слесаря-сборщика, техника-конструктора. После окончания института М. В. Краев был оставлен на выпускающей кафедре М-2 (ныне кафедра двигателей летательных аппаратов (ДЛА)) для научно-педагогической работы. С 1968 по 1972 гг. являлся аспирантом Московского авиационного института, где он учился у выдающихся ученых – профессоров Б. В. Овсянникова, В. А. Целикова, В. Д. Курпатенкова, А. С. Шапиро и др.

С января 1974 г. по июль 2009 г. – заведующий кафедрой ДЛА СибГАУ.

Научные и педагогические интересы М. В. Краева связаны с разработкой теории, моделей и методов расчета малорасходных систем и турбомашин систем подачи в двигательных установках и энергетических контурах космических аппаратов. Труды профессора М. В. Краева – а это более 60 авторских свидетельств и патентов, 13 монографий, 26 учебных пособий (9 из них с грифом УМО вузов РФ) и 4 учебника для студентов аэрокосмических вузов, написанные в соавторстве – широко известны в нашей стране и за рубежом. В частности, учебник «Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей» в 1995 г. был издан в КНР.

В 1992 г. М. В. Краев был командирован Минвузом СССР в КНР для чтения лекций в Пекинском университете астронавтики и аэронавтики.

Научная школа профессора М. В. Краева «Ракетно-космические и энергодвигательные установки и системы терморегулирования» базируется на плодотворной связи с ведущими ОКБ и предприятиями ракетно-космической отрасли России, благодаря чему на базе этой школы было подготовлено 28 кандидатов и 5 докторов наук.

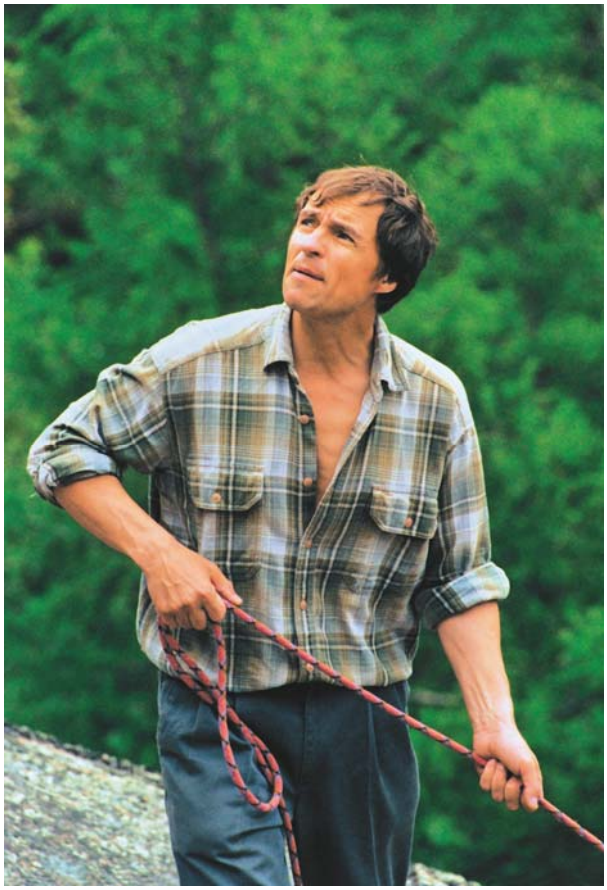
Михаил Васильевич много энергии и сил уделяет общественной деятельности. С 1994 по 2006 гг. он являлся членом экспертного совета Красноярского краевого фона науки, а с 2006 г. – председателем экспертного совета (по техническим наукам) именных стипендий Красноярского края. Член редколлегии журналов: с 1994 г. – «Известия вузов. Авиационная техника», с 2001 г. – «Вестник СибГАУ». С 2002 г. – организатор и руководитель ежегодной школы-семинара «Двигатели, энергетические установки и системы терморегулирования».

Результаты научной и научно-педагогической деятельности М. В. Краева отмечены рядом правительственных наград и медалей Федерации космонавтики России, почетными грамотами Министерства общего машиностроения СССР, губернатора Красноярского края и командующего РВСН. Он лауреат стипендий Президиума РАН «Выдающийся ученый России» в области энергетики (2000–2003), премии конкурса учебников для аэрокосмических вузов имени 25-летия МАИ.

Высоким общественным признанием заслуг Михаила Васильевича является избрание его действительным членом (академиком) Российской академии естественных наук, Академии космонавтики имени К. Э. Циолковского и Международной академии наук высшей школы.

Редколлегия журнала «Вестник СибГАУ» и весь коллектив Сибирского государственного аэрокосмического университета поздравляют Михаила Васильевича со знаменательной датой и желают ему здоровья, счастья и новых творческих успехов в его многогранной деятельности.

К 60-летию СЕНАШОВА Сергея Ивановича



Сенашов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор.

После окончания математического факультета Красноярского государственного университета в 1975 г. он как один из лучших выпускников остался работать в родном вузе и прошел весь путь, начиная с ассистента и старшего преподавателя до доцента, профессора. Заведовал кафедрами в Сибирском государственном технологическом университете и Красноярском государственном торгово-экономическом институте.

В Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева Сергей Иванович пришел в 2004 г. Работал проректором по науке, в настоящее время – заведующий кафедрой информационных экономических систем.

С. И. Сенашов является руководителем магистерской программы и направления, председателем диссертационного совета по защитам докторских диссертаций, а также членом 3 диссертационных советов. Под его руководством защищены 1 докторская и 12 кандидатских диссертаций.

С. И. Сенашов – автор более 90 научных статей и 7 монографий, член редколлегий ряда научных журналов, заместитель главного редактора журнала «Вестник СибГАУ», член национального комитета по теоретической и прикладной механике. Ему присвоено звание «Почетный работник высшего образования РФ».

Под руководством С. И. Сенашова выполняются исследования, поддержанные российскими и краевым научными фондами.

Много лет Сергей Иванович занимается альпинизмом. Был чемпионом России, а сейчас совершает восхождения на красноярские Столбы.

Редколлегия журнала «Вестник СибГАУ» и весь коллектив Сибирского государственного аэрокосмического университета от всей души поздравляют Сергея Ивановича с 60-летием, желают ему крепкого здоровья, успехов в науке и покорения новых вершин!

Раздел
1

МАТЕМАТИКА, МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

УДК 533.6.011.72

А. Л. Адрианов

О ДОПУСТИМЫХ ГРАНИЦАХ В ЗАДАНИИ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ЗА СКАЧКОМ УПЛОТНЕНИЯ

Исследуется влияние краевого эффекта за скачком уплотнения на эволюцию данного скачка, проникающего в сдвиговый слой. Выявляются допустимые границы в задании краевого эффекта. Вводятся понятия инварианта и угла Ускова.

Ключевые слова: сильный и слабый газодинамические разрывы, скачок уплотнения, обобщенные соотношения (условия) на скачке, краевой эффект, угол Маха, угол Ускова.

Рассмотрим задачу о проникновении скачка уплотнения (СУ) в сдвиговый слой (СС) невязкого [1–3] или вязкого теплопроводного газа при больших числах Рейнольдса [3–5]. Криволинейный СУ схематизируем поверхностью сильного газодинамического разрыва, на которой выполняются либо обычные, либо обобщенные соотношения нулевого и первого порядков, асимптотически учитывающие действие фактора вязкости–теплопроводности (ВТ) в приближении СС; в газодинамическом отношении эти соотношения являются точными.

Приведем компактную матричную запись обобщенных дифференциальных соотношений (ОДСС) [3–5], выполняющихся на таком СУ (рис. 1):

$$a_{ij}\left(\hat{\Phi}_j\right)_{\hat{n}} + b_i K_w + c_{ij}\left(\Phi_j\right)_n + d_i\frac{\delta}{y} + \varepsilon^2 \times$$
$$\times\left[e_{ij}\left(\hat{\Phi}_j\right)_{\hat{n}\hat{n}} + f_i K_w' + g_{ij}\left(\Phi_j\right)_{nn} + N_i\right] = 0, \qquad (1)$$

где $\Phi = \left(W, \theta, p, h\right)^T$, здесь p – давление, h – энтальпия, θ и $\hat{\theta}$ – углы наклона линии тока к оси OX декартовой (цилиндрической) системы координат XOY до и за СУ соответственно; $\delta = 0$ $(\delta = 1)$; $\varepsilon^2 = \left(\mathrm{Re}_\infty\right)^{-1}$;

$$N_i = N_i\left(\left(\hat{\Phi}_j\right)_{\hat{n}}, \left(\Phi_j\right)_n, \hat{\Phi}_j, \Phi_j, K_w\right);\ i, j = 1, \ldots, 4.$$

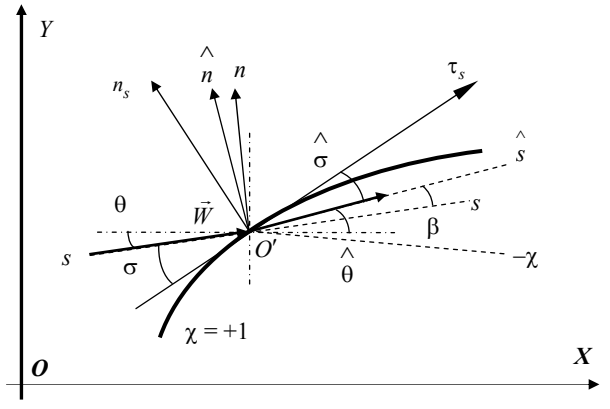


Рис. 1. Системы собственных координат, связанные со скачком уплотнения и линией тока

В (1) применено суммирование по повторяющемуся индексу j; величины K_w и $K_w' = \dfrac{d^2\Omega}{dw^2}$, где $w = \tau$ – координата в продольном к СУ направлении (в отличие от модуля скорости W); $\Omega = \theta + \sigma \equiv \hat{\theta} + \hat{\sigma}$, представляют собой продольную кривизну СУ (в отличие от радиальной кривизны $1/y$ в осесимметричном случае) и производную от нее; вектор **N** явно объединяет нелинейные слагаемые; все производные представлены в локальной системе естественных (собственных) координат (s, n) – до СУ, $(\hat{s}, \hat{n})$ – за СУ, причем первые считаются известными. Предполагается, что все величины являются безразмерными.

Острый угол σ между вектором скорости $\vec{W}$ и СУ, т. е. между $\vec{s}$ и $\vec{\tau}_s$ (см. рис. 1), показывает интенсивность СУ: $|\sigma| \geq \alpha_\mathrm{M}$, где $\alpha_\mathrm{M} = \arcsin\left(1/\mathrm{M}\right)$ – угол Маха, а знак χ этого угла определяет семейство, к которому принадлежит СУ (характеристика при $\sigma = \chi\alpha_\mathrm{M}$) в предельном невязком случае ($\varepsilon^2 = 0$ в (1)).

Функциональные матрицы (векторы) коэффициентов **A**–**G** сложным образом зависят от газодинамических величин по обе стороны СУ. В невязком случае **A**–**D** в (1) после соответствующих допустимых преобразований в точности приводятся к аналогичным коэффициентам, полученным в [1], где использована другая группа зависимых переменных.

Практическое применение ОДСС (1) предполагает их замыкание, для чего требуется задать какую-либо из производных за СУ или их комбинацию, т. е. определить краевой эффект (КЭ) за СУ. В качестве такой комбинации может быть использована дополнительная дифференциальная связь, в частности, исключающая КЭ [2–5]. Необходимость введения термина «краевой эффект» вызвана прежде всего нестандартной (не краевой) постановкой задачи для исследуемого стационарного ударного течения и лишь частичным смысловым совпадением с общепринятым термином «краевое (граничное) условие», обычно используемым при решении краевых (начально-краевых) задач. Краевой эффект за СУ имеет производный смысл от термина «краевое условие» приме-

нительно к задней поверхности скачка; КЭ имеет отношение к продолженной системе соответствующих законов сохранения и необходим для замыкания соотношений первого порядка на СУ; КЭ может совпадать или не совпадать с реальным краевым условием того же порядка, например когда СУ оказывается присоединенным к границе области; КЭ имеет смысл локального источникового члена в каждой расчетной точке задней поверхности СУ.

Такая постановка задачи позволяет рассматривать фронт СУ, проникающий в слой идеального или вязкого теплопроводного газа, как траекторию условной материальной частицы в подходе Лагранжа и произвести редукцию исходной начально-краевой задачи для уравнений в частных производных Эйлера или Навье–Стокса к задаче Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений [3–5]. Система (1) нелинейных (относительно первых производных за СУ) уравнений после ее замыкания может быть проинтегрирована без приведения к нормальному виду по причине отсутствия старших производных в первом уравнении системы – законе сохранения массы, для чего разработаны эффективные итерационные методы [5]. Существенно, что в процессе интегрирования указанной системы удается обходиться без поточечной постановки обобщенных или обычных условий на скачке: эти условия с высокой точностью будут выполняться уже автоматически, что существенно отличает данный подход от других. Постановка этих условий требуется только в начальной точке СУ, откуда начинается его эволюция. Используя математический язык сплайн-функций, можно сказать, что локально применяемый аналитический аппарат в виде ОДСС (1) в гладком представлении фронта СУ позволяет перейти к сплайну более высокого – третьего порядка, т. е. к кусочно-кубическому представлению скачка.

В предельном невязком случае (при $\varepsilon^2 = 0$ в (1)) ОДСС переходят в невязкие дифференциальные соотношения (ДС), но проблема, связанная с их замыканием, сохраняется, поэтому вполне разумно поиск недостающего уравнения, определяющего КЭ, осуществить вначале в более простой постановке – при отсутствии фактора ВТ. В этом случае после замыкания ДС полученная система линейных уравнений становится однозначно разрешимой относительно производных за СУ и его кривизны уже в аналитическом виде, при этом итерации не требуются.

Обобщив возможные КЭ за СУ, представим расширенную дифференциальную связь, с помощью которой $\hat{p}_{\hat{n}}$ исключается из (1), в виде

$$\begin{aligned} &\hat{p}_{\hat{s}} + b \cdot \hat{m}^{-\chi} \cdot \hat{p}_{\hat{n}} = c, \\ &\hat{m}^{-\chi} = \frac{-\chi}{\sqrt{\hat{\mathrm{M}}^2 - 1}} = -\chi \operatorname{tg}(\hat{\alpha}_{\mathrm{M}}), \end{aligned} \qquad (2)$$

где b и c – параметры связи; $\hat{\alpha}_{\mathrm{M}}$ – угол Маха за СУ.

При подстановке (2) в (1) подразумевается, что тангенциальная производная от давления $\hat{p}_{\hat{s}}$ в (2) заменена через уравнения Эйлера (УЭ) нормальной производной от угла наклона $\hat{\theta}_{\hat{n}}$. Таким образом, количество компонент неизвестного вектора производных $\mathbf{X} = \left(\hat{W}_{\hat{n}}, \hat{\theta}_{\hat{n}}, K_w, \hat{h}_{\hat{n}} \right)^T$ в (1) становится равным количеству уравнений и при невырожденности матрицы $\mathbf{A} = \left(a_{i,j=1,2}, b_i, a_{i4} \right)_{i=1\ldots4}$ система будет однозначно разрешимой, при этом предполагается, что матрица уже преобразована подстановкой (2), исключающей $\hat{p}_{\hat{n}}$ как неизвестную величину.

Коэффициент $\hat{m}^{-\chi}$ в (2) выбран не случайно, поскольку в работе [2] строго доказано, что случай $b = 1$, $c = 0$ (это случай изобарической связи) точно соответствует рефракционной модели и догоняющие (СУ) возмущения здесь отсутствуют. Этот коэффициент фиксирует за СУ наклон характеристики противоположного ему семейства и, таким образом, (2) означает равенство нулю полной производной от давления в указанном направлении или локальную для точек на задней поверхности СУ изобаричность в данном направлении. Здесь важно отметить, что малые отклонения значений параметра b от единицы также приводят к малым отклонениям возмущенного таким образом решения. В этом случае изобарическая форма задания КЭ за СУ удобна по причине явного задания наклона изобары за скачком, а не какой-либо из производных за ним. Очевидно, что с помощью управления параметрами b и c ($b \neq 0$ по техническим соображениям) могут быть определены все возможные КЭ за СУ, включая реальные, когда известны кривизна стенки, от которой отражается СУ, или закон изменения давления вдоль границы перерасширенной струи [2].

Случай $c = 0$, $b \approx -1$ представляется важным и требует дополнительного рассмотрения. Как показано В. Н. Усковым [1], на криволинейном СУ конечной интенсивности выполняется соотношение

$$\hat{N}_1 - \frac{C_1 A_{15}}{C_2 A_{25}} \hat{N}_2 = C_1 \sum_{i=1}^{4} \left(A_{1i} - \frac{A_{15}}{A_{25}} A_{2i} \right) N_i, \qquad (3)$$

где N_i, $\hat{N}_j$ – неравномерности течения в текущей точке до и за СУ соответственно, в частности: $N_1 = \partial \ln p / \partial s$, $N_2 = \partial \theta / \partial s$, $N_3 = \partial \ln p_0 / \partial n$, $N_4 = \delta / y$ – поперечная кривизна СУ, здесь $\delta = 0$ соответствует плоскому, $\delta = 1$ – осесимметричному случаю течения. Продольная кривизна СУ $K_w \equiv N_5$ исключена из (3), а коэффициенты C_j, A_{ji} зависят как от числа Маха перед СУ, так и от его текущей интенсивности $J = \hat{p} / p$. Обратим внимание на то, что

обозначения коэффициентов A_{ji} и величин N_i в (3) никак не связаны с аналогичными обозначениями матрицы **A** и N_i в (1).

Теперь рассмотрим, как зависят друг от друга неравномерности на слабом разрыве (СЛР), в который вырождается СУ при $J \to 1$. Как следует из решения соответствующей задачи линейной алгебры [1], при СЛР сохраняется простой комплекс:

$$\left(\hat{N}_1 - \chi \Gamma(\hat{\mathrm{M}})\, \hat{N}_2 \right) \Big|_{J=1} = \left(N_1 - \chi \Gamma(\mathrm{M})\, N_2 \right), \tag{4}$$

$$\Gamma(\hat{\mathrm{M}}) = \Gamma(\mathrm{M}) = \gamma \mathrm{M}^2 \Big/ \sqrt{\mathrm{M}^2 - 1},$$

т. е.

$$\left[\left(N_1 - \chi \Gamma(\mathrm{M}) N_2 \right) \Big|_{J=1} \right] = 0,$$

$$\text{или } \left[N_1 \right]_{J=1} - \chi \Gamma(\mathrm{M}) \left[N_2 \right]_{J=1} = 0,$$

где квадратные скобки означают разрыв соответствующей величины. Другими словами, этот левый комплекс (в силу знака перед χ) является инвариантным (как инвариант Ускова) на СЛР [2] и не означает тривиального равенства $\hat{N}_1 = N_1$, $\hat{N}_2 = N_2$, однако если это имеет место, то СЛР представляет собой обычную характеристику, на которой производные не рвутся.

Выразив неравномерности через нормальные производные

$$N_2 = \frac{-1}{\gamma \mathrm{M}^2} \frac{\partial \ln p}{\partial n}, \qquad \hat{N}_2 = \frac{-1}{\gamma \hat{\mathrm{M}}^2} \frac{\partial \ln \hat{p}}{\partial \hat{n}} \tag{5}$$

из соответствующих (перед и за СУ) уравнений импульса [2; 5] и подставив (5) в (4), перепишем (4) в терминах полных производных от давления, учитывая равенство величин по обе стороны СЛР:

$$\left(\hat{p}_{\hat{s}} + \hat{m}^{\chi} \cdot \hat{p}_{\hat{n}} \right) \Big|_{J=1} = \left(p_s + m^{\chi} \cdot p_n \right), \tag{6}$$

$$\hat{m}^{\chi} = \frac{\chi}{\sqrt{\hat{\mathrm{M}}^2 - 1}} = m^{\chi} = \frac{\chi}{\sqrt{\mathrm{M}^2 - 1}}.$$

Таким образом, имеет место равенство полных производных от давления в указанном направлении по обе стороны поверхности СЛР, при этом сами однотипные производные, как и в (4), могут отличаться. Существенно, что направляющий коэффициент $m^{\chi} = \chi \cdot \mathrm{tg}(\alpha_{\mathrm{M}})$, где α_{M} – угол Маха, в каждой точке СЛР совпадает с наклоном характеристики того же семейства. Анализируя левые части (6) и (2) при $b = 1$, можно сделать вывод, что $\hat{m}^{\chi} = -\hat{m}^{-\chi}$, поэтому, в противовес (6) и согласно терминологии [2], левую часть (2) при $b = 1$ определим как правый комплекс, соответствующий рефракционной модели.

Пользуясь (5), приведем левую часть (3) для СУ произвольной интенсивности к форме левой части (6) для СЛР. Тогда вместо $\hat{m}^{\chi}$ получим $\hat{m}^{\chi}_{\mathrm{y}} = \left(C_1 A_{15} \right) \Big/ \left(C_2 A_{25}\, \gamma \hat{\mathrm{M}}^2 \right)$, где показатель направления χ входит в коэффициенты A_{ji}.

Сравним между собой пары коэффициентов $\chi \Gamma(\hat{\mathrm{M}})$ и $\left(C_1 A_{15} \right) \big/ \left(C_2 A_{25} \right)$ в соотношениях (4) и (3) для СЛР и СУ соответственно и $\hat{m}^{\chi}$ и $\hat{m}^{\chi}_{\mathrm{y}}$, а также соответствующие им угол Маха $\hat{\alpha}^{\chi}_{\mathrm{M}} = \mathrm{arctg}(\hat{m}^{\chi})$ (в этой записи уже учитывается знак угла) и угол $\hat{\alpha}^{\chi}_{\mathrm{y}} = \mathrm{arctg}(\hat{m}^{\chi}_{\mathrm{y}})$. Последний, согласно [1], определим как угол Ускова. Заметим, что сравниваемые пары коэффициентов или углов зависят как от числа Маха перед СУ, так и от его текущей интенсивности.

Необходимость в таком сравнении вызвана прежде всего тем, что строгое обнуление определителя матрицы $\mathbf{A} = \left(a_{i,j=1,2}, b_i, a_{i4} \right)_{i=1,\ldots,4}$ (см. ОДСС (1) при $\varepsilon^2 = 0$ [3–5]) при линейной части неизвестного вектора производных $\mathbf{X} = \left(\hat{W}_{\hat{n}}, \hat{\theta}_{\hat{n}}, K_w, \hat{h}_{\hat{n}} \right)^T$ происходит при исключении величины $\hat{p}_{\hat{n}}$ с помощью дифференциальной связи, основанной на левом комплексе, но с направляющим коэффициентом $\hat{m}^{\chi}_{\mathrm{y}}$, а не $\hat{m}^{\chi} = \mathrm{tg}(\hat{\alpha}^{\chi}_{\mathrm{M}})$, как можно было бы ошибочно предположить, проводя аналогию с соотношениями известного метода характеристик [1]. Однако, как следует из несложных расчетов, в широком диапазоне интенсивностей СУ и чисел Маха перед ним указанные направляющие коэффициенты (равно как и значения определителя матрицы **A**) имеют близкие, иногда даже совпадающие значения.

В связи с вышеизложенным закономерны следующие вопросы:

– как соотносятся направляющие коэффициенты $\hat{m}^{\chi}_{\mathrm{y}}$ и $\hat{m}^{\chi}$ или углы $\hat{\alpha}^{\chi}_{\mathrm{y}}$ и $\hat{\alpha}^{\chi}_{\mathrm{M}}$ при конечной интенсивности СУ ($J \neq 1$);

– имеет ли место предельный переход $\hat{m}^{\chi}_{\mathrm{y}} \to \hat{m}^{\chi}$ ($\hat{\alpha}^{\chi}_{\mathrm{y}} \to \hat{\alpha}^{\chi}_{\mathrm{M}}$) при постепенном вырождении СУ в СЛР ($J \to 1$)?

Для ответа на эти вопросы приведем расчетные графики (рис. 2), характеризующие различие указанных углов, при числе Маха невозмущенного потока M = 2 и изменении интенсивности СУ в диапазоне значений $J \in [1, J_s]$, где J_s – звуковая интенсивность СУ ($\hat{\mathrm{M}} \big|_{J=J_s} = 1$) [1].

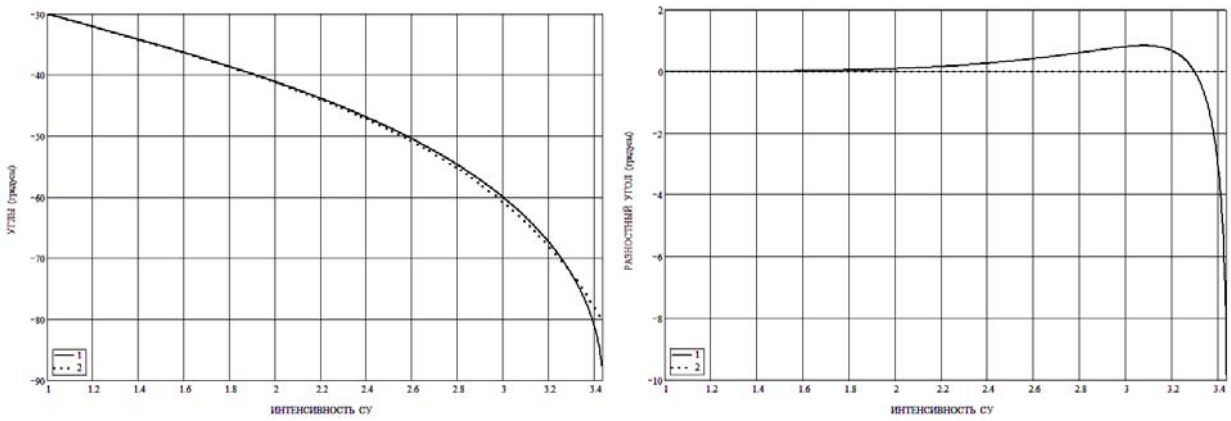


Рис. 2. Углы Маха и Ускова, град, за СУ (слева: *1* – угол Маха; *2* – угол Ускова)
и их разность, град (справа: *1* – разностный угол; *2* – нуль), для M = 2, γ = 1,4, χ = –1

Тогда при вырождении СУ в СЛР ($J \to 1$) в пределе будем иметь $\alpha^{\wedge\chi}_{\text{M}} = \alpha^{\chi}_{\text{M}} = \chi \cdot \arcsin\left(\frac{1}{\text{M}}\right) = -30°$ для $\chi = -1$. Из расчетов следует, что в широком диапазоне интенсивностей СУ (исключая окрестность звуковой интенсивности) и чисел Маха перед скачком указанные углы и соответствующие им коэффициенты имеют близкие значения, а в пределе ($J \to 1$) совпадают. Близость этих углов позволяет рассматривать угол Ускова как двойник хорошо известного угла Маха, однако угол Ускова в отличие от угла Маха имеет отношение исключительно к задаче первого порядка (дифференциальной задаче) для криволинейного СУ, хотя формально может быть рассчитан (но не востребован) и за плоским СУ. Такая ситуация возникает, например, в методе характеристик [1], когда криволинейный СУ поточечно выстраивается кусочно-плоскими элементами. В качестве кривизны такого СУ может выступать лишь ее приближенный разностный (например, трехточечный) аналог, но не сама кривизна скачка, как в предлагаемом подходе.

Вернемся к заданию КЭ за СУ. С учетом сказанного выше, наклон изобары $m^{\wedge\chi}_{\text{y}}$, определяемый углом Ускова, является запрещенным при задании КЭ, однако имеется возможность несколько отступить от этого направления.

Продемонстрируем на конкретном примере принципиальное отличие правого и левого комплексов при задании с их помощью КЭ за СУ в рамках изобарической дифференциальной связи (c = 0 в (2)). Как уже было замечено, при использовании правого комплекса даже значительные вариации коэффициента $m^{\wedge-\chi}$ приводят к малому изменению соответствующего решения. В случае же использования левого комплекса отмеченной близости соседних симметричных ($\pm\Delta$) решений при вариациях направляющего коэффициента $m^{\wedge\chi}_{\text{y}}(1 \pm \Delta)$; $\forall \Delta > 0, \Delta \sim 0$ не существует и эти решения ведут себя по-разному. Так, ветка решений, определяемых коэффициентом $m^{\wedge\chi}_{\text{y}}(1-\Delta)$, соответствует резкому принудительному усилению СУ в случае, если число Маха в неравномерном невозмущенном СС убывает (как в пограничном слое) в процессе проникновения в него СУ, а ветка решений, определяемых коэффициентом $m^{\wedge\chi}_{\text{y}}(1+\Delta)$, – принудительному вырождению СУ до СЛР. Если невозмущенный СС имеет возрастающий профиль числа Маха, то ситуация с этими решениями меняется на противоположную. Более того, чем меньше величина параметра Δ, тем более интенсивно происходит любой из указанных процессов, что связано с большими градиентами газодинамических величин, т. е. разворотом СУ в ту или другую сторону в меньшей окрестности, дающим в пределе угловую точку на скачке.

Представим результаты вычислительного моделирования проникновения СУ в плоский вихревой слой для значения малого параметра Δ = 0,0005 в виде расчетных графиков (рис. 3, 4), где по вертикальным осям отложены значения безразмерной нормированной на толщину слоя координаты *y*, по горизонтальным осям – функции: на рис. 3 – скорость и энтальпия, на рис. 4 – характеристический коридор.

Конкретные значения безразмерных газодинамических параметров во внешнем потоке и на плоскости симметрии, совместно определяющие невозмущенный, рассчитанный разностным методом изоэнтальпийный сдвиговый (вихревой) слой, были следующими: γ = 1,4; M_∞ = 2,28; ρ_∞ = 1,18; W_∞ = 0,95 при *y* = 1 и $W_0 = \theta_0 = 0$ при *y* = 0. Начальная интенсивность $J_\infty(t_{\%}) = J_s^{\,t_{\%}/100\,\%}$ падающего СУ составляла $t_{\%} = 20\,\%$ от логарифма $\Lambda_s = \ln(J_s)$ звуковой интенсивности скачка. Характеристический коридор представляет собой «распечатку» в каждой расчетной точке СУ величин $|\chi\alpha_{\text{M}}|, |\sigma|, \left|\beta + \chi\alpha^{\wedge}_{\text{M}}\right|$ (см. рис. 1) – модулей значений углов наклона СУ и характеристик одного с ним семейства по обе его стороны к текущей линии тока в невозмущенном течении (см. рис. 4).

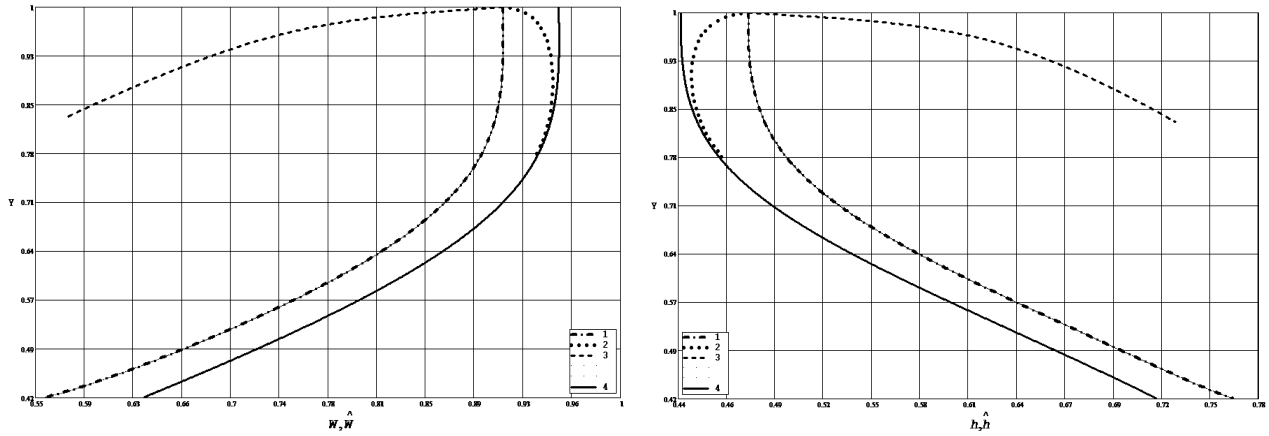


Рис. 3. Распределения скорости (слева) и энтальпии (справа) вдоль передней и задней поверхности СУ для различных невязких моделей:
1 – рефракционная модель; *2* – модель с принудительным вырождением СУ; *3* – модель с принудительным усилением СУ; *4* – невозмущенное решение

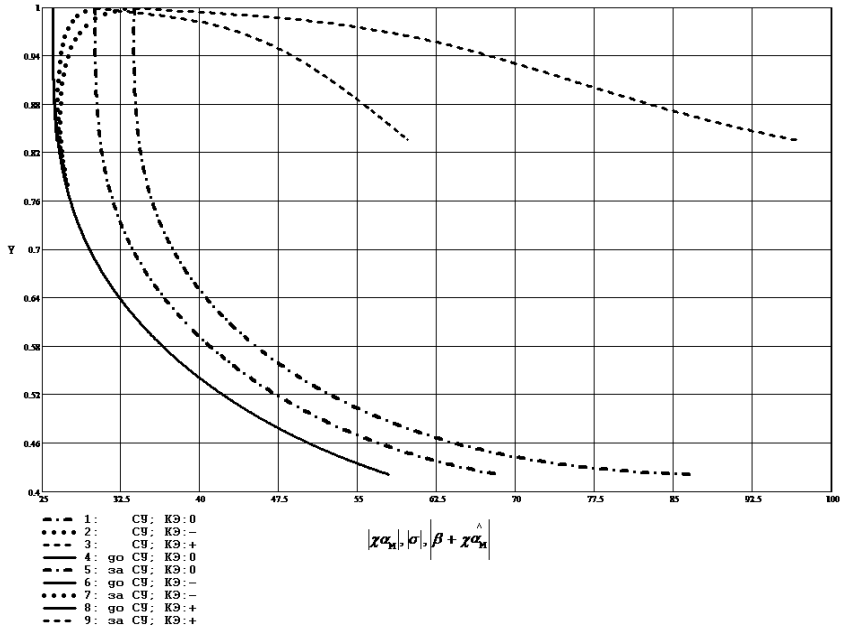


Рис. 4. Характеристический коридор, град:
1, *4*, *5* (эквидистантные кривые) – рефракционная модель; *2*, *6*, *7* – модель с принудительным вырождением СУ; *3*, *8*, *9* – модель с принудительным усилением СУ; *4*, *6*, *8* – невозмущенное решение, соответствующее различным моделям

Кривые, соответствующие КЭ, усиливающему СУ ($\hat{m}_{\text{у}}^{\chi}(1-\Delta)$), помечены как КЭ: + ; вырождающемуся СУ ($\hat{m}_{\text{у}}^{\chi}(1+\Delta)$) – как КЭ: − ; рефракционной модели, исключающей КЭ за СУ ($\hat{m}^{-\chi}(1\pm 0)$) – как КЭ: 0.

Крайнее левое семейство слившихся кривых соответствует характеристикам в невозмущенном потоке, крайнее правое (веер) – в возмущенном потоке (за СУ), среднее семейство – самому СУ. Очевидно, что при полном вырождении СУ все три однотипные кривые из различных семейств, соответствующие этому решению, пересекутся в одной точке внизу и тогда характеристический коридор «схлопнется», как на рис. 4. В случае КЭ, усиливающего СУ, этот коридор, наоборот, расширится, и только в нейтральном случае останется практически без изменений (кривые эквидистантны).

Таким образом, при $\Delta \neq 0$ базовый левый комплекс может эффективно использоваться в качестве математического инструмента управления поведением СУ: либо для его усиления, либо для перевода в разряд СЛР. Следует отметить, что при использовании модели вязкого теплопроводного газа величина малого параметра Δ не может быть слишком малой, поскольку

ку градиентным процессам разворота СУ на малом участке физического пространства соответствуют малые радиусы кривизны СУ, т. е. большие кривизны разных знаков, что неизбежно входит в противоречие с асимптотическим учетом фактора ВТ и самой схематизацией скачка [4].

Проведем аналогичные исследования с учетом фактора ВТ. В ходе расчетов, где использовалась стационарная модель на основе ОДСС (1), было замечено, что при КЭ, ослабляющем или усиливающем СУ, влияние фактора ВТ на процесс проникновения скачка в слой больше и кривые, соответствующие вязким и невязким решениям, расходятся сильнее. Это объясняется тем, что исключение КЭ (фактически – разглаживание течения за СУ) уменьшает влияние фактора ВТ: градиенты газодинамических параметров входят в величины вязких напряжений и теплового потока.

Для иллюстрации данного факта на рис. 5 показан характеристический коридор для вязких и невязких решений с КЭ и без него для $J_\infty(t_\% = 63{,}7\,\%)$, $\mathrm{Pr} = 1$, $\mathrm{Re}_x = 1{,}3\cdot 10^3$ в начальной точке падения СУ на СС со следующими параметрами: $\gamma = 1{,}4$; $M_\infty = 2{,}5$; $\rho_\infty = 1$; $W_\infty = 1$ при $y = 1$ и $W_0 = \theta_0 = 0$ при $y = 0$. Как и на рис. 3, 4, по вертикальной оси графиков на рис. 5 отложены значения безразмерной нормированной на толщину слоя координаты y. Анализ полученных графиков показывает, что вне зависимости от знака КЭ всегда происходит частичное, но более значительное, чем при исключенном КЭ, сужение характеристического коридора за счет ослабляющего действия фактора ВТ. Таким образом, если имеет место КЭ, ослабляющий СУ, то в результате суммарного однонаправленного действия обоих факторов сужение коридора оказывается более сильным.

При произвольном числе Прандтля $\mathrm{Pr} \neq 1$ действие фактора ВТ может носить более сложный характер, поскольку вязкость и теплопроводность влияют на ударный процесс по-разному.

Библиографические ссылки

1. Адрианов А. Л., Старых А. Л., Усков В. Н. Интерференция стационарных газодинамических разрывов. Новосибирск : Наука, 1995.

2. Адрианов А. Л. О модельной кривизне скачка уплотнения в неравномерном потоке // Вычисл. технологии. 2000. Т. 5, № 6. С. 3–14.

3. Адрианов А. Л. Выделение разрывов в двумерных течениях невязкого и вязкого теплопроводного газа // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. Красноярск, 2005. Вып. 7. С. 11–17.

4. Адрианов А. Л. Обобщенные дифференциальные соотношения на скачке уплотнения // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Математическое моделирование физических процессов». 2009. Вып. 4. С. 22–30.

5. Адрианов А. Л. Математическое моделирование ударных течений вязкого теплопроводного газа на основе асимптотической модели // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Математическое моделирование физических процессов». 2010. Вып. 4. С. 10–26.

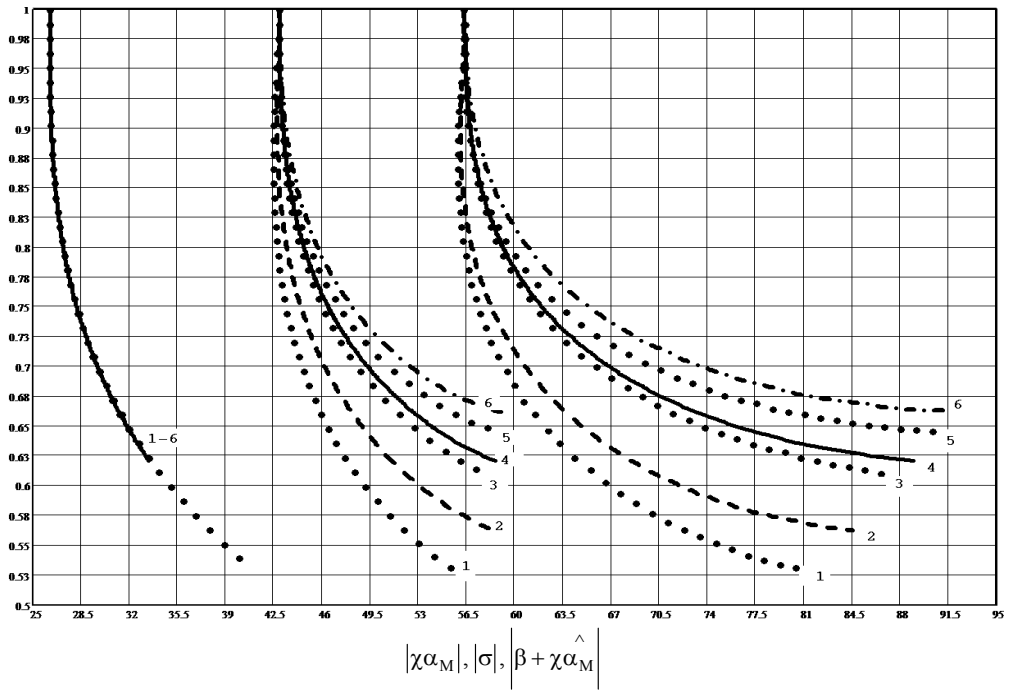


Рис. 5. Характеристический коридор, град, для вязких и невязких решений:
слева – перед СУ; в центре – на СУ; справа – за СУ; *1* – вязкое решение при КЭ, ослабляющем СУ; *2* – невязкое решение при КЭ, ослабляющем СУ; *3* – вязкое решение без КЭ; *4* – невязкое решение без КЭ; *5* – вязкое решение при КЭ, усиливающем СУ; *6* – невязкое решение при КЭ, усиливающем СУ

A. L. Adrianov

ABOUT PERMISSIBLE LIMITS AT ASSIGNMENT OF BOUNDARY EFFECT FOLLOWING THE SHOCK WAVE

The author considers influence of boundary effect following the shock wave on evolution of the shock wave itself, when it penetrates the shift layer. Permissible limits at assignment of boundary effect are revealed. Concepts of Uskov's invariant and angle are introduced.

Keywords: strong and weak gas-dynamic blowout, shock wave, extended differential conditions on a shock wave, boundary effect, Mach's and Uskov's angles.

© Адрианов А. Л., 2012

УДК 531.38

Р. С. Алиев-Хетагов

РАСЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО ПО ВРЕМЕНИ РАЗВОРОТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ СМЕНЕ РЕЖИМОВ ОРИЕНТАЦИИ

Рассматривается угловое движение автоматического космического аппарата (КА), каждый виток которого состоит из двух участков: рабочего (в окрестности апогея), на котором КА решает целевую задачу, и дежурного, на котором выполняется коррекция орбиты с использованием электрореактивных двигателей и инерционных исполнительных органов, – маховиков. При этом для перехода в режимы коррекции орбиты или ориентации на рабочем участке совершаются программные развороты космического аппарата. С помощью математического моделирования проведено сравнение двух способов разворота КА, оптимальных по быстродействию, при различных начальных данных.

Ключевые слова: оптимальные по времени угловые развороты.

Рассмотрим систему инерционных исполнительных органов (ИИО), состоящую из четырех маховиков, оси вращения которых перпендикулярны разным граням правильного многогранника – тетраэдра. Область вариации кинетического момента системы ИИО в первом приближении представляет собой шар радиусом $R = 1{,}633h$, где h – модуль вектора кинетического момента одного маховика при его максимальной скорости вращения.

Будем использовать инерциальную систему координат. Кинематические уравнения зададим в кватернионной форме.

Развороты космического аппарата выполняются двумя способами.

Первый способ – плоский разворот вокруг вектора конечного поворота с максимальной угловой скоростью (рис. 1) [1; 2].

Обозначим суммарный вектор накопленного кинетического момента космического аппарата и инерционных исполнительных органов через $\mathbf{G}_0$ и будем считать, что за время разворота приращением вектора $\mathbf{G}_0$ за счет действия моментов внешних сил можно пренебречь. Тогда вектор $\mathbf{G}_0$ остается неизменным в инерциальной системе координат.

Из кватерниона рассогласования положения космического аппарата найдем мгновенную ось разворота, относительно которой будем совершать плоский разворот в пространстве [3]:

$$\vec{e} = \vec{e}(e_1, e_2, e_3).$$

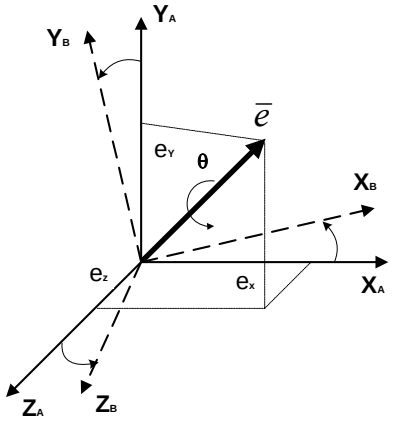


Рис. 1. Эйлерова ось вращения, определяющая поворот системы координат:
$OX_AY_AZ_A$ – инерциальная система координат;
$OX_BY_BZ_B$ – связанная система координат

Обозначим угловую скорость вокруг вектора конечного поворота через ω. Тогда $\mathbf{G_0} = \mathbf{H} + \omega\mathbf{Je}$, где

H – суммарный кинетический момент инерционных исполнительных органов; **J** – тензор моментов инерции космического аппарата [4]. При развороте с максимальной угловой скоростью модуль вектора **H** равен **R**. В этом случае $\mathbf{R}^2 = (\mathbf{G_0} - \omega\mathbf{Je})^2$, откуда получим уравнение [2]:

$$\omega = \frac{(\vec{G_0}\vec{Je}) \pm \sqrt{(\vec{G_0}\vec{Je})^2 - (\vec{Je})^2(G0^2 - R^2)}}{(\vec{Je})^2}.$$

Второй способ – пространственный разворот с максимальной текущей проекцией угловой скорости на вектор конечного разворота [3] (рис. 2). В данном способе угловая скорость разворота находится минимизацией функции $I = (\mathbf{e} \cdot \omega)$ при условии $|\vec{\mathbf{H}}| = R$. Решая задачу методом множителей Лагранжа, определим компоненты вектора $\vec{H}(H_1H_2H_3)$:

$$H_i = -\frac{R\frac{e_i}{J_i}}{\sqrt{\sum_i \frac{e_i^2}{J_i^2}}},\ i = 1, 2, 3,$$

а также найдем угловую скорость разворота

$$\dot{B} = \frac{1}{2}\vec{\omega} \cdot B.$$

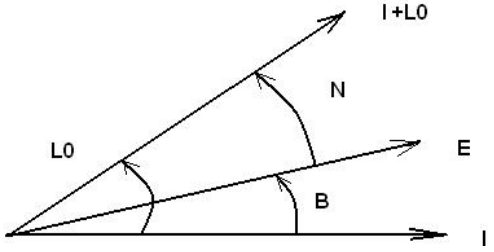


Рис. 2. Связь между связанной *E* и инерциальной *I* системой координат с учетом кватерниона разворота L_0

Приведем результаты математического моделирования для двух способов разворота, который проводился по 26 различным направлениям с углом разворота 180°.

Анализ полученных результатов показывает, что в 34 случаях предпочтительнее первый способ, в 44 случаях – второй способ.

№ направления	Кватернион разворота	Суммарный кинетический момент *T* (0; 0; 0), с		Суммарный кинетический момент *T* (5; 5; 5), с		Суммарный кинетический момент *T* (10; 10; 10), с	
		Первый способ	Второй способ	Первый способ	Второй способ	Первый способ	Второй способ
1	+*X*	1 036,3	1 027,46	963,5	944,535	931,0	890,609
2	–*X*	1 036,3	1 027,46	1 195,3	1 262,13	1 908, 9	1 859,25
3	+*Y*	1 231,9	1 238,35	1 145,2	1 137,89	1 098,7	1 093,46
4	–*Y*	1 231,9	1 238,35	1 160,0	1 384,84	1 527,1	1 515,31
5	+*Z*	761,5	731,668	761,5	805,639	761,5	1 401,85
6	–*Z*	761,5	731,668	761,5	702,012	870,3	1 127,96
7	+*X* – *Y*	1 147,2	1 165,32	1 187,9	1 120,48	1 357,7	1 057,38
8	–*X* – *Y*	1 147,2	1 165,32	1 395,3	1 377,53	1 954,1	1 809,31
9	+*X* + *Y*	1 147,2	1 165,32	1 012,3	1 005,65	940,5	909,856
10	–*X* + *Y*	1 147,2	1 165,32	1 185,4	1 321,87	1 350,1	1 747,75
11	+*X* + *Z*	861,7	922,506	837,9	827,09	837,9	761,422
12	+*X* – *Z*	861,7	922,506	903,7	1 078,5	1 039,3	1 450,94
13	–*X* – *Z*	861,7	922,506	985,2	937,305	1 271,7	1 038,99
14	–*X* + *Z*	861,7	922,506	908,5	1 114,28	1 053,6	1 510,18
15	+*Y* + *Z*	994,4	920,85	928,8	988,239	902,2	1 065,82
16	+*Y* – *Z*	994,4	920,85	979,0	972,079	1 051,6	1 217,22
17	–*Y* – *Z*	994,4	920,85	1 234,5	1 138,89	1 773,2	1 666,87
18	–*Y* + *Z*	994,4	920,85	987,3	891,888	1 074,0	888,403
19	+*X* + *Y* + *Z*	1 006,0	935,923	886,1	858,509	884,1	814,118
20	+*X* + *Y* – *Z*	1 006,0	1 032,43	962,9	1 075,11	962,4	1 180,48
21	+*X* – *Y* – *Z*	1 006,0	928,423	1 142,7	1 152,8	1 472,2	1 684,21
22	+*X* – *Y* + *Z*	1 006,0	1 048,84	955,1	923,625	942,4	860,592
23	–*X* + *Y* + *Z*	1 006,0	1 048,84	1 017,6	1 186,25	1 105,3	1 518,59
24	–*X* + *Y* – *Z*	1 006,0	928,423	1 062,6	958,757	1 201,8	1 283,0
25	–*X* – *Y* – *Z*	1 006,0	1 032,43	1 261,0	1 195,24	1 853,5	1 556,59
26	–*X* – *Y* + *Z*	1 006,0	935,923	1 088,1	999,991	1 281,8	1 177,34

Вместе с тем можно отметить, что в большинстве случаев времена разворота приблизительно одинаковы и отличаются, как правило, на 5…10 %. А если учесть, что первый способ характеризуется большей простотой вычислений, а следовательно меньшими затратами используемых ресурсов бортовой ЦВМ, то именно он может считаться более оптимальным.

Таким образом, по результатам сравнения двух способов разворота КА за минимальное время выбран оптимальный способ разворота для бортовой ЦВМ.

Библиографические ссылки

1. Алиев-Хетагов Р. С. Расчет минимальной продолжительности разворота космического аппарата дистанционного зондирования Земли с использованием маховиков при смене режимов ориентации // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук : тр. 52-й науч. конф. Моск. физ.-техн. ин-та. М., 2009. Ч. 1, т. 1. С. 6–9.

2. Minimum-Time Attitude Maneuvers with Control Momentum Gyroscopes / G. R. Cooper, D. A. Tidman, M. L. Bundy, J. Kranton // AIAA Journal. 1970. Vol. 8, Iss. 8. P. 1523–1525.

3. Бранец В. Н., Казначеев Ю. В., Черток М. Б. Оптимальный разворот твердого тела с одной осью симметрии // Космич. исслед. Т. XXII, вып. 3. С. 352–360.

4. Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М. : Наука. 1974.

R. S. Aliev-Hetagov

CALCULATION OF TIME-OPTIMAL MANEUVERS OF A SPACECRAFT IN CASE OF CHANGING MODES OF ORIENTATION

The author considers angular movement of a space vehicle. The spiro consists of two phases: workable control (in an apogee vicinity) during which the device is to solve a target problem, and duty control phase During duty control phase of the orbit the problems of orbit correction performance are solved with the help of electrojet engines and gravitational unload of accumulated angular momentum of operating members, namely, flywheels. At the process, for transition to orbit correction modes or for transition into demanded orientation on workable control phase, program maneuvers of a space vehicle are made. From the point of view of increase in time taken for gravitational unload is expedient to minimize durations of maneuvers of a space vehicle. Comparison of two ways of maneuvers of a space vehicle, optimum on speed [1, 2], is made. Comparison is made by the results of mathematical modeling at various sets of initial data.

Keywords: Time-optimal attitude maneuvers.

© Алиев-Хетагов Р. С., 2012

УДК 62.83

С. О. Бойко, Н. А. Смирнов

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОПРЯЖЕНИЯ РЕЗЬБ ТРЕУГОЛЬНОГО И ВЫПУКЛОГО ПРОФИЛЕЙ

Рассмотрена математическая модель напряженно-деформированного состояния резьбового сопряжения винта, имеющего выпуклый профиль резьбы, и гайки, имеющей треугольный профиль.

Ключевые слова: резьба, линейная, передача.

В современной технике имеется большое количество задач, в которых требуется применение высокоточных линейных приводов. Одной из важнейших составляющих линейного привода является линейная передача, обеспечивающая преобразование вращательного движения вала двигателя в поступательное движение выходного звена. На сегодняшний день запатентовано много различных линейных передач, преобразование движения в которых осуществляется за счет резьбового сопряжения. Одной из актуальных задач при проектировании резьбы является обеспечение заданной нагрузочной способности и жесткости.

Предложен теоретический расчет напряженно-деформированного состояния резьбового сопряжения винта, имеющего выпуклый профиль резьбы, и гайки, имеющей треугольный профиль (рис. 1). Все расчеты проведены в системе СИ.

Основные параметры резьбы: шаг S; количество витков N; диаметр вершин профиля резьбы d; угол профиля резьбы α; радиус профиля резьбы винта R; высота исходного профиля резьбы $h' = \frac{S}{2\,\mathrm{tg}\,\alpha}$; высота рабочего профиля резьбы $h = \frac{S}{2\,\mathrm{tg}\,\alpha} - 0,05S$; угол

подъема резьбы $\gamma = \operatorname{arctg}\dfrac{S}{\pi d}$; коэффициент трения f; осевое усилие P.

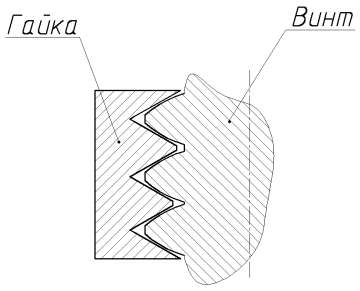


Рис. 1. Резьбовое сопряжение гайки с треугольным профилем резьбы и винта с выпуклым профилем резьбы

Исходя из того, что гайка имеет в качестве образующей профиля резьбы линию, а винт – дугу радиусом R, примем в качестве модели их сопряжения модель контакта цилиндра и плоскости, результатом взаимного сжатия которых является прямоугольная площадка, полуширина которой b определяется по формуле

$$b = 1{,}131\sqrt{\frac{PR}{l}\left(\frac{1-\mu_1^{\,2}}{E_1}+\frac{1-\mu_2^{\,2}}{E_2}\right)},$$

где P – усилие поджатия цилиндра к плоскости; R – радиус цилиндра; l – длина линии контакта; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона для материалов цилиндра и плоскости; E_1, E_2 – модули упругости для материалов цилиндра и плоскости [1].

Полная ширина прямоугольной площадки a, при сопряжении гайки с треугольным профилем резьбы и винта с выпуклым профилем радиусом R, определится по формуле

$$a = 2\cdot 1{,}131\sqrt{\frac{P_n R}{l}\left(\frac{1-\mu_1^{\,2}}{E_1}+\frac{1-\mu_2^{\,2}}{E_2}\right)} = 2{,}262\sqrt{\frac{P_n R}{l}\left(\frac{1-\mu_1^{\,2}}{E_1}+\frac{1-\mu_2^{\,2}}{E_2}\right)},$$

где $l = N\sqrt{S^2+\pi^2 d^2}$ – длина линии контакта.

Усилия в месте контакта (рис. 2) вычисляются по формулам

$$P_n = P\cos\alpha\cos\gamma,$$
$$P_\tau = P\sin\alpha\sin\gamma.$$

Получим зависимости для определения нормальных и касательных напряжений в месте контакта двух резьб:

$$\sigma_{\text{конт}} = \frac{P_n}{F} = \frac{P_n}{a\cdot l} = \frac{P\cos\alpha\cos\gamma}{2{,}262\sqrt{\dfrac{PR\cos\alpha\cos\gamma}{N\sqrt{S^2+\pi^2 d^2}}\left(\dfrac{1-\mu_1^{\,2}}{E_1}+\dfrac{1-\mu_2^{\,2}}{E_2}\right)}N\sqrt{S^2+\pi^2 d^2}},$$

$$\tau_{\text{конт}} = \frac{P_\tau\cdot f}{F} = \frac{P_\tau\cdot f}{a\cdot l} = \frac{P\sin\alpha\sin\gamma\cdot f}{2{,}262\sqrt{\dfrac{PR\cos\alpha\cos\gamma}{N\sqrt{S^2+\pi^2 d^2}}\left(\dfrac{1-\mu_1^{\,2}}{E_1}+\dfrac{1-\mu_2^{\,2}}{E_2}\right)}N\sqrt{S^2+\pi^2 d^2}},$$

где $F = a\cdot l$ – площадь площадки контакта двух резьб.

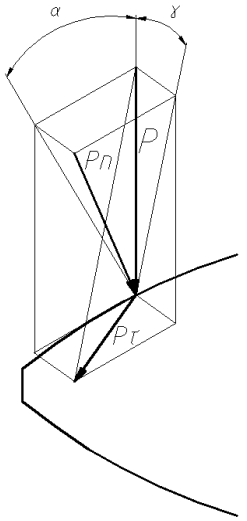


Рис. 2. Схема распределения осевого усилия на выпуклом профиле резьбы

Определим изгибные напряжения в резьбе винта (рис. 3):

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M}{W},$$

где $W = \dfrac{bh^2}{6}$ – момент сопротивления сечения.

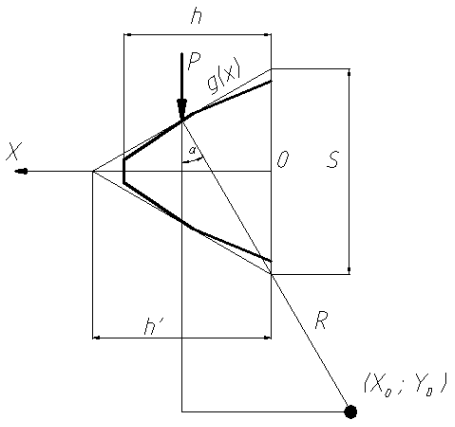


Рис. 3. Схема для расчета изгибных напряжений в выпуклой резьбе

Запишем выражение

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2}\frac{P}{F},$$

где F – площадь поперечного сечения [1].

Так как момент сопротивления является функцией высоты профиля резьбы, определим закон ее изменения. Принимая за начало координат центр основания профиля резьбы, получим: $(x-x_0)^2+(y-y_0)^2=R^2$ [2] – уравнение окружности, где x_0, y_0 – координаты центра окружности; $g(x)=2(\sqrt{R^2-(x-x_0)^2}+y_0)$ – уравнение профиля выпуклой резьбы винта; $W(x)=\dfrac{l\cdot g(x)^2}{6}$.

Найдем центр окружности:

$$x_0=\frac{h'}{2}-R\sin\alpha=\frac{S}{4\operatorname{tg}\alpha}-R\sin\alpha,$$

$$y_0=\frac{S}{4}-R\cos\alpha,$$

$$g(x)=2\cdot\left(\sqrt{R^2-(x-(\frac{S}{4tg\alpha}-R\sin\alpha))^2}+\frac{S}{4}-R\cos\alpha\right),$$

где x изменяется от 0 до $\dfrac{S}{4\operatorname{tg}\alpha}$.

Таким образом, закон изменения момента сопротивления определится выражением

$$W(x)=\frac{2N\cdot\sqrt{S^2+\pi^2d^2}}{3}\times$$
$$\times\frac{\left(\sqrt{R^2-(x-(\frac{S}{4\operatorname{tg}\alpha}-R\sin\alpha))^2}+\frac{S}{4}-R\cos\alpha\right)^2}{3}.$$

Изгибные нормальные напряжения также превращается в функцию высоты профиля резьбы:

$$M(x)=P\cdot x,$$

где x изменяется от 0 до $\dfrac{S}{4\operatorname{tg}\alpha}$.

Запишем

$$\sigma_{изг}=\frac{3Px}{2N\cdot\sqrt{S^2+\pi^2d^2}\times}\cdot$$
$$\times\left(\sqrt{R^2-(x-(\frac{S}{4\operatorname{tg}\alpha}-R\sin\alpha))^2}+\frac{S}{4}-R\cos\alpha\right)^2$$

Изгибные касательные напряжения также являются функцией высоты профиля резьбы:

$$\tau_{\max}(x)=\frac{3}{2}\frac{P}{l\cdot g(x)}=$$
$$=\frac{3}{4}\frac{P}{N\cdot\sqrt{S^2+\pi^2d^2}\times}\cdot$$
$$\times\left(\sqrt{R^2-(x-(\frac{S}{4\operatorname{tg}\alpha}-R\sin\alpha))^2}+\frac{S}{4}-R\cos\alpha\right)$$

Определим изгибные напряжения в треугольной резьбе гайки (рис. 4).

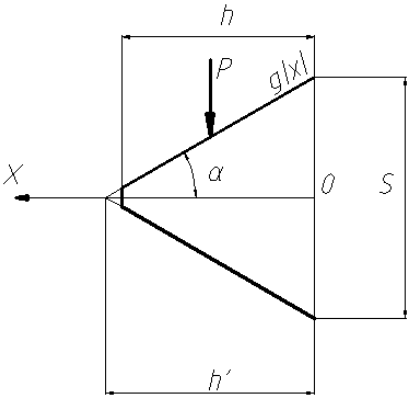


Рис. 4. Схема для расчета изгибных напряжений в треугольной резьбе

Определим уравнение профиля треугольной резьбы гайки. Принимая за начало координат центр основания профиля резьбы, получим уравнение профиля треугольной резьбы гайки:

$$g(x)=-2tg\alpha\cdot x+S,$$

а также

$$W(x)=\frac{l\cdot(-2x\operatorname{tg}\alpha+S)^2}{6}=$$
$$=\frac{N\cdot\sqrt{S^2+\pi^2d^2}\cdot(-2x\operatorname{tg}\alpha+S)^2}{6},$$

где x изменяется от 0 до $\dfrac{S}{4\operatorname{tg}\alpha}$.

Изгибные нормальные напряжения в треугольной резьбе определятся формулой

$$\sigma_{изг}(x)=\frac{6M(x)}{N\sqrt{S^2+\pi^2d^2}(-2x\operatorname{tg}\alpha+S)^2}=$$
$$=\frac{6Px}{N\sqrt{S^2+\pi^2d^2}(-2x\operatorname{tg}\alpha+S)^2}.$$

Анализируя данную зависимость, можно сделать вывод о том, что при равных параметрах резьбы и при одинаковых нагрузках треугольная резьба обладает большей несущей способностью, чем выпуклая, ввиду возникновения меньших нормальных напряжений.

Изгибные касательные напряжения в треугольной резьбе также являются функцией высоты профиля резьбы:

$$\tau_{\max}(x)=\frac{3}{2}\frac{P}{l\cdot g(x)}=\frac{3}{2}\frac{P}{N\cdot\sqrt{S^2+\pi^2d^2}\cdot(-2x\operatorname{tg}\alpha+S)}.$$

Анализируя данную зависимость, можно сделать вывод о незначительном различии в величине касательных изгибных напряжениях между треугольной и выпуклой резьбами.

Используя полученные математические зависимости, можно на стадии проектирования винта и гайки

рассчитать контактные и изгибные напряжения, возникающие в процессе нагружения в резьбе. Кроме того, варьируя шагом, диаметром, углом профиля, радиусом выпуклости резьбы, можно подобрать такую резьбу, которая бы отвечала заданным требованиям по жесткости и нагрузочной способности.

Библиографические ссылки

1. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев : Наукова думка, 1975.

2. Ефимов Н. В. Краткий курс аналитической геометрии : учеб. пособие. М. : Физматлит, 2005.

S. O. Boyko, N. A. Smirnov

ESTIMATION OF INTENSIVELY-DEFORM STATE OF BLENDING OF THREADS OF TRIANGULAR AND BUCKLED PROFILES

In the article the authors consider a mathematical model of intensively-deform state of screw joint of wind stick, which has a buckled thread profile, and a nut, with triangular profile.

Keywords: thread, linear, drive.

© Бойко С. О., Смирнов Н. А., 2012

УДК 621.316

А. В. Гордеев, Н. Н. Горяшин, А. С. Сидоров

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ШУНТОВОМ СТАБИЛИЗАТОРЕ НАПРЯЖЕНИЯ КОРОТКОЗАМЫКАЮЩЕГО ТИПА*

Представлены результаты анализа потерь мощности в шунтовом стабилизаторе напряжения короткозамыкающего типа в зависимости от длины кабельной линии и коэффициента заполнения, полученные путем имитационного моделирования в формате P-Spice пакета MicroCAP. Показано, что потери мощности в данном стабилизаторе составляют около 30 % от суммарных потерь, а остальные потери приходятся на шунтирующие и блокирующие диоды СБ, токосъемные кольца и кабельную линию.

Ключевые слова: шунтовой стабилизатор, солнечная батарея, потери мощности.

В настоящее время солнечные батареи (СБ) являются основным источником электроэнергии на борту космического аппарата (КА), функционирующего на околоземной орбите. Для стабилизации выходного напряжения СБ в системах электропитания (СЭП) геостационарных КА широкое применение нашли шунтовые стабилизаторы (ШС) напряжения короткозамыкающего типа, которые имеют минимальный набор компонентов и не требуют дросселей для сглаживания пульсаций входного и выходного токов, благодаря чему они обладают хорошими удельными характеристиками [1; 2]. Однако основной недостаток преобразователей данного типа связан с динамическими потерями мощности, обусловленными рассеиванием запасенного заряда паразитной емкостью СБ в кабельной линии и цепи ключевого элемента (КЭ) [3; 4].

С повышением мощности СЭП геостационарных КА более нескольких киловатт задача энергосбережения путем снижения потерь становится особенно актуальной. Для решения этой задачи необходимо провести комплексную оценку потерь во всех подсистемах системы регулирования мощности СБ для определения основных источников потерь. Таким образом, целью данного исследования является оценка статических и динамических потерь в системе регулировании мощности СБ на основе шунтовых стабилизаторов напряжения короткозамыкающего типа путем математического моделирования.

Модель СБ. Традиционно модель панели СБ вне зависимости от используемых материалов и количества каскадов представляют в виде нелинейного источника тока, моделирующего вольт-амперную характеристику (ВАХ) СБ, и параллельно включенной постоянной емкости, которая характеризует заряд, накапливаемый (отдаваемый) нелинейной емкостью СБ при переходе из точки короткого замыкания (КЗ) в точку максимальной мощности [2–4].

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.B37.21.1550 «Повышение эффективности преобразования электрической мощности солнечной батареи на основе многокаскадных фотопреобразователей, работающей в составе системы электропитания космического аппарата»).

Однако реально панель СБ состоит из нескольких параллельно включенных ветвей, каждая из которых в свою очередь состоит из последовательно включенных фотоэлектрических преобразователей (ФП) (рис. 1). При этом на случай выхода из строя или затенения параллельно каждому ФП включен шунтирующий диод $VD_{ш i}$, хотя неизбежный разброс токов короткого замыкания элементов в разных ветвях требует включения блокирующего диода $VD_{б j}$ последовательно в каждой ветви. Панели СБ устанавливаются на штангах, закрепленных на поворотных устройствах, являющихся частью системы ориентации панелей на Солнце. Поэтому «плюс» и «минус» СБ соединены с модулем энергопреобразующей аппаратуры посредством кабельной линии и поворотных токосъемных колец [2]. Таким образом, в составе реальной СБ имеется ряд пассивных элементов, которые являются источниками рассеивания мощности, генерируемой солнечными элементами, и оказывают влияние на форму переходных процессов при переходе из рабочей точки в точку короткого замыкания и обратно [5].

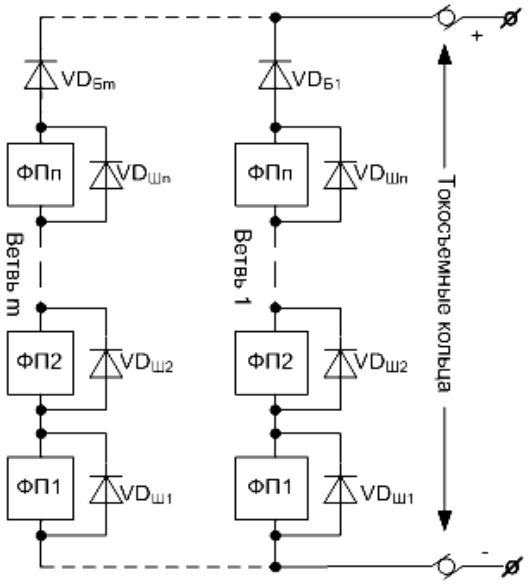


Рис. 1. Структурная схема панели СБ

Структурной схеме на рис. 1 соответствует часть эквивалентной электрической схемы на рис. 2, полученной из структурной схемы следующим образом: диоды $VD_{б j}$ были заменены одним диодом $VD_б$, через который протекает весь ток панели СБ $I_{СБ}$ и дифференциальное сопротивление которого в m раз меньше, чем у диода $VD_{б j}$, так как эти диоды включены параллельно; аналогичным образом m параллельно включенных ветвей, состоящих из последовательно включенных диодов $VD_{ш i}$, были заменены одной ветвью диодов $VD_{ш i}$ с дифференциальным сопротивлением каждого диода, в m раз меньшим.

Нелинейный функциональный источник тока $I_{СБ}(U)$ моделирует ВАХ панели СБ. В общем случае ВАХ СБ получают путем суммирования токов параллельных ветвей при одном и том же напряжении, а ВАХ ветвей – путем суммирования напряжений отдельных ФП при одном и том же токе ветви.

В данной статье мы будем использовать экспоненциальную модель ВАХ СБ, которая строится по трем точкам ВАХ: точке короткого замыкания, точке максимальной мощности (оптимальной точке) и точке холостого хода, и дает ошибку аппроксимации не более 5 % [6]. Эта модель имеет вид

$$I_{СБ}(U) = I_{КЗ}\left(1 - e^{f(U)}\right),$$

где $I_{КЗ}$ – ток короткого замыкания; $f(U) = (U - U_{XX})\times$ $\times\ln(1 - i)/(U_{XX}(j - 1))$ – функция текущего напряжения и параметров ВАХ, здесь U_{XX} – напряжение холостого хода, $I = I_{опт}/I_{КЗ}$ – относительный оптимальный ток, $j = U_{опт}/U_{XX}$ – относительное оптимальное напряжение, $U_{опт}$ и $I_{опт}$ – напряжение и ток в оптимальной точке соответственно.

Емкость $C_{СБ}$ моделирует эквивалентную емкость СБ, т. е. ту емкость, на заряд (разряд) которой затрачивается определенное время при переходе из точки короткого замыкания в оптимальной точку и наоборот. В общем случае емкость СБ можно либо рассчитать по емкости одного ФП $C_{ФП}$ как $C_{СБ} = mC_{ФП}/n$, где m – количество ветвей; n – количество элементов в ветви, либо измерить емкость панели в целом.

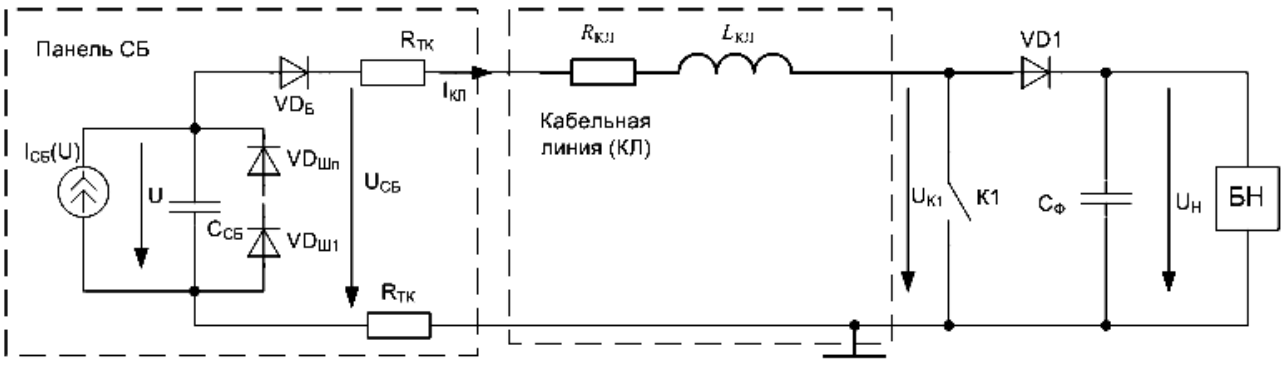


Рис. 2. Эквивалентная схема системы СБ–КЛ–ШС:
К1 – шунтирующий ключ; $C_Ф$ – конденсатор фильтра, БН – бортовая нагрузка

В настоящее время на КА применяются СБ на основе трехкаскадных (GaInP/GaAs/Ge) ФП. Так, например, трехкаскадный ФП производства компании Azur Space Solar Power GmbH (Германия) со встроенным кремниевым шунтирующим диодом имеет следующие номинальные значения параметров ВАХ: $I_{КЗ}$ = 0,525 А; U_{XX} = 2,67 В; $I_{опт}$ = 0,5 А; $U_{опт}$ = 2,35 В, $C_{ФП} \approx 2$ мкФ [7].

Необходимо также учесть, что ШС напряжения работает на токовой ветви ВАХ, в связи с чем напряжение в оптимальной точке должно быть больше напряжения выходной шины (нагрузки). Так, для шины питания напряжением 100 В $U_{опт}$ должно быть больше 110 В.

Для обеспечения такого $U_{опт}$ необходимо включить последовательно как минимум 47 трех-каскадных ФП. Если мы возьмем 14 ветвей по 48 ФП в каждой ветви, то получим панель СБ со следующими параметрами: $I_{КЗ} \approx 7{,}35$ А, U_{XX} = 128,2 В; $I_{опт}$ = 7,0 А; $U_{опт}$ = 112,8 В; $C_{СБ}$ = 0,58 мкФ – и 48 шунтирующими диодами. При этом экспоненциальная модель (1) будет иметь вид $I_{СБ}(U) = 7{,}35(1 - \exp(0{,}198 \cdot U - 25{,}4))$.

Сопротивление одного токосъемного кольца примем равным 50 мОм. Тогда если для одной панели СБ будет использоваться два токосъемных кольца, то параметр модели СБ $R_{ТК}$ = 0,1 Ом.

Модель кабельной линии. Как известно, любая длинная кабельная линия (КЛ) представляет собой систему с распределенными параметрами. Однако для упрощения анализа при моделировании КЛ можно с достаточной точностью заменить ее распределенные параметры двумя сосредоточенными параметрами: активным сопротивлением $R_{КЛ}$ и индуктивностью $L_{КЛ}$ (см. рис. 2), учет которых особенно необходим при длине кабельной линии в несколько метров, что характерно для больших КА.

Свяжем эти параметры с длиной кабельной линии. Как известно, сопротивление проводника можно рассчитать по выражению $R = \rho l/S$, где ρ – удельное сопротивление, Ом·мм^2/м; l – длина проводника, м; S – площадь поперечного сечения, мм^2. Для медного проводника сечением 1,5 мм^2 (ρ = 0,017 1 Ом · мм^2/м) получим $R_{КЛ}(l) = 0{,}011 \cdot l$ Ом/м. Согласно [8], 1 м проводника обладает индуктивностью 1 мкГн, поэтому $L_{КЛ}(l) = 1 \cdot 10^{-6} \cdot l$ Гн/м. Таким образом, для КЛ длиной 10 м $R_{КЛ} \approx 0{,}114$ Ом, $L_{КЛ}$ = 10 мкГн.

Моделирование динамических режимов в системе СБ–КЛ–ШС. Для иллюстрации влияния блокирующего и шунтирующих диодов, сопротивления токосъемных колец, а также параметров кабельной линии на форму переходных процессов проведем моделирование системы СБ–КЛ–ШС в пакете MicroCAP в формате P-Spice (рис. 3). В качестве моделей шунтирующих диодов будем использовать стандартные модели кремниевого диода GENERIC с дифференциальным сопротивлением диода 86 мОм, в качестве моделей блокирующего диода и диода VD1 – модель диода HFA30PA60C_IR, в качестве модели шунтирующего ключа – модель полевого транзистора IRF250N, сопротивление нагрузки примем равным 14 Ом, а емкость фильтрующего конденсатора $C_Ф$ равной 1 мФ.

Анализ полученных графиков показывает, что форма переходных процессов в течение одного цикла коммутации ШС имеет сложный вид, вследствие чего аналитическое описание переходных процессов крайне затруднительно.

Однако в переходных процессах можно выделить ряд характерных интервалов времени, в течение которых меняются состояния ключевых элементов – диодов и транзисторов.

В момент времени t_0 открывается ключ К1, напряжение на нем снижается до нуля и начинается процесс разряда емкости СБ через диод VD_6 и КЛ, при этом происходит накопление энергии в индуктивности $L_{КЛ}$.

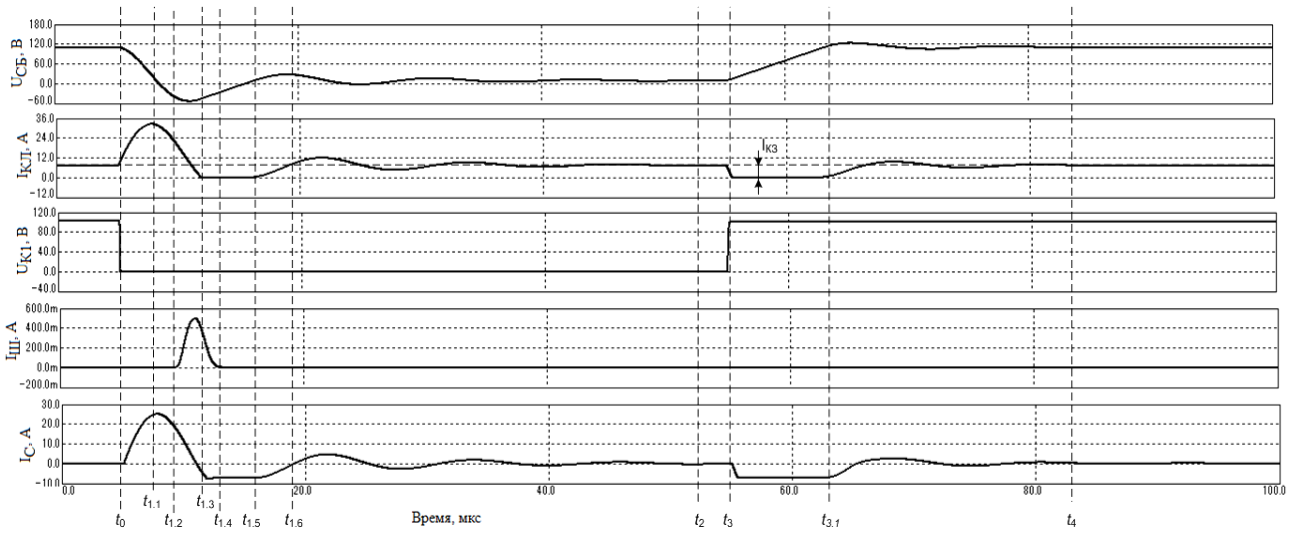


Рис. 3. Результаты моделирования динамических режимов в системе СБ–КЛ–ШС:
$U_{СБ}$ – напряжение на выходе СБ; $I_{КЛ}$ – ток кабельной линии; $U_{К1}$ – напряжение стока-истока ключа К1 (в случае использования МДП-транзистора); $I_ш$ – ток, протекающий через шунтирующие диоды; $I_с$ – ток, протекающий через емкость СБ

В момент времени $t_{1.1}$ ток КЛ достигает максимального значения, а емкость СБ полностью разряжается. Начиная с этого момента, энергия, запасенная в $L_{КЛ}$, через канал транзистора ШС сопротивление кабельной линии $R_{КЛ}$ и диод $VD_б$ заряжает емкость СБ.

В момент времени $t_{1.2}$ шунтирующие диоды отпираются, что ограничивает обратный выброс напряжения на СБ.

В момент времени $t_{1.3}$ блокирующий диод запирается, и в течение интервала времени $t_{1.3} \le t < t_{1.5}$ в СБ формируются переходные процессы. Так, в течение интервала времени $t_{1.3} \le t < t_{1.4}$ напряжения на СБ еще достаточно для протекания тока через шунтирующие диоды, но уже в момент времени $t_{1.4}$ шунтирующие диоды запираются и в течение интервала времени $t_{1.4} \le t < t_{1.5}$ происходит заряд емкости СБ током короткого замыкания СБ.

В момент времени $t_{1.5}$ емкость СБ заряжается до напряжения, достаточного для открытия блокирующего диода $VD_б$.

В момент времени $t_{1.6}$ процесс заряда емкости СБ заканчивается и ток в КЛ становится равным току короткого замыкания СБ. В течение интервала времени $t_{1.6} \le t < t_2$ процесс заряда/разряда емкости СБ заканчивается.

В момент времени t_3 ключ К1 запирается и в течение интервала времени $t_3 \le t < t_{3.1}$ происходит заряд емкости СБ. В момент времени $t_{3.1}$ напряжение СБ начинает превышать значение $U_н$, после чего диоды $VD_б$ и VD1 открываются и энергия СБ передается в нагрузку. В интервал времени $t_{3.1} \le t < t_4$ происходит затухание колебаний в контуре, образованном индуктивностью КЛ и емкостью СБ. А поскольку в этот интервал времени диоды СБ открыты, то колебания демпфируются сильнее.

Методика оценки потерь мощности в системе СБ–КЛ–ШС. Ввиду сложной формы тока, протекающего через элементы системы регулирования мощности СБ, разделить потери на статические (не зависящие от частоты преобразования) и динамические (зависящие от этой частоты) очень сложно. Поэтому в данной статье под статическими потерями будем понимать потери, напрямую не связанные с изменением состояния ключей (транзистора и диода), т. е. энергию, рассеиваемую в канале транзистора К1, диодах VD1, $VD_б$ и $VD_{ш}$, КЛ и токосъемных кольцах из-за перезаряда емкости СБ. Динамическими потерями будем считать потери, обусловленные изменением состояния полупроводниковых ключей: динамические потери ключа К1 (в течение нарастания и спада напряжения стока-истока), динамические потери в диодах, которые численно равны энергии, затрачиваемой на их обратное восстановление в случае применения кремниевого диода на основе *p–n*-перехода либо на перезаряд барьерной емкости в случае использования диода Шоттки, а также мощность, рассеиваемую на транзисторе К1 при разряде на канал его собственной емкости стока-истока.

Получить высокую точность оценки динамических потерь в транзисторных ключах с помощью имитационного моделирования в формате P-Spice затруднительно, так как модели полупроводниковых ключей не в полной мере отражают их динамические свойства. С другой стороны, применение быстродействующих МДП-транзисторов и диодов при частотах преобразования не более 10 кГц делают вклад их динамических потерь в общие потери в системе незначительным.

Стандартный подход к оценке потерь мощности, при котором экспериментально измеряются входная и выходная мощности преобразователя и на основании разницы между ними определяется мощность потерь, в большинстве случаев (например, для последовательного понижающего преобразователя постоянного напряжения) является приемлемым. Однако для ШС с короткозамыкающим ключом, у которого напряжение на входе изменяется скачком от нуля до выходного напряжения и обратно каждый цикл коммутации, указанный подход неприменим, поскольку входной сигнал по току и напряжению содержит широкий спектр гармоник. Если использовать при этом усредненные по времени значения, то погрешность измеряемой мощности будет значительной из-за того, что среднее значение входного тока существенно отличается от эффективного значения. Поэтому оценку потерь мощности в элементах системы регулирования мощности СБ, т. е. статических потерь, целесообразно проводить через эффективное значение тока, протекающего через блокирующий диод, токосъемные кольца, КЛ, ключ и диод ШС в течение одного цикла коммутации.

Для определения мощности потерь в этих элементах достаточно получить формы тока через КЛ в течение всего периода коммутации и воспользоваться сравнительно простыми стандартными соотношениями:

– для КЛ и токосъемных колец:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T I_{КЛ}^2(t)dt \cdot R_{акт}; \qquad (1)$$

– для ключа, который работает часть цикла:

$$P_{VT} = \frac{1}{T}\int_0^{T\cdot\gamma} I_{КЛ}^2(t)dt \cdot R_{СИ}; \qquad (2)$$

– для блокирующего диода:

$$P_{БД} = \frac{1}{T}\int_0^T \left(I_{КЛ}^2(t)\cdot R_{дVD} + U_{пVD}\cdot I_{КЛ}(t)\right)dt, \qquad (3)$$

– для диода VD1:

$$P_{VD1} = \frac{1}{T}\int_{\gamma T}^T \left(I_{КЛ}^2(t)\cdot R_{дVD} + U_{пVD}\cdot I_{КЛ}(t)\right)dt, \qquad (4)$$

где T – период коммутации; $I_{КЛ}(t)$ – ток КЛ в течение интервала коммутации; $R_{акт}$ – активное сопротивление КЛ или токосъемного кольца; $R_{СИ}$ – сопротивление открытого канала транзистора $K1$; $R_{дVD}$ – дифференциальное сопротивление диода; $U_{пVD}$ – напряжение отпирания диода.

Элемент	Мощность, Вт								
	l = 1 м			l = 5 м			l = 10 м		
	γ = 0,2	γ = 0,5	γ = 0,8	γ = 0,2	γ = 0,5	γ = 0,8	γ = 0,2	γ = 0,5	γ = 0,8
14 БД	9	9	8,89	9	9	9	8,87	8,9	8,86
672 ШД	3	1,93	1,14	5,74	4,4	5,87	6,33	3,27	1,88
ТК	11,23	10,37	9,5	9,05	9	9	8,14	8,17	7,83
КЛ	1,28	1,18	1,08	5,16	5,12	5,17	9,28	9,31	8,92
К1	7,62	8,12	8,74	5,15	6,63	8,45	4,88	5,83	6,93
VD1	6,25	3,88	1,48	6,2	3,87	1,39	6,29	4	1,59
$P_{K1} + P_{VD1}$	13,87	12	10,22	11,35	10,5	9,84	11,17	9,83	8,52
P_{Σ}	38,38	34,48	30,83	40,3	38,02	38,88	43,79	39,48	36,01
$(P_{K1} + P_{VD1}) / P_{\Sigma}$, %	36	34,8	33,1	28	27,6	25	25,5	24,9	23,66

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: БД – блокирующий диод; ШД – шунтирующий диод; ТК – токосъемные кольца; КЛ – кабельная линия; К1 – шунтирующий ключ.

В соотношении (4) мощность потерь на диоде рассчитана для модели диода, в которой он представлен эквивалентной ЭДС, соответствующей его напряжению отпирания, и активным сопротивлением, соответствующим дифференциальному сопротивлению диода, а время $t_{3.1}$ является моментом окончания заряда емкости СБ при переходе в оптимальную точку (см. рис. 3). Так, для модели диода HFA30PA60C_IR в формате P-Spice $U_{пVD}$ = 0,8 В, $R_{дVD}$ = 0,011 Ом, для модели GENERIC – $U_{пVD}$ = 0,77 В, $R_{дVD}$ = 0,086 Ом.

Оценка потерь мощности при различных длине кабеля и коэффициенте заполнения. Проведем оценку потерь мощности при различных длине кабеля l, коэффициенте заполнения γ и частоте коммутации 10 кГц согласно выражениям (1)–(4). Форму тока в КЛ за один цикл получим путем имитационного моделирования системы в пакете MicroCAP 7 после нескольких циклов, т. е. после установления рабочего режима. Результаты вычислений представим в таблице.

Анализируя данные таблицы, можно сделать следующие выводы:

– при одной и той же длине КЛ с ростом коэффициента заполнения импульса сигнала, управляющего шунтирующим ключом, а также при увеличении длины кабельной линии и фиксированном коэффициенте заполнения суммарные потери в системе уменьшаются. Этот факт объясняется тем, что при небольшом коэффициенте заполнения энергия, накопленная в индуктивности КЛ при разряде емкости СБ, не успевает поступить в нагрузку или выделиться в виде тепла на пассивных элементах и переходит в следующий рабочий цикл, повышая средний ток в КЛ;

– доля потерь в элементах ШС: шунтирующем ключе К1 и диоде VD1 – в зависимости от длины кабельной линии и коэффициента заполнения варьируется от 23,66 до 36 % от суммарных потерь, т. е. большая часть энергии, запасаемой паразитной емкостью СБ, рассеивается в виде тепла на шунтирующих и блокирующих диодах СБ (30 %), токосъемных кольцах и КЛ (30 %), а не самим ШС. Если учесть большое количество блокирующих и шунтирующих диодов, то такие потери в перерасчете на один диод практически не существенны. Однако если сравнить потери на токосъемных кольцах без учета энергии, запасаемой в емкости СБ, равные $(I_{КЗ}(t))^2 R_{ТК}$ (в нашем случае это 5,3 Вт, то из-за разряда емкости СБ потери на токосъемных кольцах увеличиваются с 47 до 110 % в зависимости от длины кабельной линии и коэффициента заполнения.

Таким образом, при анализе потерь мощности в системе регулирования мощности СБ на основе шунтовых стабилизаторов напряжения необходимо учитывать пассивные элементы СБ (блокирующие и шунтирующие диоды), токосъемные кольца и параметры кабельной линии, так как эти элементы системы являются основными источниками потерь мощности при разряде паразитной емкости СБ.

Библиографические ссылки

1. O'Sullivan D., Weinberg A. The Sequential Switching Shunt Regulator S3R // Proc. of the 3rd ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar. Noordwijk, Netherlands, 1977. P. 123–131.

2. Patel M. R. Spacecraft Power System. New York : CRC Press, 2005.

3. Influence of Parasitic Solar Array Capacitance in the Sequential Switching Shunt Regulator / A. Garrigos, J. Blanes, J. Carrasco, J. Ejea // Proc. of the 13th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conf. Benalmadena, Spain, 2006. P. 1198–1201.

4. Anil Kumar R., Suresh M. S. Effect of Solar Array Capacitance on the Performance of Switching Shunt Voltage Regulator // IEEE Transactions on Power Electronics. 2006. Vol. 21, № 2. P. 543–548.

5. Гордеев А. В., Сидоров А. С. Моделирование динамических режимов в шунтовом стабилизаторе напряжения // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч. конф. В 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. Ч. 1. С. 142–143.

6. Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов : монография / М. В. Лукьяненко, М. М. Лукьяненко, А. Н. Ловчиков, А. Б. Базилевский ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008.

7. 3G28 Triple-Junction Solar Cell Datasheet [Electronic resource]. URL: http://azurspace.de (date of visit: 02.11.2012).

8. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей : справ. кн. 3-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.

A. V. Gordeev, N. N. Goryashin, A. S. Sidorov

ANALYSIS OF POWER LOSSES IN SWITCHING SHUNT REGULATOR

The paper presents the results of power losses analysis in switching shunt regulator versus harness length and duty cycle, got by means of P-Spice simulation. The authors show that the power losses in switching shunt regulator are about 30 % of total power losses. The rest of losses are the share of shunt and blocking diodes of a solar array, slip rings of solar array drive and harness.

Keywords: shunt regulator, solar array, power losses.

© Гордеев А. В., Горяшин Н. Н., Сидоров А. С., 2012

УДК 621.314

Н. Н. Горяшин, А. С. Сидоров

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ СОВМЕСТНО С ИМПУЛЬСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ*

Представлены результаты экспериментов по работе светодиодных элементов большой мощности совместно с импульсным преобразователем. Исследованы инерционные свойства светодиодных элементов двух типов. Проанализировано их влияние на режимы работы выходного фильтра.

Ключевые слова: светодиод, импульсный преобразователь напряжения.

Импульсные преобразователи электроэнергии лежат в основе источников вторичного электропитания для светодиодных осветительных систем, длительность работы которых во многом зависит от обеспечения стабильности тока, протекающего через светодиодный элемент. Таким образом, при использовании в качестве первичного источника электроэнергии (ПИЭ) для питания светодиодных осветителей сети переменного тока общего назначения или источников постоянного тока, например аккумуляторных батарей и других электрогенерирующих устройств, необходимо промежуточное преобразование электроэнергии. В результате ресурс осветительной системы в целом, включая источник вторичного электропитания, будет определяться не только ресурсом светодиодных элементов, но и ресурсом элементов энергопреобразующего устройства.

Ведущие производители мощных светодиодных элементов заявляют, что ресурс (срок службы) этих элементов может достигать 100 тыс. ч, т. е. около 11 лет непрерывной работы с 30%-м падением яркости. Следовательно, необходимо обеспечить такой же длительный ресурс и для вторичных преобразователей. Как правило, такие преобразователи выполняются по классическим схемам с широтно-импульсной модуляцией и индуктивно-емкостным выходным фильтром с частотами преобразования в несколько десятков килогерц, массогабаритные характеристики которого и определяют массу всего преобразователя. В качестве емкостных фильтров используются оксидные или электролитические конденсаторы, ресурс которых варьируется от 2 до 5 тыс. ч, после чего они существенно теряют свою емкость, что приводит к увеличению пульсаций выходного напряжения и тока и, следовательно, к ухудшению как светоизлучающих, так и ресурсных характеристик светодиодов вплоть до выхода их из строя [1; 2]. Таким образом, длительный ресурс светодиодных источников света может быть обеспечен только за счет соответствующего ресурса элементов вторичного источника электропитания. Особенно актуально это для светодиодных осветителей большой мощности, отличающихся сравнительно высокой стоимостью.

Данная проблема может быть решена за счет повышения частот преобразования импульсных преобразователей напряжения до нескольких сотен килогерц, благодаря чему станет возможным применение входных и выходных фильтрующих конденсаторов малой емкости – пленочных или керамических конденсаторов, имеющих малую удельную емкость и высокую удельную стоимость, но гораздо больший ресурс по сравнению с электролитическими конденсаторами.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.B.37.21.1507 «Исследование и разработка перспективных импульсных высокочастотных вторичных преобразователей электроэнергии для светодиодных осветителей большой мощности»).

При частотах, близких к 1 МГц, из схемы можно будет исключить выходной фильтрующий конденсатор, а современная элементная база и схемотехнические решения, использующие в том числе и резонансные режимы работы импульсных элементов, позволят увеличить частоту преобразования до нескольких сотен килогерц с сохранением высокого КПД.

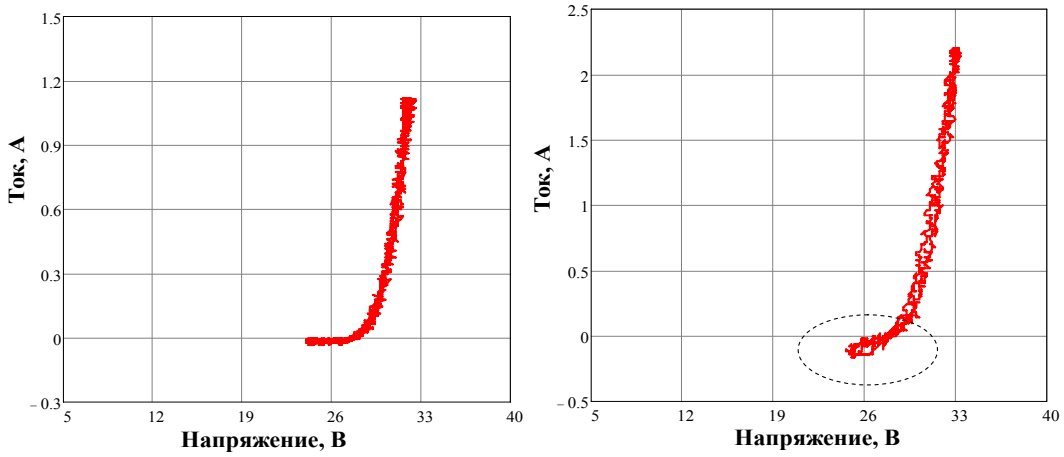
В данной статье представлено исследование динамических свойств светодиодных элементов большой мощности, которые могут быть использованы совместно с элементами выходного фильтра импульсного высокочастотного источника вторичного электропитания (ИВЭП).

Для оценки динамических параметров светодиодных элементов используются два способа.

Первый способ применяется для качественной оценки динамических свойств в режиме большого сигнала и заключается в экспериментальном построении динамических вольт-амперных характеристик (ВАХ) светодиодного элемента для ряда частот. Изменение формы такой ВАХ позволяет судить об инерционных свойствах прибора, обусловленных емкостью перехода и паразитной индуктивностью.

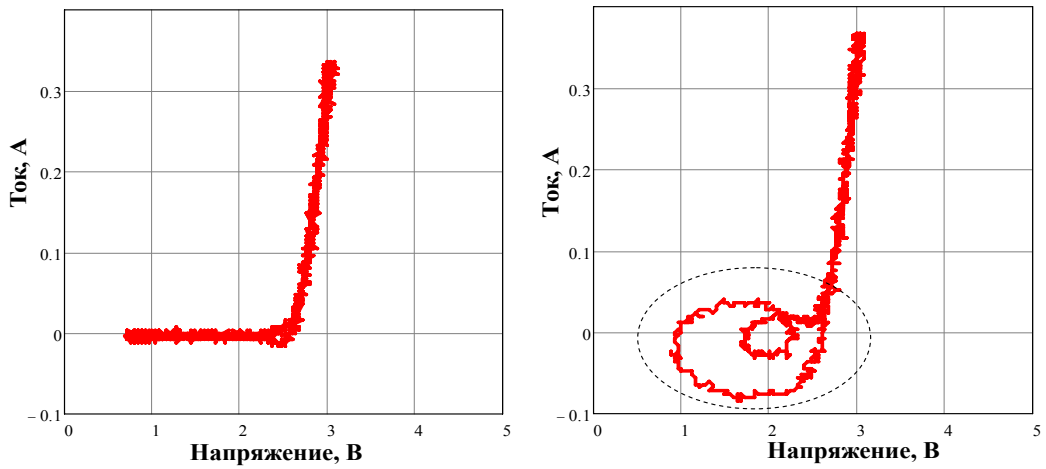
Эксперименты со светодиодной матрицей (рис. 1) и однокристальным светодиодным модулем (рис. 2), характеристики которых приведены в таблице, проводились на специально разработанном стенде, где в качестве сигнала развертки использовался синусоидальный сигнал тока.

Вторым способом оценки динамических параметров светодиодов является определение модуля импедансной частотной характеристики (ИЧХ) в рабочей точке ВАХ (рис. 3). Данный способ позволяет оценить характер реактивных составляющих цепи, т. е. емкость светодиодного элемента.



а *б*

Рис. 1. Экспериментальные динамические ВАХ светодиодной матрицы Epistar:
а – при частоте 100 кГц; *б* – при частоте 1 МГц



а *б*

Рис. 2. Экспериментальные динамические ВАХ светодиода XREWHT-L1-0000-005:
а – при частоте 100 кГц; *б* – при частоте 1 МГц

Таблица

Тип светодиодного элемента	Цвет	Материал чипа	Электрическая мощность, Вт	Световой поток, Лм	Описание
XREWHT-L1-0000-005	Белый (теплый)	InGaN на SiC подложке	1,15	56,8…62	Однокристальный светодиод
Epistar 10X10	Белый (холодный)	InGaN	110	7 500…8 500	Светодиодная матрица 10X10

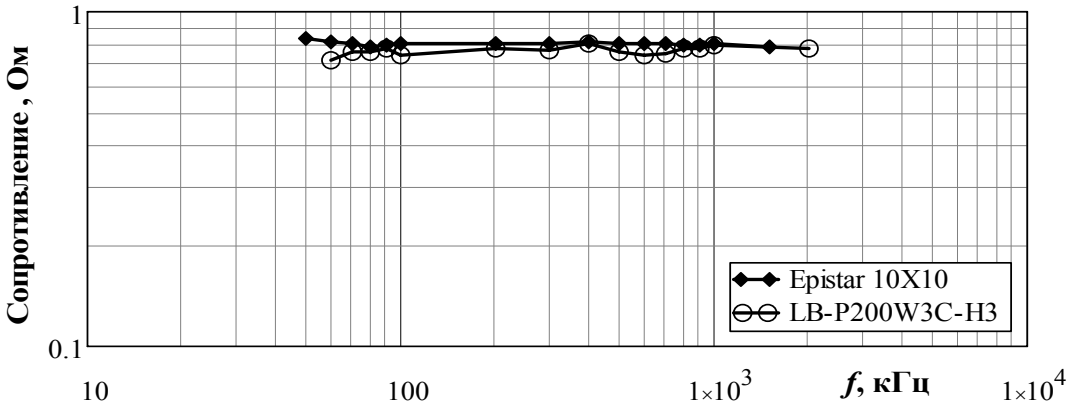


Рис. 3. Графики модулей ИЧХ светодиодных элементов Epistar 10X10 и LB-P200W3C-H3, полученных на экспериментальном стенде

Полученные экспериментальные результаты показывают, что исследуемые светодиодные элементы обладают малой емкостью на рабочем участке, являющейся следствием излучательной рекомбинации диффузионного заряда в базе перехода. Так, при частоте 1 МГц (на рис. 1, *б* и 2, *б* они выделены пунктиром) диффузионная емкость становится заметной в области малых токов с небольшой интенсивностью излучательной рекомбинации. Таким образом, эффект от использования собственной емкости светодиодного элемента в заданном диапазоне частот в качестве составляющей выходного фильтра проектируемого преобразователя напряжения (ПН) является несущественным. С другой стороны, условная безынерционность в таком диапазоне частот исключает динамические потери мощности при пульсирующем питающем токе на высокой частоте, по крайней мере до 1 МГц. Это в свою очередь допускает питание светодиодных элементов импульсным током и дает возможность оптимизировать параметры сглаживающего фильтра.

Как отмечалось выше, использование оксидных и электролитических конденсаторов большой емкости в качестве фильтрующих элементов ИВЭП светодиодных элементов не желательно с точки зрения надежности и обеспечении длительного ресурса.

Эксплуатационная надежность конденсаторов в аппаратуре во многом определяется воздействием ряда факторов, которые по своей природе можно разделить на следующие группы: электрические нагрузки; климатические нагрузки; механические нагрузки; радиационное воздействие [2]. Под влиянием этих нагрузок происходит изменение параметров конденсаторов. В условиях эксплуатации светодиодных осветительных систем одним из главных требований к ним является длительным ресурс в широком диапазоне климатических факторов и нестабильности первичной сети электропитания. Таким образом, главными факторами, влияющими на ресурс конденсаторов, будут климатические и электрические нагрузки.

Наибольшие необратимые изменения параметров вызываются длительным воздействием электрической нагрузки, при котором происходят процессы старения, ухудшающие электрическую прочность. Основной причиной старения при постоянном напряжении являются электрохимические процессы, возникающие в диэлектрике под действием постоянного поля и усиливающиеся с повышением температуры и влажности окружающей среды, а при переменном напряжении и импульсных режимах работы – ионизационные процессы, происходящие внутри диэлектрика или у краев обкладок, преимущественно в местах газовых включений. Напряжение электрического поля в диэлектрике конденсатора при его испытаниях выбирается с некоторым запасом, однако эксплуатация под электрической нагрузкой, превышающей номинальное напряжение, резко снижает надежность конденсаторов [2]. В этом случае наилучшим способом повышения надежности исследуемых устройств будет сокращение количества оксидных и электролитических конденсаторов в силовых цепях схемы. Однако если принять во внимание тот факт, что при работе от первичной сети переменного тока необходимо использовать низкочастотные фильтры, неотъемлемой частью которых являются оксидные и электролитические

конденсаторы, то полное их исключение представляется не всегда возможным. Поэтому далее мы будем рассматривать возможность исключения из выходного фильтра конденсаторов большой емкости.

Уменьшение выходной емкости фильтра или ее полное исключение зависит от двух факторов: повышения частоты преобразования, что впоследствии влияет на увеличение динамических потерь в полупроводниковых и магнитных элементах преобразователя, и сопротивления нагрузки в рабочей точке, т. е. при постоянном номинальном токопотреблении. Это обусловлено тем, что при использовании индуктивного фильтра индуктивность дросселя совместно с активным сопротивлением нагрузки образует *LR*-цепь с постоянной времени *L*/*R*. Таким образом, опираясь на экспериментальные данные по определению внутреннего сопротивления, можно сделать вывод о том, что малое дифференциальное сопротивление светодиодного элемента на рабочем участке ВАХ позволяет использовать безъемкостной фильтр (или, по сути, *L*-фильтр).

Для расчета параметров *LR*-фильтра необходимо знать размах пульсаций тока $\Delta I_{L\text{ф}}$, протекающего через дроссель и светодиодный элемент. Для исследуемых образцов светодиодных элементов было установлено, что на частоте до 1 МГц электрические инерционные свойства проявляются в пренебрежимо малой степени. Допустимые пульсации светового потока в различных нормативных документах рассматриваются только для низких частот (50 Гц для люминесцентных ламп без активного балласта, до 30 кГц – с активным балластом), при этом их уровень не должен превышать 10 %. К тому же в этих документах нет сведений о нормах пульсаций светового излучения на частотах выше 30 кГц. Таким образом, для определения такого начального расчетного параметра, как $\Delta I_{L\text{ф}}$, необходимо:

– связать $\Delta I_{L\text{ф}}$ с магнитными потерями мощности и массогабаритными характеристиками сердечника дросселя выходного фильтра, что предполагает возможность оптимизации последнего известными способами;

– принять максимально допустимое периодическое отклонение светового потока от среднего значения, характерного для низкочастотной области.

Возьмем за основу нормативные показатели из СНиП 23-05–95 «Естественное и искусственное освещение», где коэффициент пульсаций освещенности определяется как

$$K_{\text{п}E} = \frac{E_{\text{макс}} - E_{\text{мин}}}{2E_{\text{ср}}}, \qquad (1)$$

где $E_{\text{макс}}$ и $E_{\text{мин}}$ – максимальное и минимальное значение освещенности за период колебаний соответственно, лк; $E_{\text{ср}}$ – среднее значение освещенности за тот же период, лк.

Относительный световой поток светодиодного элемента связан с током, протекающим через него, как правило, линейной зависимостью в окрестности рабочей точки ВАХ (рис. 4). Если принять, что $E_{\text{ср}}$ соответствует 100%-й освещенности при некотором номинальном токе $I_{\text{ном}}$, то справедливо следующее соотношение:

$$K_{\text{п}E} = k_{EI} I_{\text{ном}} K_{\text{п}I}, \qquad (2)$$

где k_{EI} – коэффициент связи относительного светового потока с током, протекающим через светодиод; $K_{\text{п}I} = \Delta I_{L\text{ф}}/(2I_{\text{ср}})$ – относительный коэффициент пульсаций тока.

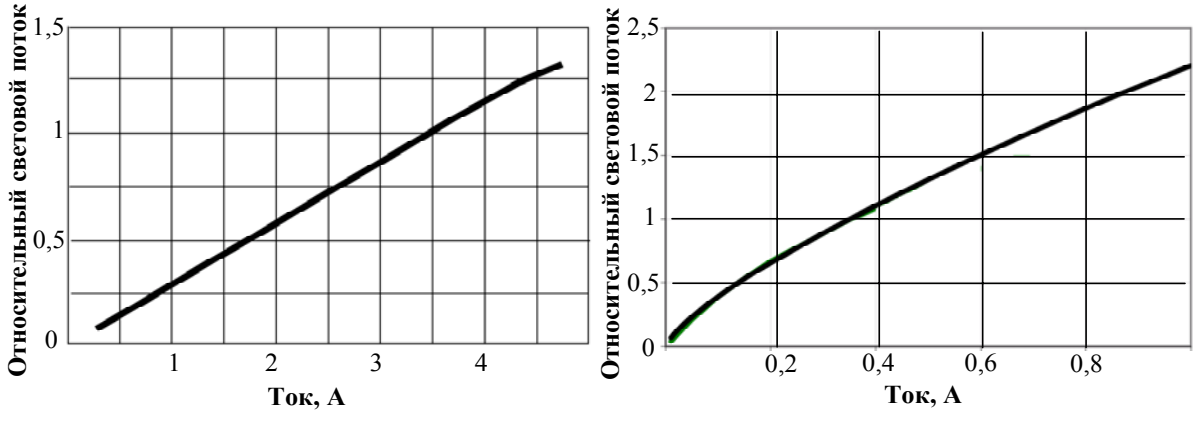
При нормальной освещенности $I_{\text{ном}} = I_{\text{ср}}$, однако, изменяя $I_{\text{ср}}$, можно регулировать световой поток (например, для режима дежурного освещения).

Выражая из (2) $\Delta I_{L\text{ф}}$, получим

$$\Delta I_{L\text{ф}} = \frac{2I_{\text{ср}} K_{\text{п}E}}{k_{EI} I_{\text{ном}}}. \qquad (3)$$

При заданном $K_{\text{п}E}$ для светодиодного элемента с параметрами $I_{\text{ном}}$ и k_{EI} расчет $\Delta I_{L\text{ф}}$ производится для минимального $I_{\text{ср}}$, определяемого техническим заданием.

После определения $\Delta I_{L\text{ф}}$ необходимо рассчитать индуктивность дросселя фильтра с учетом дифференциального сопротивления светодиодного элемента в рабочей точке ВАХ.



а *б*

Рис. 4. Зависимость относительного светового потока от протекающего тока:
а – для светодиодной матрицы Epistar 10X10; *б* – для светодиода XREWHT-L1-0000-005

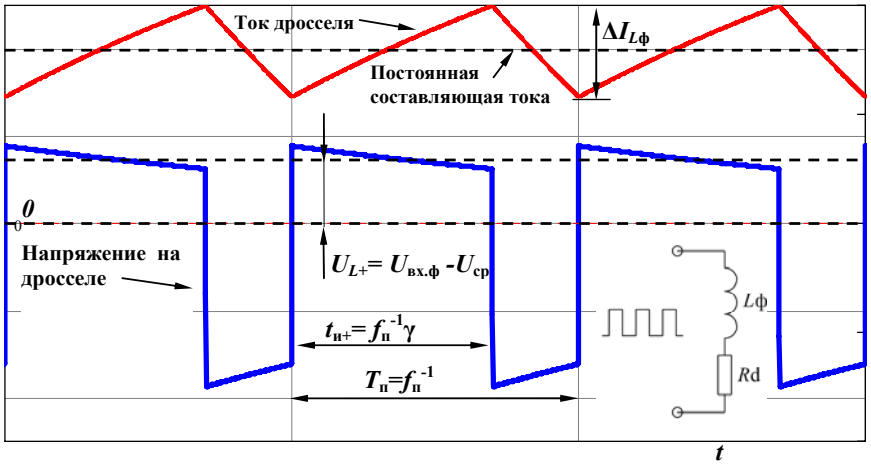


Рис. 5. Временные диаграммы тока и напряжения *LR*-цепи при входном импульсном напряжении прямоугольной формы

Для более наглядного представления о методике расчета индуктивности дросселя фильтра рассмотрим временные диаграммы тока и напряжения дросселя *LR*-цепи, полученные при воздействии входного периодического однополярного сигнала прямоугольной формы с частотой 100 кГц, индуктивностью дросселя фильтра $L_ф$ = 200 мкГн и дифференциальным сопротивлением диода R_d = 1 Ом (рис. 5).

Установим связь размаха пульсаций тока $\Delta I_{Lф}$, протекающего через светодиодный элемент и дроссель, с частотой преобразования $f_п$, параметрами импульсов напряжения (длительностью импульса и амплитудой) на входе фильтра и индуктивностью дросселя фильтра $L_ф$.

Для периодического сигнала произвольной формы справедливы следующие соотношения:

$$\Delta I_{Lф} = \frac{\int_0^{t_{и+}} U_{Lф}(t)dt}{L_ф}, \qquad (4)$$

$$I_{ср} = f_п \int_0^{f_п^{-1}} I_{Lф}(t)dt = \frac{f_п \int_0^{f_п^{-1}} U_{вх.ф}(t)dt}{R_d}, \qquad (5)$$

где $U_{Lф}(t)$ – напряжение на дросселе за время $t_{и+}$, соответствующее длительности положительной части полуволны за период.

Для сигнала прямоугольной формы соотношения (4) и (5) можно записать в приближенном виде:

$$\Delta I_{Lф} = \frac{\int_0^{\gamma f_п^{-1}} I_{Lф}(t)dt}{L_ф} \approx \frac{t_{и+}\left(U_{вх.ф} - U_{ср}\right)}{L_ф}, \qquad (6)$$

$$I_{ср} \approx \frac{U_{ср}}{R_d} \approx \frac{U_{вх}\gamma}{R_d}, \qquad (7)$$

$$f_п = \frac{\gamma\left(U_{вх.ф} - U_{ср}\right)}{\Delta I_{Lф} L_ф}, \qquad (8)$$

где $\gamma = t_{и+} / T_п$; $U_{вх.ф}$ – амплитуда напряжения на входе фильтра; $U_{ср}$ – усредненное по времени напряжение на светодиодном элементе.

В качестве примера рассмотрим экспериментальное исследование режимов работы светодиодных элементов при питании от импульсного стабилизатора тока с широтно-импульсной модуляцией и частотой импульсов на входе индуктивного фильтра 200 кГц.

Расчет индуктивного фильтра проводился по предложенной выше методике для сигнала прямоугольной формы и светодиодной матрицы Epistar 10X10. При этом принималось, что относительный коэффициент пульсаций светового потока не должен превышать 10 %. Используя соотношение (3), было получено значение $\Delta I_{Lф}$ = 0,8 А. При $U_{ср}$ = 31 В, $U_{вх.ф}$ = 84 В, $t_{и+}$ = 2,04 мкс и заданной частоте преобразования 200 кГц минимальное значение индуктивности фильтра согласно (6) составило 130 мкГн. Аналогичным образом выполнялись расчеты для светодиодного элемента XREWHT-L1-0000-005 с индуктивностью дросселя фильтра 159 мкГн.

Дроссель на тороидальном сердечнике МП-60 был изготовлен таким образом, чтобы обмотка укладывалась в один слой по всей длине магнитопровода с некоторым запасом. В результате индуктивность дросселя увеличилась до 209 мкГн. Задача эксперимента заключалась в подтверждении малой инерционности исследуемых светодиодных элементов и возможности использования чисто безъемкостного выходного фильтра.

Экспериментальные осциллограммы (рис. 6, 7) были сняты при помощи разработанного стенда для исследования светодиодных элементов.

На приведенных графиках сопоставлены временные диаграммы тока, протекающего через светодиодный элемент, и относительный световой поток. Относительный световой поток измерялся с помощью фотодетектора, построенного на основе фотодиода ФД256 и операционного усилителя AD8066 в соответствии с методикой, описанной в [3].

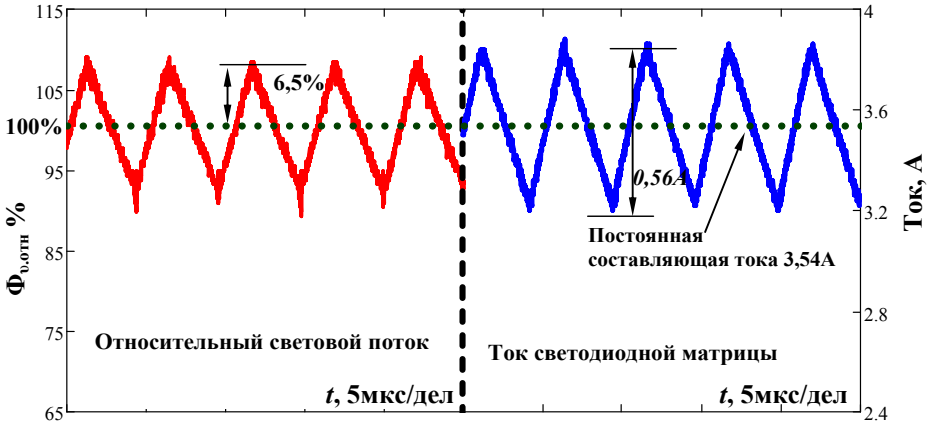


Рис. 6. Осциллограммы тока и относительный световой поток светодиодной матрицы Epistar 10X10 при питании от импульсного стабилизатора тока с ШИМ и *L*-фильтром

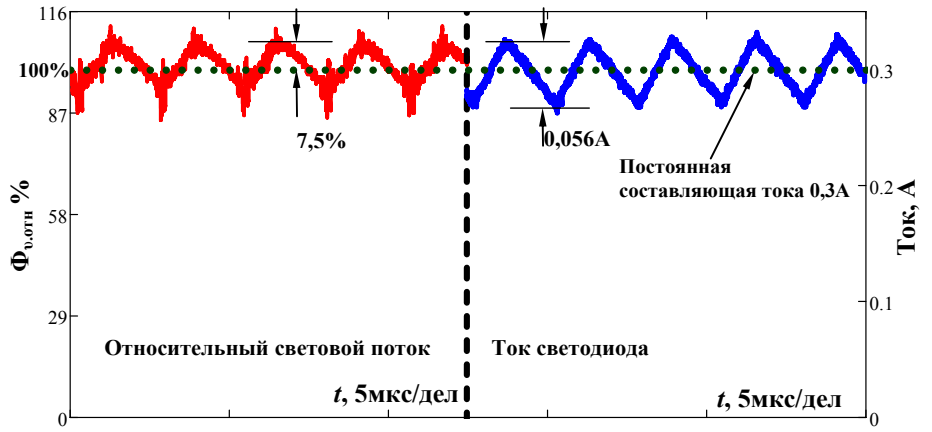


Рис. 7. Осциллограммы тока и относительный световой поток однокристального светодиодного элемента XREWHT-L1-000-005 при питании от импульсного стабилизатора тока с ШИМ и *L*-фильтром

Графики этого светового потока были получены путем математического преобразования экспериментальных осциллограмм напряжения фотодетектора, снятых по точкам при помощи цифрового запоминающего осциллографа. Это преобразование осуществлялось с помощью соотношения

$$\Phi_{\upsilon отн}(t) = \left(\frac{U_{ф}(t) - U_{ф.ср}}{U_{ф.ср}} + 1 \right) 100\ \%, \qquad (7)$$

где $\Phi_{\upsilon отн}$ – относительный световой поток; $U_{ф}$ – напряжение на выходе фотодетектора; $U_{ф.ср}$ – среднее за период значение напряжения на выходе фотодетектора, полученного на основании того, что в рабочей точке зависимость тока, протекающего через светодиодный элемент, и излучаемого светового потока можно считать линейной.

Пилообразная форма тока, проходящего через светодиодный элемент, практически без искажений преобразуется в световой поток. Расчетный коэффициент пульсаций для светодиодной матрицы Epistar 10X10 при $L_{ф}$ = 209 мкГн составляет 6,53 % (экспериментальный коэффициент – 6,5 %), для светодиодного элемента XREWHT-L1-000-005 – 7,2 % (экспериментальный коэффициент – 7,5 %).

Таким образом, по результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что рассматриваемые светодиодные элементы обладают незначительной оптической и электрической инерционностью, по крайней мере в диапазоне частот до 1 МГц, что допускает наличие пульсаций тока без дополнительных динамических потерь в цепи светодиодного элемента.

Эти исследования также подтверждают возможность использования в качестве выходного фильтра только индуктивного элемента, что в свою очередь позволяет исключить конденсатор в выходном фильтре и повысить надежность и ресурс работы импульсного преобразователя.

Библиографические ссылки

1. Радушкин О. Методы оценки срока эксплуатации электролитических конденсаторов // Силовая электроника. 2010. № 5. С. 19–22.

2. Юшков А. Конденсаторы Electronicon для силовой электроники // Компоненты и технологии. 2005. № 9. С. 10–14.

3. Jonson M. Photdetection and Measurement Maximizing Performance in Optical Systems. New York : McGraw-Hill Professional, 2004.

N. N. Goryashin, A. S. Sidorov

ANALYSIS OF OPERATING MODES OF HIGH POWER LED LIGHT SOURCES SUPPLIED BY SWITCHING CONVERTER

The paper presents results of experimental investigation of operation of high power LEDs supplied by switching converter with output current regulation. Dynamic performance of two LEDs is investigated. Influence of LED dynamic characteristics on operating mode of converter output filter is analyzed.

Keywords: LED, switching power converter.

© Горяшин Н. Н., Сидоров А. С., 2012

УДК 681.3

В. Г. Жуков, Д. А. Шеенок, В. А. Терсков

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Описывается модель оценки надежности программного обеспечения со сложной архитектурой, а также возможные варианты построения мультиверсионных модулей. Рассматриваются изменяемые характеристики программной архитектуры, оценивается мощность пространства ее оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация, программное обеспечение, надежность, информационная безопасность.

Основное внимание в теории и практике обеспечения информационной безопасности (ИБ) применения информационных технологий и систем сосредоточено на защите от деструктивных действий злоумышленника, искажения и хищения программных средств и информации баз данных. Однако при любом виде деятельности людям в процессе создания или применения изделий или систем свойственно непредумышленно ошибиться. В общем случае под ошибкой подразумевается дефект, погрешность или неумышленное искажение объекта или процесса. При этом предполагается, что известно правильное, эталонное состояние объекта, по отношению к которому может быть определено наличие отклонения – ошибки. В связи с этим дефекты функционирования информационных систем (ИС), которые не связаны с действиями злоумышленника и проявляются внешне как случайные, имеют разную природу и последствия, вплоть до катастрофических, соответствующих нарушению информационной безопасности использования ИС.

Наиболее полно ИБ ИС характеризует величина ущерба, который может возникнуть при проявлении дестабилизирующих факторов и реализации конкретных угроз ИБ, а также среднее время между проявлениями угроз. Однако описать и измерить в достаточно общем виде возможный ущерб при нарушении ИБ для критических ИС разных классов очень сложно, поэтому реализации угроз целесообразно характеризовать интервалами времени между их проявлениями, или наработкой на отказы. Это сближает понятия и характеристики степени защищенности с показателями надежности ИС.

Наиболее общим видом ресурсов, используемых при создании ИС, являются допустимые финансово-экономические затраты, или сметная стоимость разработки. При анализе защищенности этот показатель может применяться или как вид ресурсных ограничений, или как критерий оптимизации [1].

В настоящее время в качестве возможной альтернативы методам тестирования и верификации программ можно рассматривать подход мультиверсионного отказоустойчивого программирования, который обеспечивает высокий уровень надежности функционирования критичного программного обеспечения (ПО). Использование систем поддержки принятия решений при мультиверсионном программировании на этапе формирования надежного ПО позволяет уделять основное внимание формированию требований к его качеству. Однако улучшение характеристик надежности ПО с применением избыточности требует дополнительных временных и финансовых затрат. Поэтому основной вопрос на этом этапе заключается в том, каким образом, используя избыточность в архитектуре ПО, можно максимизировать надежность и снизить стоимость разработки. Этот вопрос может быть решен с помощью многочисленных методов многокритериальной поддержки принятия решений, ориентированных на задачи с дискретным пространством решений и учитывающих различные уровни информации о предпочтениях эксперта. Существующие методы определения глубины мультиверсионности и многокритериального принятия решений при выборе архитектуры позволяют спроектировать программную систему, отвечающую предъявляемым к ней требованиям [2].

Надежность архитектуры включает в себя как надежность центрального ядра системы, так и надежность индивидуальных компонентов, предоставляемых пользователю. Сбой отдельного компонента может привести к неработоспособности не только этого, но и, возможно, других компонентов ПО, однако это не приведет к неработоспособности всей системы в целом.

Тщательный анализ программной архитектуры позволяет выявить компоненты, ошибки в которых оказывают самое существенное влияние на надежность системы. Как правило, это компоненты, наиболее часто используемые или архитектурно связанные со множеством других компонентов, в связи с чем они более других подходят для разработки методом мультиверсионного программирования [3].

В зависимости от количества и величины компонентов условные и безусловные вероятности сбоя, доступа, анализа и времени восстановления, а также времени использования компонентов будут различными. Модель, приведенная в [4–6], может использоваться для оценки надежности ПО при возможных архитектурных изменениях и выбора надежной архитектуры из различных вариантов. В этой модели введены следующие обозначения:

1) M – число уровней в архитектуре ПО;

2) N_j – число компонентов на уровне j, $j \in \{1, ..., M\}$;

3) D_{ij} – множество индексов компонентов, зависящих от компонента i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$;

4) F_{ij} – событие сбоя, произошедшего в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$;

5) PU_{ij} – вероятность использования компонента i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$;

6) PF_{ij} – вероятность появления сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$;

7) $PL^{ij}{}_{nm}$ – условная вероятность появления сбоя в компоненте m на уровне n при появлении сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$, $n \in \{1, ..., N_m\}$, $m \in \{1, ..., M\}$;

8) TA_{ij} – относительное время доступа к компоненту i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$, определяемое как отношение среднего времени доступа к компоненту i на уровне j к числу сбойных компонентов на малых уровнях архитектуры за одно и то же время;

9) TC_{ij} – относительное время анализа сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$, определяемое как отношение среднего времени анализа сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$, к числу сбойных компонентов на всех уровнях архитектуры, анализируемых в одно и то же время;

10) TE_{ij} – относительное время устранения сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$, определяемое как отношение среднего времени восстановления в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$, к числу сбойных компонентов на всех уровнях архитектуры, в которых устранение сбоев происходит в одно и то же время;

11) TU_{ij} – относительное время использования компонента i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$, определяемое как отношение среднего времени использования компонента i на уровне j, $i \in \{1, ..., N_j\}$, $j \in \{1, ..., M\}$, к числу компонентов на всех уровнях архитектуры, применяемых в одно и то же время;

12) TR – среднее время простоя системы в большой архитектуре телекоммуникационного ПО реального времени, определяемое как время, в течение которого система не может выполнять свои функции;

13) $MTTF$ – среднее время появления сбоя в большой архитектуре телекоммуникационного ПО реального времени, определяемое как время, в течение которого сбоев в системе не происходит.

В архитектуре реального ПО среднее время простоя системы определяется по формуле

$$TR = \sum_{j=1}^{j=M} \sum_{i=1}^{i=Mj} \{PU_{ij} \times PF_{ij} \times [(TA_{ij} + TC_{ij} + TE_{ij}) + \\ + \sum_{(m=1)\&(m\neq j)}^{m=M} \sum_{n=1}^{n=Nn} [PL^{ij}_{nm} \times [(TA_{nm} + TC_{nm} + TE_{nm}) + \\ + \sum_{l \in Dnm} [PL^{nm}_{lm} \times (TA_{lm} + TC_{lm} + TE_{lm})]]] + \\ + \sum_{k \in Dij} [PL^{ij}_{kj} \times [(TA_{kj} + TC_{kj} + TE_{kj}) + \\ + \sum_{(m=1)\&(m\neq j)}^{m=M} \sum_{n=1}^{n=Nm} [PL^{kj}_{nm} [(TA_{nm} + TC_{nm} + TE_{nm}) + \\ + \sum_{l \in Dnm} [PL^{nm}_{lm} \times (TA_{lm} + TC_{lm} + TE_{lm})]]]]]\},$$

а среднее время сбоя – по формуле

$$MTTF = \sum_{j=1}^{j=M} \sum_{i=1}^{i=Nj} \{PU_{ij} \times (1 - PF_{ij}) \times [TU_{ij} + \\ + \sum_{(m=1)\&(m\neq j)}^{m=M} \sum_{n=1}^{n=Nm} [(1 - PL^{ij}_{nm}) \times \\ \times [TU_{nm} + \sum_{l \in Dnm} [(1 - PL^{nm}_{lm}) \times TU_{lm}]]] + \\ + \sum_{k \in Dij} [(1 - PL^{ij}_{kj}) \times [TU_{kj} + \sum_{(m=1)\&(m\neq j)}^{m=M} \sum_{n=1}^{n=Nm} [(1 - PL^{kj}_{nm}) \times \\ \times [TU_{nm} + \sum_{l \in Dnm} [(1 - PL^{nm}_{lm}) \times TU_{lm}]]]]]\}.$$

Среднее время простоя системы и среднее время сбоя могут быть использованы для предсказания надежности системы, состоящей из разных уровней архитектуры [4].

Для случая непрерывной эксплуатации сложного ПО анализ его готовности можно производить по формуле коэффициента готовности S:

$$S = MTTF/(TR + MTTF).$$

Однако рассмотренная выше модель не предлагает оптимальную надежную архитектуру ПО. Возможный выбор такой архитектуры при разработке больших систем телекоммуникационного ПО в реальном мас-

штабе времени ограничен многими факторами, в частности аппаратной архитектурой, составляющими зависимостями, которые не могут быть изменены, архитектурными уровнями, которые не могут быть разделены или объединены, кодом компонента, который невозможно изменить, и, возможно, другими ограничениями [4].

В [4] описана усовершенствованная модель, в которой при оценке стоимости разработки C_s учитывается мультиверсионный подход и стоимость разработки всей системы рассчитывается как сумма стоимости разработки каждой версии компонента:

$$C_s = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \sum_{k \in Z_{ij}}^{K} C_{ij}^k,$$

где Z_{ij} – множество версий компонента i, $i = 1, \ldots, N$, на уровне $j = 1, \ldots, M$, $k = 1, \ldots, K$; C^k_{ij} – стоимость разработки версии k компонента i на уровне j, $k \in Z_{ij}$, в денежных единицах.

Очевидно, что приведенные выше характеристики: коэффициент готовности системы S и стоимость разработки системы C_s – являются противоречивыми критериями оптимальности. Поэтому далее для критерия, отражающего затраты ресурсов на разработку, вместо стоимости будем использовать трудоемкость:

$$T_s = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \sum_{k \in Z_{ij}}^{K} T_{ij}^k.$$

В [7] приводятся два метода построения архитектуры, основанных на мультиверсионном подходе: NVP и RB.

При создании мультиверсионного компонента из K версий методом N-версионного программирования (N-Version Programming, NVP) надежность для любого K находится по формуле

$$R_{ij} = p^v_{ij} \left(1 - \prod_{k \in Z_{ij}}^{K} (1 - p^k_{ij}) \right),$$

где p^v_{ij} – вероятность сбоя алгоритма голосования; p^k_{ij} – вероятность сбоя версии $k \in Z_{ij}$.

При построении мультиверсионного компонента из K версий методом блока восстановления (Recovery Block, RB) надежность определяется следующим образом:

$$R_{ij} = \sum_{k \in Z_{ij}}^{K} p^k_{ij} p^{AT}_{ij} \prod_{l=1}^{k-1} \left((1 - p^l_{ij}) p^{AT}_{ij} + p^l_{ij} (1 - p^{AT}_{ij}) \right),$$

где p^k_{ij} – вероятность сбоя версии $k \in Z_{ij}$; p^{AT}_{ij} – вероятность безотказной работы приемочного теста для компонента i, $i = 1, \ldots, N$, на уровне j, $j = 1, \ldots, M$. Вероятность сбоя таких компонентов рассчитывается как $PF_{ij} = 1 - R_{ij}$.

Каждый программный компонент архитектуры или каждая его версия также могут быть доведены до определенного уровня надежности с помощью тестирования. С помощью статистических моделей, например модели роста надежности (Software Growth Reliability Model, SGRM) [5] или экспертной оценки, можно спрогнозировать трудозатраты и достигнутый уровень надежности программного компонента. Таким образом, у аналитика или проектировщика ПО возникает выбор из нескольких вариантов уровней надежности проектируемого компонента и соответствующих этим уровням трудозатрат.

Обобщая сказанное выше, приведем следующую усовершенствованную модель:

1) M – число архитектурных уровней в архитектуре ПО;

2) N_j – число компонентов на уровне j, $j \in \{1, \ldots, M\}$;

3) D_{ij} – множество индексов компонентов, зависящих от компонента i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$;

4) F_{ij} – событие сбоя, произошедшего в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$;

5) PU_{ij} – вероятность использования компонента i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$;

6) PF_{ij} – вероятность появления сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$;

7) PL^{ij}_{nm} – условная вероятность появления сбоя в компоненте m на уровне n при появлении сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$, $n \in \{1, \ldots, N_m\}$, $m \in \{1, \ldots, M\}$;

8) TA_{ij} – относительное время доступа к компоненту i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$, определяемое как отношение среднего времени доступа к компоненту i на уровне j к числу сбойных компонентов на малых уровнях архитектуры за одно и то же время;

9) TC_{ij} – относительное время анализа сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$, определяемое как отношение среднего времени анализа сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$, к числу сбойных компонентов на всех уровнях архитектуры, анализируемых в одно и то же время;

10) TE_{ij} – относительное время устранения сбоя в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$, определяемое как отношение среднего времени восстановления в компоненте i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$, к числу сбойных компонентов на всех уровнях архитектуры, в которых происходит устранение сбоев в одно и то же время;

11) TU_{ij} – относительное время использования компонента i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$, определяемое как отношение среднего времени использования компонента i на уровне j, $i \in \{1, \ldots, N_j\}$, $j \in \{1, \ldots, M\}$, к числу компонентов на всех уровнях архитектуры, применяемых в одно и то же время;

12) Z_{ij} – множество версий компонента i на уровне j, $k = 1, \ldots, K$;

13) T^k_{ij} – трудоемкость разработки версии k компонента i на уровне j, $k \in Z_{ij}$, человеко-часов;

14) T_{ij} – трудоемкость разработки приемочного теста (для метода RB) или алгоритма голосования (для метода NVP);

15) T_s – общая трудоемкость системы;

16) B_{ij} – дихотомическая переменная, принимающая значение 1 (тогда $NVP_{ij} = 0$, $RB_{ij} = 0$), если в про-

граммном компоненте не используется программная избыточность, в противном случае она равна 0;

17) NVP_{ij} – дихотомическая переменная, принимающая значение 1 (тогда $B_{ij} = 0$, $RB_{ij} = 0$), если в программном компоненте используется программная избыточность по методу *N*-версионного программирования, в противном случае она равна 0;

18) RB_{ij} – дихотомическая переменная, принимающая значение 1 (тогда $B_{ij} = 0$, $NVP_{ij} = 0$), если в программном компоненте используется программная избыточность по методу блока восстановления, в противном случае она равна 0;

19) *TR* – среднее время простоя системы в большой архитектуре телекоммуникационного ПО реального времени, определяемое как время, в течение которого система не может выполнять свои функции;

20) *MTTF* – среднее время появления сбоя в большой архитектуре телекоммуникационного ПО реального времени, определяемое как время, в течение которого сбоев в системе не происходит;

21) *S* – коэффициент готовности.

Рассмотрим параметры усовершенствованной модели, поддающиеся изменению, для поиска оптимальной архитектуры.

Надежность программного компонента можно повысить, используя программную избыточность, с помощью метода NVP или RB. Поэтому введем переменную $ARC_{ij} \in \{0$ – при NVP, 1 – при RB, 2 – для обычных компонентов$\}$.

При $ARC_{ij} = 0$; 1 возможна разработка Z_{ij} версий мультиверсионного компонента *i* на уровне *j*. В [6] рассматривается программная избыточность мультиверсионного компонента от двух до пяти версий.

Каждую версию компонента *i* на уровне *j* можно довести до заданного уровня надежности p^k_{ij}, затратив на ее разработку и тестирование некоторое количество ресурсов. Трудоемкость можно рассчитать с помощью статистических моделей надежности (например, модели SGRM). Множество различных вариантов надежности Var_{ij} компонента *i* на уровне *j* (или его версии, если была применена программная избыточность) и соответствующие этим вариантам трудозатраты определяются аналитиком или менеджером проекта. Например, для достижения 99%-го уровня надежности версии компонента необходимо затратить 4 человеко-часов, а для достижения 95%-го уровня надежности достаточно 2 человеко-часа. Тогда $VarR^1_{ij} = 0{,}99$, $VarT^1_{ij} = 4$, $VarR^2_{ij} = 0{,}95$, $VarT^2_{ij} = 2$. Для каждого компонента или его версии варианты надежности и соответствующей трудоемкости будут одинаковыми, так как эти версии разрабатываются по одной спецификации, но разными командами разработчиков или с помощью разных средств разработки.

Если принимается решение о введении программной избыточности, то в зависимости от выбранного метода разработки необходимо создание своего метакласса мультиверсионности – приемочного теста (для метода RB) или алгоритма голосования (для метода NVP). Множество вариантов надежности для p^{AT}_{ij} или p^v_{ij} и соответствующей им трудоемкости вводиться не будут, так как на практике приемочные тесты и алгоритмы голосования должны быть не слишком сложными, но обладающими абсолютной надежностью.

Задача оптимизации сводится к поиску максимума функции коэффициента готовности при ограничении на ресурсы, затрачиваемые на разработку или модификацию программной системы:

$$S \to \max,\ S \ge S^0,$$
$$T \to \min,\ T_s \le T_s^0,$$

где *S* – критерий оценки коэффициента готовности системы; T_s – критерий оценки трудоемкости разработки системы; S^0, T_s^0 – предельные допустимые уровни критериев.

Оценим мощность пространства оптимизации архитектуры программной системы, взяв для примера упрощенную ситуацию. Пусть при модификации программной системы необходимо разработать 10 новых программных компонентов. Перед системным аналитиком возникает задача выбора оптимальной архитектуры новых компонентов, чтобы надежность всей системы удовлетворяла требованиям заказчика, а трудоемкость разработки и тестирования соответствовала возможностям компании-разработчика.

В ходе работы системный аналитик определил, что в половину новых компонентов можно ввести программную избыточность, т. е. для них $ARC_{ij} \in \{0,1,2\}$, а при $ARC_{ij} \in \{0,1\}$ может быть введено не более трех версий. Для каждой версии определены по два варианта надежности с соответствующей трудоемкостью. Для половины компонентов, в которые не вводится программная избыточность, можно изменить только варианты надежности с соответствующей трудоемкостью. Тогда общее количество комбинаций вычисляется следующим образом:

$$N = \left(\mathrm{Var} + 2 \sum_{\mathrm{Ver}=2}^{L} \mathrm{Var}^{\mathrm{Ver}} \right)^D + \mathrm{Var}^F,$$

где *N* – количество комбинаций; Var – количество вариантов надежности с соответствующей трудоемкостью; Ver – количество версий при введении избыточности, изменяется от двух и более; *L* – предельно допустимое количество версий; *D* – количество программных компонентов, в которых возможно введение избыточности; *F* – количество программных компонентов, в которых введение избыточности невозможно. Для нашего примера Var = 2, *L* = 3, *D* = 5, откуда $N = 1{,}2 \cdot 10^7$.

Зависимости *N*(*D*), *N*(*F*) и *N*(*L*) в логарифмической шкале по оси *N* при тех же начальных условиях для параметров Var, Ver, *F*, *D* представлены ниже (рис. 1–3).

Анализ графиков на рис. 1 и 2 показывает, что увеличение количества программных компонентов, в которых возможно введение избыточности, влияет на рост мощности пространства оптимизации значительно больше, чем увеличение количества компонентов, в которых введение избыточности не предусматривается.

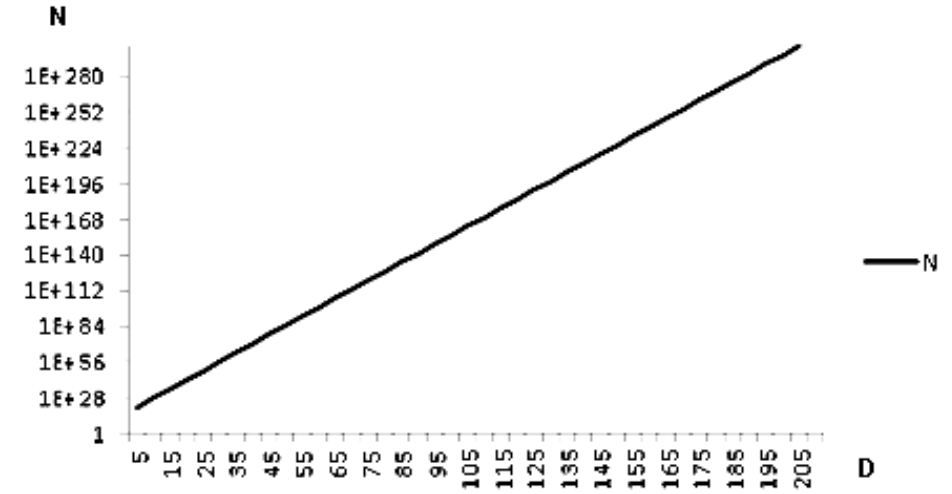


Рис. 1. Зависимость количества комбинаций от количества компонентов, в которых возможна избыточность

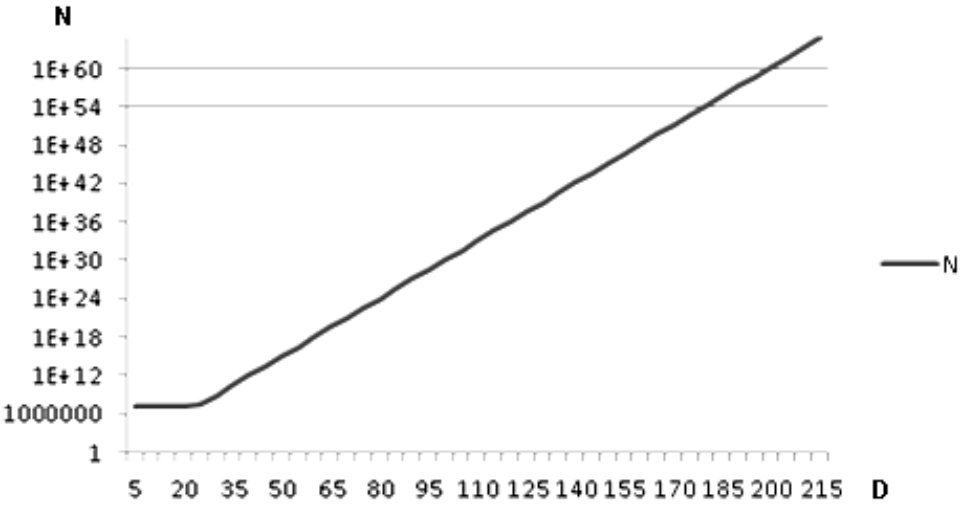


Рис. 2. Зависимость количества комбинаций от количества компонентов,
в которых невозможно введение избыточности

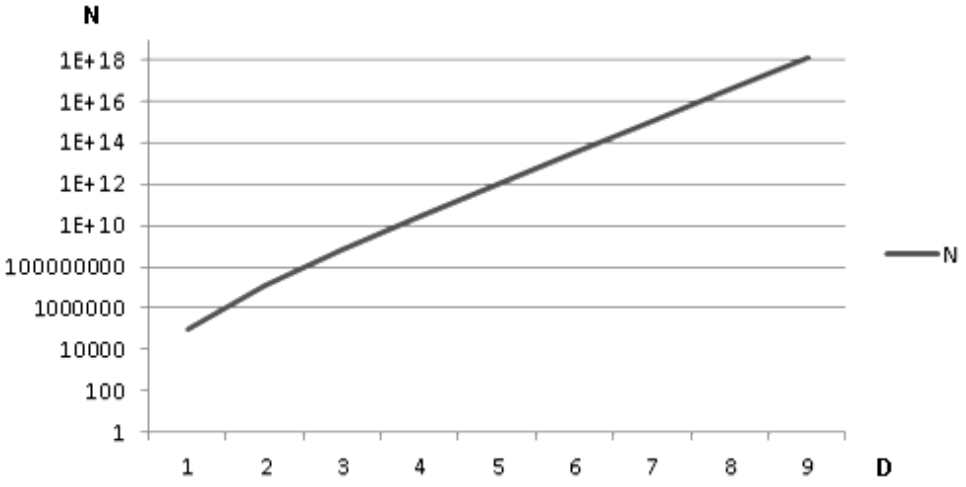


Рис. 3. Зависимость количества комбинаций от предельного количества версий

В рассмотренном нами примере выбрано достаточно малое количество компонентов, поэтому полученная размерность пространства оптимизации не слишком велика. Но если учесть, что функции коэффициента готовности и трудоемкости рассчитываются на персональном компьютере со средними характеристиками как минимум за 0,5 с, то перебор всех комбинаций даже для такого простого примера займет несколько месяцев.

Увеличение аппаратных характеристик персонального компьютера может незначительно снизить время вычислений, как и существенное ограничение критериев параметрами S^0 и T_s^0, которое также не позволит значительно сократить количество поисковых точек для сложных программных систем, имеющих большое количество компонентов в архитектуре. Это означает, что для решения поставленной задачи могут быть использованы только эвристические алгоритмы усеченного перебора, например генетические алгоритмы. Но даже тогда поиск решения такой задачи потребует значительных временных затрат. Эта проблема может быть разрешена за счет применения модификаций генетического алгоритма, такие как гибридные алгоритмы с локальным и глобальным поиском или коэволюционные алгоритмы [8–10]. Для проверки разработанного алгоритма должна быть создана тестовая задача с известным решением, которое алгоритм должен находить за приемлемое время.

Таким образом, нами был выполнен анализ параметров, поддающихся изменению при поиске оптимальной архитектуры программных систем, произведена оценка пространства оптимизации и определено влияние количества параметров архитектуры на рост мощности пространства оптимизации.

Библиографические ссылки

1. Липаев В. В. Функциональная безопасность программных средств [Электронный ресурс] // URL: http://sec.bl.by/articles/178811.php (дата обращения: 20.11.2012).

2. Царев Р. Ю. Система многоатрибутивного формирования мультиверсионных программных средств отказоустойчивых систем управления : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2003.

3. Дегтерев А. С., Русаков М. А. Архитектурная надежность программного обеспечения информационно-телекоммуникационных технологий // Приоритетные направления развития науки, технологий и техники : сб. материалов Всерос. заоч. электрон. конф. / Рос. акад. естеств. наук. М., 2005. С. 161–162.

4. Русаков М. А. Многоэтапный анализ архитектурной надежности в сложных информационно-управляющих системах : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2005.

5. Юнусов Р. В. Система модельно-алгоритмической поддержки многоэтапного анализа надежности программных средств : автореф. дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2004.

6. Привалов А. С. Система формирования гарантоспособной программной архитектуры для АСУ ТП : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2000.

7. Новой А. В. Система анализа архитектурной надежности программного обеспечения : дис. … канд. техн. наук. Красноярск, 2011.

8. Жуков В. Г., Жукова М. Н. Исследование коэволюционного алгоритма решения нестационарных задач оптимизации // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 1 (8). С. 27–30.

9. Сергиенко Р. Б., Семенкин Е. С. Коэволюционный алгоритм для задач условной и многокритериальной оптимизации // Прогр. продукты и системы. 2010. № 4. С. 24–28.

10. Жуков В. Г., Паротькин Н. Ю. Дифференцированный адаптивный генетический алгоритм // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. Новосибирск, 2011. Т. 9, вып. 1. С. 5–11.

V. G. Zhukov, D. A. Sheenok, V. A. Terskov

RELIABILITY IMPROVEMENT OF COMPLEX NETWORKS SOFTWARE

The authors describe a model of estimation of reliability of software of complex architecture and options for the construction of multi-version modules and consider variable characteristics of software architecture and estimate cardinality of its optimization.

Keywords: optimization, software, reliability, information security.

© Жуков В. Г., Шеенок Д. А., Терсков В. А., 2012

УДК 658.26

А. А. Кишкин, А. В. Делков, А. А. Ходенков, А. А. Зуев, Д. А. Жуйков

ПРОЕКТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ ПО ЗАМКНУТОМУ КОНТУРУ*

Представлен подход к математическому моделированию теплотехнических систем. Рассмотрены принципы построения и решения систем уравнений математических моделей. Приведены примеры моделирования прямого и обратного цикла.

Ключевые слова: теплотехническая система, математическая модель.

Современный этап развития техники требует перехода к оптимизации проектируемых теплотехнических систем (ТТС) с целью повышения их эффективности, сокращения энергозатрат и капитальных вложений.

В литературе достаточно большое внимание уделяется вопросам проектирования и расчетной оптимизации отдельных процессов в машинах и аппаратах, таким как интенсификация теплообмена, повышение эффективности работы компрессоров, насосов и т. д. Но общая задача моделирования теплотехнической системы как сложной системы взаимосвязанных элементов еще практически не решена [1].

Между тем на основе математической модели теплотехнической системы становится возможным решение широкого спектра задач, в том числе и оптимизации. В данной статье предпринята попытка разработки подхода к моделированию ТТС, работающих по замкнутому контуру.

Определение теплотехнической системы. Под теплотехнической системой будем понимать любую техническую систему, основным процессом в которой является обмен тепловыми потоками и энергией между элементами системы и с окружающей средой. Это широкий класс систем, включающий в себя холодильные машины, паро- и газотурбинные установки, двигатели внутреннего сгорания и т. д. Ввиду такого разнообразия ограничимся рассмотрением систем с замкнутым контуром, т. е. систем, внутри которых рабочее тело циркулирует без обмена массой с окружающей средой. Работу такой системы можно изобразить на диаграмме замкнутой линией.

Спектр применения теплотехнических систем разнообразен и включает в себя:

– промышленные теплоэлектростанции, работающие на пароводяном цикле;

– установки на органических циклах Ренкина, использующие тепло низкопотенциальных вторичных источников (солнечное, геотермальное тепло, энергию технологических тепловых сбросов);

– энергосистемы транспортных средств (локомотивы, летательные аппараты) с отводом технической работы на генератор электрического тока;

– системы жизнеобеспечения и терморегулирования космических аппаратов и станций.

Наиболее простым и самым распространенным является цикл Карно (прямой и обратный) (рис. 1). Этот цикл состоит из четырех процессов, и с его помощью можно описать значительную часть простых моделей теплотехнических систем.

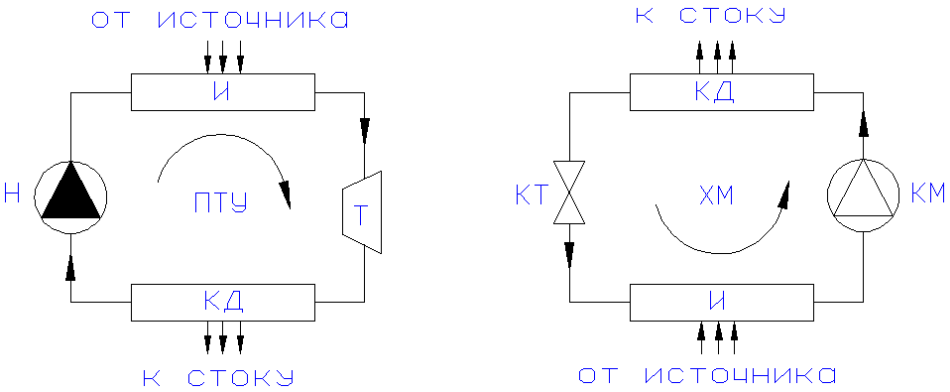


Рис. 1. Структурные схемы ТТС (прямой и обратный цикл Карно):
ПТУ – паротурбинная установка; ХМ – холодильная машина; И – испаритель;
КД – конденсатор; Т – турбина; КМ – компрессор; Н – насос; КТ – капиллярная трубка;
стрелками обозначено направление потоков вещества и энергии

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.B37.21.1835).

Структура цикла обусловливает наличие четырех составных элементов ТТС:

– двух теплообменников – испарителя и конденсатора;

– нагнетателя – насоса или компрессора;

– сопротивления – капиллярной трубки или турбины.

Примером прямого цикла является паротурбинная установка (ПТУ), имеющая в своем составе испаритель, турбину, конденсатор и насос. Обмен тепловыми потоками происходит на испарителе – от источника тепла к рабочему телу, и на конденсаторе – от рабочего тела к стоку тепла. Турбина производит техническую работу, выводимую из системы.

В качестве примера обратного цикла можно указать холодильную машину (ХМ) с аналогичным составом: испаритель, компрессор, конденсатор и капиллярная трубка. Обмен тепловыми потоками происходит на испарителе – от источника тепла к рабочему телу, и на конденсаторе – от рабочего тела в окружающую среду. Техническая работа затрачивается на привод компрессора.

Понятие системы как совокупности элементов позволяет определить иерархию системы, выделив различные ее уровни [2; 3], которые в общем случае зависят от сложности системы. Разграничение системы по уровням необходимо для ее математического описания.

В системе ТТС можно выделить следующие уровни:

– уровень конечных объемов (например, участок трубки теплообменника длины dx);

– уровень элементов системы (например, испаритель, насос);

– уровень системы (например, холодильная машина).

Общие закономерности в технических системах преобразования тепла, которые можно выделить на уровне протекающих в них процессов, позволяют говорить об общности математических моделей ТТС.

Математическая модель теплотехнической системы. Математическое описание ТТС включает в себя отдельные системы уравнений базовых элементов структурно-функциональной модели и системообразующие уравнения, отражающие взаимосвязи элементов на основе уравнений сохранения: количества движения (интеграл Бернулли), массы (уравнение неразрывности), энергии (уравнение энергии в термодинамических параметрах) – и уравнений состояния (поверхности состояния).

Конкретизация системы уравнений осуществляется условиями однозначности:

– геометрическими параметрами элементов по внешним и внутренним границам;

– физическими условиями (тип рабочего тела, вязкость, теплопроводность, теплоемкость);

– граничными условиями по температуре, давлению и скорости;

– начальными условиями (при нестационарном процессе).

Система уравнений математической модели. Математическое описание ТТС строится на четырех основных уравнениях, в различных интерпретациях составляющих основу технической гидромеханики, рассматривающей течение сжимаемых жидкостей с теплообменом [4; 5]. Эти уравнения могут быть представлены в двух формах – дифференциальной и интегральной:

– уравнение движения:

$$\rho\frac{d\bar{W}}{dt} = \rho\bar{F} - \mathrm{grad}(p) \text{ (уравнение движения)}, \quad (1)$$

$$\frac{\rho W^2}{2} + p + \Delta H_{\text{пот}} = \text{const} \text{ (уравнение механической энергии)},$$

где ρ – плотность; W – скорость; F – сила; p – давление; $\Delta H_{\text{пот}}$ – потери напора;

– уравнение неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho\,\mathrm{div}\left(\bar{W}\right) = 0, \qquad \rho SW = \text{const}, \quad (2)$$

где S – площадь сечения канала;

– уравнение сохранения энергии в термодинамических параметрах:

$$\rho\frac{dh}{\mathrm{dt}} = W\,\mathrm{grad}\,p + \mu D + \rho\frac{dq}{dt}, \quad (3)$$

$$\Delta U = A + \Delta Q \text{ (первый закон термодинамики)},$$

где μD – работа сил вязкости; $W\,\mathrm{grad}\,p$ – работа сил давления; h – энтальпия; q – удельный тепловой поток; U – внутренняя энергия; Q – тепловой поток;

– уравнение состояния (в общем виде):

$$f(p,\rho,T) = 0. \quad (4)$$

Эти четыре уравнения содержат четыре независимых физических величины: p,ρ,h,T. Таким образом, система является замкнутой.

Уравнения (1)–(4) универсальны и могут применяться к описанию любых процессов в теплотехнических системах. Однако систему этих уравнений можно конкретизировать для различных уровней в соответствии с принятой иерархией модели:

– уровня конечных объемов, на котором рассматривается настолько малый геометрический объем, чтобы иметь возможность применять дифференциальные уравнения;

– уровня элементов системы, на котором рассматривается конкретный элемент (компонент) – теплообменник, насос, капиллярная трубка. На этом уровне используются интегральные уравнения, которые в специальной литературе по моделированию технических систем называются компонентными;

– уровня системы в целом. На данном уровне применяются технологические интегральные уравнения, описывающие связи между элементами системы и определяемые для ТТС с массовым потоком материальным и энергетическим балансами [6; 7].

Для получения компонентных уравнений составим систему (1)–(4) на уровне одного элемента – теплообменника (рис. 2).

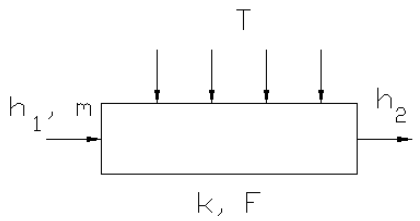


Рис. 2. К построению системы уравнений теплообменника (обозначения см. в тексте)

Для наглядности рассмотрим предельно простой случай – нагрев рабочего тела от теплопритока из внешней среды без фазового перехода рабочего тела. Потерями на трение пренебрегаем.

Обозначим через k и F коэффициент теплопередачи и площадь поверхности теплообменника соответственно, через ΔT – разницу температур между источником тепла и рабочим телом, через $\Delta h = h_2 - h_1$ – изменение энтальпии рабочего тела в процессе нагрева.

Уравнения для теплообменника запишутся следующим образом:

– уравнение движения: $p = \text{const}$, гидравлических потерь энергии нет;

– уравнение термодинамической энергии: $\Delta U = Q = \dot{m}\Delta h = kF\Delta T$;

– уравнение неразрывности: $\dot{m} = \text{const}$;

– уравнение состояния: $p\dfrac{1}{\rho} = RT$.

В данном случае бóльшая часть компонентных уравнений нефункциональна, и фактически из них можно оставить лишь два – уравнение термодинамической энергии и уравнение состояния. Первое показывает, что все тепло, подведенное к рабочему телу извне, переходит в его внутреннюю энергию, а второе необходимо для учета изменения термодинамических параметров (плотности).

Но именно комплекс из четырех уравнений позволяет отразить сложность моделируемых явлений: наличие канала изменяющейся геометрии приводит к включению в систему уравнения Бернулли, а наличие сбросов и подкачек потоков массы задействует уравнение неразрывности.

Рассмотрим уравнения (1)–(4) на уровне системы ПТУ:

– уравнение движения отражает барометрический баланс в системе, т. е. равенство давлений $p_{\text{нас}}$, производимых насосами, и давлений $p_{\text{пот}}$, теряемых на сопротивлениях:

$$\Delta p_{\text{нас}} = \Delta p_{\text{пот}};$$

– уравнение термодинамической энергии на уровне системы – это первый закон термодинамики для рабочего цикла: тепло $Q_{\text{кон}}$, отведенное от конденсатора, равно сумме тепла $Q_{\text{исп}}$, подведенного к испарителю, и потерь энергии на трение $L_{\text{пот}}$:

$$Q_{\text{кон}} = Q_{\text{исп}} + L_{\text{пот}};$$

– уравнение неразрывности замкнутой системы ПТУ выразит постоянство массового расхода:

$$\dot{m} = \text{const};$$

– последнее уравнение – уравнение состояния – запишется в общем виде:

$$f(p, \rho, T) = 0.$$

Таким образом, уравнения на уровне системы ПТУ отражают балансы характерных для нее величин: давления (барометрический баланс, гидравлическая энергия) и тепловой энергии (теплоэнергетический баланс). Эти два баланса энергий связаны между собой уравнением неразрывности и уравнением состояния. Поэтому при решении системы уравнений должны сойтись два баланса – гидравлической и теплоэнергетической энергии.

Построение балансов необходимо при исследовании потоковых процессов. В данном случае потоков два: поток массы и поток тепла. Эти потоки являются потенциальными, им соответствует два потенциала: давления и температуры. Таким образом, мы получили два уравнения типа потока: уравнение неразрывности и теплоэнергетический баланс – и два уравнения типа потенциала: уравнение движения и уравнение состояния.

Представление различных процессов через потоки и потенциалы характерно для многих работ по математическому моделированию технических систем, особенно сложных: массотеплообменных, электротеплообменных, электромеханических и т. д.

Система уравнений для ХМ существенным образом не отличается от системы уравнений для ПТУ. Барометрический баланс в системе представлен равенством давления, производимого компрессором, и давлений, теряемых на сопротивлениях. Первый закон термодинамики формулируется для ХМ следующим образом: тепло, отведенное от конденсатора, равно сумме тепла, подведенного к испарителю и мощности компрессора. Таким образом, уравнения (1)–(4) на уровне системы ХМ будут следующими:

– уравнение движения: $\Delta p_{\text{комп}} = \Delta p_{\text{кап.тр.}}$;

– уравнение энергии: $Q_{\text{исп}} = Q_{\text{кон}} - N_{\text{ком}}$;

– уравнение неразрывности: $\dot{m} = \text{const}$;

– уравнение состояния: $f(p, \rho, T) = 0$.

Методы решения системы уравнений. Цель решения системы уравнений ТТС состоит в поиске неизвестных параметров при заданных граничных условиях. В общем случае поиск решения требует специальных математических инструментов (методов Зейделя, Гаусса, релаксации и т. д.). Наиболее простым и распространенным методом является метод простых итераций (последовательного перебора).

Для ТТС решение методом простых итераций целесообразно вести с использованием представления процессов на диаграмме состояния рабочих тел. Из всех возможных рабочих циклов на диаграмме состояния выбирается тот, который соответствует двум балансовым уравнениям системы: балансу гидравлической энергии и теплоэнергетическому балансу. Формально цель решения системы уравнений ТТС состоит в том, чтобы найти положение рабочего цикла.

Один из способов решения состоит в следующем. В качестве центра начала вычислений на диаграмме берется точка равновесия рабочего тела при выключенном состоянии установки. Положение этой точки однозначно задается давлением, температурой и степенью сухости. В качестве начальной точки может быть взята и любая другая точка, и здесь следует отметить, что от того, какая точка выбрана, будет зависеть число итераций. Далее из этой точки строятся циклы, постепенно расходящиеся от нее в разные стороны. Шаг расхождений для каждого направления определяется системой уравнений для характеризуемого элемента.

Иллюстрация поиска решения для ПТУ при заданных внешних (температура источника и стока) и внутренних (геометрия и свойства материалов элементов) параметрах путем перебора возможных циклов представлена ниже (рис. 3). Расхождение диаграммы по вертикали определяется гидравлическим балансом, по горизонтали – теплоэнергетическим балансом. При этом в процессе решения задействованы системы уравнений как для отдельных элементов ПТУ, которые определяют положение процессов на диаграмме рабочего тела (испарение, расширение), так и система уравнений для ПТУ в целом, которая показывает связи между элементами. Задача считается решенной при замыкании гидравлического и теплоэнергетического баланса ПТУ.

Результаты анализа ТТС с использованием математических моделей. Математическая модель ПТУ применялась при проведении вычислительных экспериментов по получению характеристик ТТС при варьировании различных влияющих на нее параметров. В качестве моделируемой системы была взята установка на хладоне R22.

При исследовании влияния напора питательного насоса была получена следующая расчетная характеристика адиабатной мощности турбины: адиабатная мощность растет до некоторых пределов, затем переходит максимальное значение и начинает убывать (рис. 4).

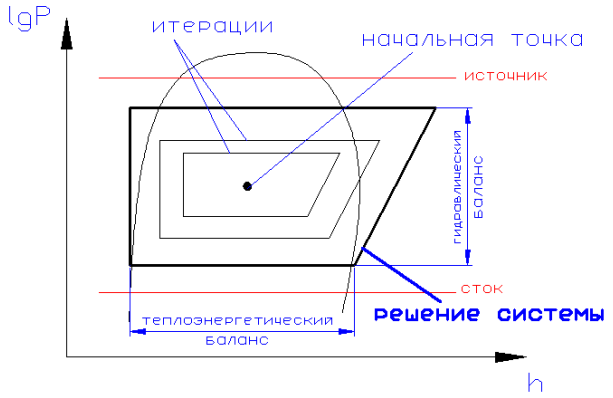


Рис. 3. Решение системы уравнений ПТУ на диаграмме рабочего тела

Расчетная характеристика хорошо согласуется с имеющимися теоретическими сведениями: при повышении напора насоса увеличиваются перепад давлений в системе, а значит и перепад температур, удельная работа турбины, растет массовый расход (см. рис. 4).

Однако в то же время можно наблюдать и негативные тенденции увеличения напора насоса:

– уменьшение наклона изоэнтроп и скорости прироста удельной работы турбины;

– приближение линии рабочего процесса в турбине к зоне двухфазной смеси. При больших напорах эта линия пересекает линию насыщения;

– снижение температурного напора на испарителе, нехватка ресурса теплообменника, уменьшение перегрева пара перед турбиной.

Характеристика, представленная на рис. 4, отражает наличие предела повышения эффективности установки при росте напора насоса. Для увеличесния адиабатной мощности можно предложить следующие меры:

– повысить температуру источника;

– повысить интенсивность теплообмена испарителя.

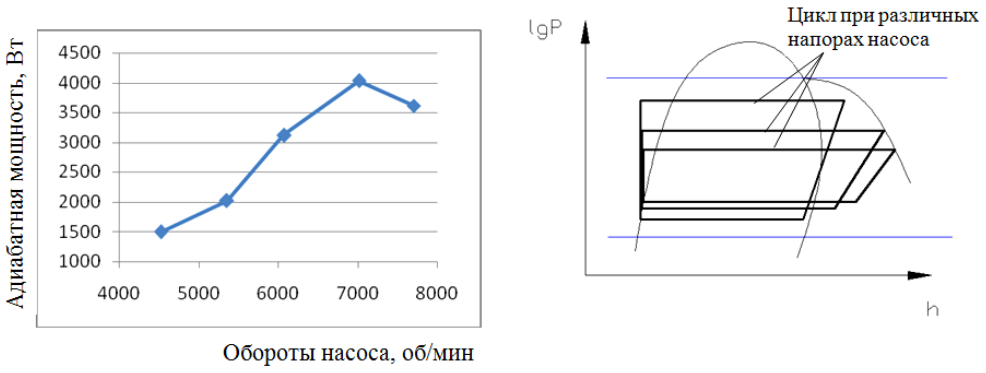


Рис. 4. Реакция ПТУ установки R22 на изменение оборотов насоса

Полученные результаты численных экспериментов и адекватность математической модели теоретическим сведениям о работе ПТУ позволяют сформулировать следующий вывод: вследствие неоднозначности влияния и взаимовлияния управляющих параметров на работу ТТС конструкторская и режимная оптимизация паротурбинных установок является комплексной задачей, предполагающей рассмотрение широкого спектра возможных состояний системы. Один из эффективных способов решения такой задачи заключается в использовании математической модели при проведении численных исследований.

Проблемы и перспективы математического моделирования ТТС. Представленные выше математические выкладки для построения системы уравнений ТТС носят большей частью иллюстративный характер, приведены для упрощенных расчетных схем элементов и не претендуют на универсальность. ТТС – сложная система, в которой протекают многочисленные взаимосвязанные процессы. Для отражения этих процессов в модель необходимо добавить:

– учет реальных процессов в элементах системы;

– учет фазовых состояний, режимов течения и теплообмена;

– учет изменения термодинамических свойств по длине каналов [8; 9];

– рассмотрение переходных процессов и тепловой инерционности системы и т. д.

В перспективе результаты математического моделирования могут стать хорошей основой для создания качественно нового инструмента проектирования и оптимизации ТТС.

В данной статье была предпринята попытка описания подхода к математическому моделированию теплотехнических систем, в основе которого лежат фундаментальные законы сохранения и уравнение состояния, согласующиеся с потоковыми и потенциальными уравнениями.

Рассмотрены формы построения системы уравнений для различных иерархических уровней ТТС, приведены примеры систем уравнений для ПТУ и ХМ, описаны методы их решения, представлены некоторые результаты численного моделирования процессов в ТТС.

Предложенный подход является универсальным и пригоден для моделирования ТТС любого уровня сложности.

В заключение необходимо отметить, что перспективной задачей математического моделирования, наряду с очевидным определением характеристик технических систем, является прогнозирование работоспособности проектируемых систем и их оптимизация по различным параметрам (КПД, массогабаритным параметрам, стоимости и т. д.), что позволит создать эффективный инструмент для расчета, проектирования и оптимизации технических систем, сокращающий время их испытаний и доводки в реальных условиях.

Библиографические ссылки

1. Хубка В. Теория технических систем : пер. с нем. 2-е изд. М. : Мир, 1987.

2. Теплосиловые системы: оптимизационные исследования / А. М. Клер, Н. П. Деканова, Э. А. Тюрина и др. Новосибирск : Наука, 2005.

3. Тарасик В. П. Математическое моделирование технических систем : учебник для вузов. Минск : ДизайнПРО, 2004.

4. Кочин И. Е., Кибель И. А., Розе М. В. Теоретическая гидромеханика. В 2 ч. Ч. 1. 6-е изд., испр. и доп. М. : Физматгиз, 1963.

5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. В X т. Т. VI. Гидродинамика. 3-е изд., испр. М. : Наука, 1986.

6. Математическое моделирование в технике : учебник для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. 2-е изд., стереотип. М. : Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана, 2003.

7. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М. : Энергия, 1978.

8. Кишкин А. А., Леонов В. П., Черненко Е. В. Энергетические характеристики потока в граничных условиях турбомашин // Вестник МГТУ. Спец. вып.: «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения». 2010. С. 51–56.

9. Кишкин А. А., Зуев А. А., Мелкозеров М. Г. Течение с теплоотдачей в агрегатах энергетических установок. Теоретические основы : монография. Saarbrückben : LAP Lambert Academic Publishing, 2012.

A. A. Kishkin, A. V. Delkov, A. A. Khodenkov, A. A. Zuev, D. A. Zhuykov

DESIGN OPTIMIZATION OF THERMO-TECHNICAL SYSTEMS OPERATING IN A CLOSED CIRCUIT

This article presents the approach to mathematical modeling of thermo-technical systems. The principles of construction and solutions of systems of equations of mathematical models are considered. Examples of forward and reverse cycles modeling are given.

Keywords: thermo-technical system, mathematical model.

© Кишкин А. А., Делков А. В., Ходенков А. А., Зуев А. А., Жуйков Д. А., 2012

УДК 62-506.1

Н. В. Коплярова, Н. А. Сергеева

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматривается задача идентификации нелинейных динамических процессов с использованием моделей Винера и Гаммерштейна, в которой линейная динамическая часть объекта находится в условиях непараметрической неопределенности. Вид нелинейности предполагается неизвестным или известным с точностью до параметров. Приводится алгоритм для создания адекватных в смысле среднеквадратичного критерия моделей систем. Предложенный способ моделирования динамических объектов основан на непараметрическом оценивании линейной и нелинейной частей системы.

Ключевые слова: нелинейность, непараметрика, модели Винера и Гаммерштейна.

Развитие теории и методов математического моделирования нелинейных динамических систем является актуальной проблемой современной прикладной математики. Наиболее важным с практической точки зрения классом динамических процессов являются системы, допускающие активный эксперимент при отсутствии полной априорной информации о структуре и параметрах моделируемого объекта.

Постановка задачи идентификации систем. В общем виде задача идентификации нелинейной динамической системы может быть представлена следующим образом (рис. 1).

Доступная априорная информация представляет собой неравномерную выборку $\left\{u_i, x_i,\ i=\overline{1,s}\right\}$ измерений входных и выходных переменных объекта объемом s. Данные о структуре объекта отсутствуют. Требуется по наблюдаемым входным-выходным переменным процесса построить математическую модель стохастического объекта, адекватно описывающую его поведение при произвольном входном воздействии и наличии аддитивной помехи на выходные данные.

Непараметрические модели. Основная особенность нелинейных динамических систем заключается в том, что они обладают нелинейными и динамическими свойствами, которые невозможно четко разделить. Описание нелинейной динамической системы в форме линейного передаточного коэффициента (по аналогии с линейной системой) приводит к бесконечному многообразию передаточных функций $H(jw)$, так как каждой реализации входного воздействия $u(t)$ и отклика $x(t)$ будет соответствовать своя функция $H(jw)$ [1].

Для упрощения моделирования нелинейный объект может быть представлен в виде некоторой комбинации линейных динамических и безынерционных нелинейных блоков. В таком случае модель, которая описывает исследуемый объект с требуемой точностью, представляет собой наилучшую комбинацию линейных (ЛЭ) и нелинейных элементов (НЭ) и их параметров.

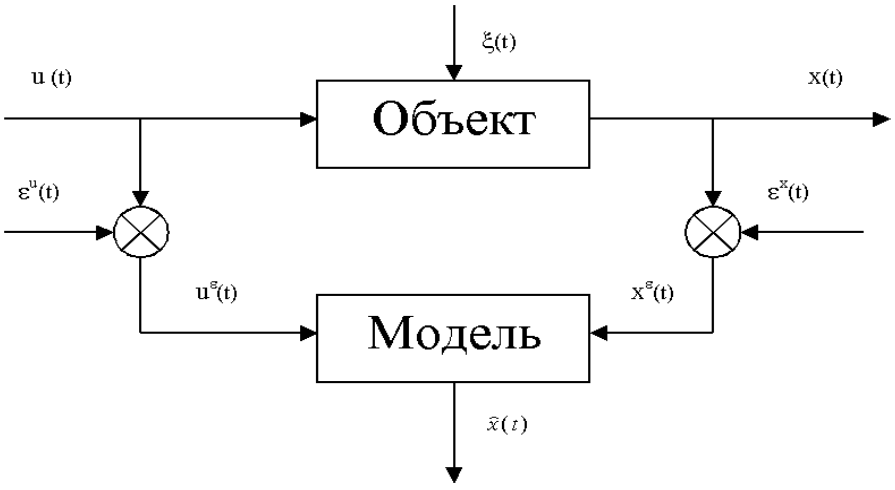


Рис. 1. Общая схема идентификации:
Объект – нелинейный динамический объект; $\xi(t)$ – ненаблюдаемое случайное воздействие;
$u(t)$ – входные переменные объекта; $x(t)$ – выходные переменные объекта, u_t^{ξ}, x_t^{ξ} – соответствующие наблюдения
переменных процесса, далее обозначаемые $\{u_i, x_i,\ t=1,\ s\}$; $\varepsilon^u(t), \varepsilon^x(t)$ – случайные факторы, действующие в каналах измерения
переменных в дискретные моменты времени t, такие что $M\{\varepsilon\}=0,\ D\{\varepsilon\}<\infty$; $\tilde{x}(t)$ – выход модели объекта

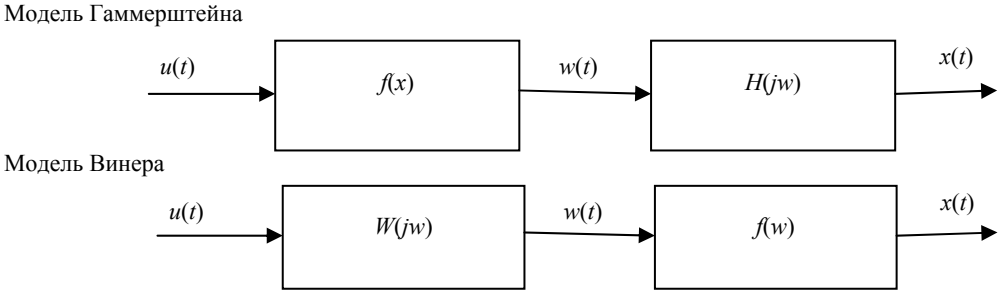


Рис. 2. Модели Винера и Гаммерштейна (обозначения см. в тексте)

Простейшие модели нелинейного динамического объекта – модели Винера и Гаммерштейна – представляют собой последовательное соединение двух блоков (рис. 2).

Преимуществом использования таких моделей является их относительная простота, выражающаяся в том, что нелинейные и динамические свойства исследуемого объекта в них искусственно разделены и сосредоточены во входном и выходном блоках. Линейный динамический блок простейшей модели должен в какой-то мере воспроизводить динамические свойства исследуемого объекта, а нелинейный блок – имитировать нелинейные свойства исследуемого объекта [1]. Однако простейшие модели описывают реальный объект лишь приближенно. Основная сложность в построении моделей таких объектов заключается в том, что внутренние сигналы $w(t)$ являются недоступными для измерения.

Пусть исследуемая нелинейная динамическая система представлена в виде двух последовательно включенных звеньев – линейного динамического и нелинейного статического (модель Винера или Гаммерштейна) – и имеется выборка измерений реакции объекта на тестовое входное воздействие $u(t)$: $\{u(t_i), x_i\}$, $i = 1, s$. Данные о структуре объекта отсутствуют. Существует возможность проведения экспериментов.

Здесь возможны два случая:

1) структура и параметры линейной динамической части системы неизвестны. Предположим некоторый вид нелинейности в объекте – известный с точностью до набора параметров. Тогда нелинейный элемент может представлять собой одно из следующих звеньев:

– квадратор, который задан соотношением

$$x(t) = a\left(w(t)\right)^2; \qquad (1)$$

– звено насыщения с порогом насыщения b_1:

$$x(t) = \begin{cases} w(t), x_1(t) \le b_1, \\ b, w(t) > b, \\ -b, w(t) < -b; \end{cases} \qquad (2)$$

2) тип нелинейного элемента неизвестен.

На основании имеющейся информации необходимо построить модель данной системы, адекватно описывающую ее поведение.

Задача идентификации нелинейной системы может быть разделена на две части: идентификацию линейного элемента и идентификацию нелинейной системы.

Рассмотрим задачу идентификации линейного элемента.

Метод построения непараметрической модели линейной динамической системы (ЛДС) основан на том, что реакция такой системы $w(t)$ на входное воздействие $u(t)$ описывается интегралом Дюамеля (сверткой) [2]:

$$x(t) = k(0)u(t) + \int_0^t k'(t-\tau)u(\tau)d\tau = \\ = k(0)u(t) + \int_0^t h(t-\tau)u(\tau)d\tau, \qquad (3)$$

где $k(t)$ – переходная функция системы; τ – переменная интегрирования; $h(t)$ – весовая функция системы.

Для вычисления значения выхода объекта $x(t)$ необходимо знать его весовую функцию $h(t)$. Однако на практике снятие весовой функции с объекта представляется невозможным. Поэтому основная идея идентификации ЛДС в условиях непараметрической неопределенности состоит в непараметрическом оценивании весовой функции.

Запишем оценку переходной функцию системы в виде стохастической аппроксимации регрессии непараметрического типа следующим образом:

$$k_s = \frac{1}{s \cdot C_s} \sum_{i=1}^{s} k_i \cdot H\left(\frac{t - t_i}{C_s}\right), \qquad (4)$$

где k_i – реально снятые значения переходной характеристики ЛДС, т. е. сигнал, получаемый на выходе системы при подаче на ее вход единичного ступенчатого воздействия $1(t)$; $H(\cdot)$ – колоколообразная функция; C_s – параметр размытости. На них накла-

дываются условия сходимости, которым они должны удовлетворять [3]:

$$C_s > 0,\ s = 1, 2, \ldots;\ \lim_{s\to\infty} C_s = 0,\ \lim_{s\to\infty} sC_s = \infty,$$

$$\int_{\Omega(u)} H'(u)du = 0, \quad (5)$$

$$C_s \int_{\Omega(u)} H'(u)udu = -1,$$

$$\lim_{s\to\infty} c_s^{-1} H\left(\frac{\tau - t}{c_s}\right) = \delta(\tau - t),\ u = \frac{\tau - t}{c_s},$$

$$\lim_{s\to\infty} sc_s = \infty,\ c_s > 0,\ s = 1, 2, \ldots,\ c_s \to 0. \quad (6)$$

Переходная функция $h(t)$ связана с весовой функцией $k(t)$ соотношением [3]:

$$h(t) = \frac{dk(t)}{dt}, \quad (7)$$

Тогда непараметрическая оценка весовой функции примет следующий вид:

$$k_s' = h_s(t) = \frac{1}{s \cdot c_s} \sum_{i=1}^{s} k_i \cdot H'\left(\frac{t - t_i}{c_s}\right). \quad (8)$$

Подставив оценку весовой функции в интеграл Дюамеля, получим непараметрическую модель ЛДС, после чего, заменив интеграл его дискретным аналогом (суммой), будем иметь непараметрическую расчетную модель линейного динамического элемента системы:

$$x_s = k_s(0) \cdot u(t) + \frac{1}{s \cdot c_s} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau, \quad (9)$$

где τ – переменная интегрирования, которая изменяется с дискретностью $\Delta\tau$.

А теперь рассмотрим задачу идентификации нелинейной системы для моделей Винера и Гаммерштейна.

Модель Винера. Предположим, что структура нелинейного элемента в модели Винера (см. рис. 2) задана с точностью до набора параметров, т. е. выход исследуемого объекта вычисляется как некоторая функция от интеграла Дюамеля:

$$x(t) = f\{w(t), \alpha\}, \quad (10)$$

где $x(t)$ – выходной сигнал системы; $w(t)$ – выход линейной части системы (не измеряемый); $u(t)$ – входной сигнал системы; $f\{\ \}$ – нелинейный оператор.

Математическая модель нелинейного объекта может быть представлена в виде системы уравнений (9), (10), в которых вместо весовой функции $h(t)$ и параметров α используются их статистические оценки. Эти оценки могут быть получены, если при тех же условиях эксперимента, в которых были получены реализации $\{u_i, x_i\}, i = \overline{1,s}$, сформировать выборку $\{u_i, \omega_i\}, i = \overline{1,s}$.

Для некоторых классов нелинейных элементов выражение (10) может быть разрешено относительно $\omega(t)$ [4]:

$$\omega(t) = f^{-1}(x(t), \alpha). \quad (11)$$

В этом случае непараметрическая модель нелинейного объекта примет вид

$$\hat{x}(t) = f(\hat{w}(t), \alpha),\ \hat{w}(t) = \int_0^t \hat{h}(t - \tau)u(\tau)d\tau. \quad (12)$$

Идентификация нелинейной системы с квадратором. Пусть имеется система, представленная в виде модели Винера, причем нелинейная часть этой системы представляет собой квадратор, описываемый функцией вида $f(p) = cp^2$, где c – константа, а выход объекта вычисляется следующим образом: $x(t) = f(w, a) = cw^2$.

При единичном входном воздействии $u(t) = 1$ выход нелинейной системы $x(t) = cw(t)^2$, т. е. переходную характеристику линейного элемента $w(t) = k(t)$ можно выразить через выход исследуемого процесса:

$$k(t) = \sqrt{x(t)/c}. \quad (13)$$

При произвольном входном воздействии и нулевых начальных условиях выход линейной части системы описывается выражением (9). С учетом рассчитанного значения переходной функции (4) выход линейного элемента будет следующим:

$$w(t) = \frac{1}{sc_s} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta t} \sqrt{\frac{x_i}{c}} H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau. \quad (14)$$

Тогда модель нелинейного объекта $x(t)$ имеет вид

$$\hat{x}(t) = \left[\frac{1}{sc_s} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta t} \sqrt{x1_i} H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau\right]^2, \quad (15)$$

где $x1_i$ – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие; $u(t)$ – тестовое входное воздействие.

В качестве примера рассмотрим нелинейную динамическую систему, поведение которой имитируется следующим образом: линейная часть объекта описывается дифференциальным соотношением

$$2 \cdot y''(t) + 0,3 \cdot y' + 1,5 \cdot y(t) = u(t), \quad (16)$$

а нелинейный элемент представляет собой квадратор вида (1) с параметром $a = 4,37$ (рис. 3).

Идентификация нелинейной системы с насыщением. Пусть нелинейное звено системы описывается функцией вида (2). В данном случае при $w(t) < a$ выход объекта совпадает с выходом его линейной динамической части. В остальных случаях выход объекта представляет собой константу, которую можно определить опытным путем в результате нескольких статических экспериментов [1].

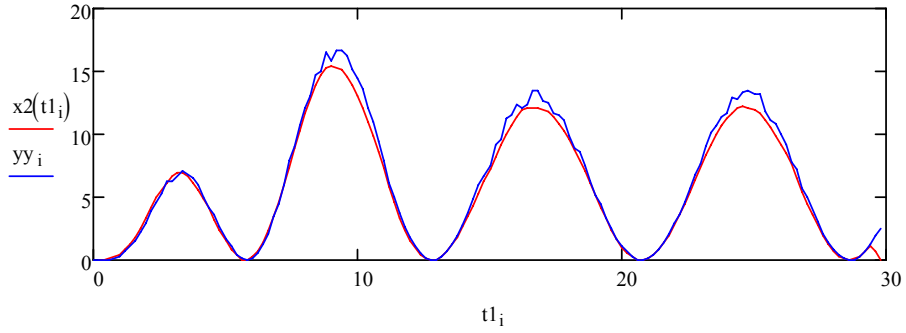


Рис. 3. Модель нелинейной системы $x2(t)$ с выходом yy_i, объемом выборки $s = 150$, шагом дискретизации $h = 0{,}2$, помехой 5 %, входным воздействием $u(t) = 2\cos(0{,}4t)$ и относительной средней ошибкой моделирования 2,5 %

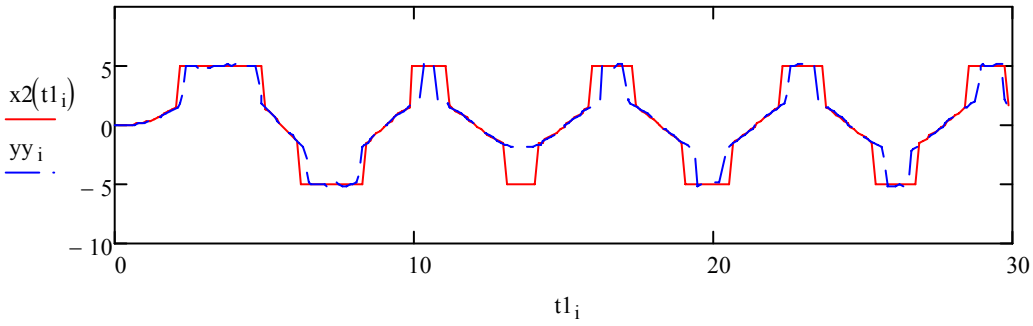


Рис. 4. Модель нелинейной системы $x2(t)$ с выходом yy_i, объемом выборки $s = 250$, шагом дискретизации $h = 0{,}12$, помехой 5 % и относительной средней ошибкой моделирования 5,8 %

Для построения модели выполним следующие действия:

1) проведем ряд статических экспериментов, т. е. последовательно подаем на вход системы некоторые константы, в результате чего можно сделать вывод о значениях параметров функции, описывающей нелинейную часть системы;

2) получаем оценку нелинейного элемента системы, параметры которого определяются согласно следующему алгоритму:

– проведем серию экспериментов, в ходе которых будем подавать на вход системы воздействия $u_{i,j} = C_j$, $C_j = \text{const}$, в результате получим выборку $\{u_{i,j}, x_{i,j}\}, i = \overline{1}, s, j = 1, \overline{m}$;

– находим расстояние между двумя соседними измерениями: $hh_j = \left| x_{i,j} - x_{i-1,j} \right| / h$;

– если $hh_j < \varepsilon, \varepsilon > 0$, $\hat{b} = x_{i,j}$;

– если $x_{i,j} = \hat{b}$, то $x_j = y_{i-1,j}$ $\hat{a} = M\{a_j\}$;

3) подаем на вход объекта ступенчатую функцию, амплитуда которой не превышает значения порога b, получаем переходную характеристику и строим модель линейной части объекта в виде интеграла Дюамеля;

4) строим модель объекта, выход которой вычисляется как значение функции, описывающей нелинейное звено с аргументом – выходом модели линейной части объекта.

Рассмотрим нелинейный динамический объект, линейная часть которого описывается дифференциальным соотношением

$$2{,}9 \cdot y''(t) + 1{,}27 \cdot y'(t) + 1 \cdot y(t) = u(t), \qquad (17)$$

а нелинейный элемент представляет собой звено насыщения с параметрами $b = 5$, $b_1 = 2$, $u(t) = 5\sin(t)$ (рис. 4).

Анализ работы модели нелинейного динамического объекта с видами нелинейности «звено насыщения» и «квадратор» позволяет сделать следующие выводы: полученная непараметрическая модель адекватно описывает систему при различных значениях параметров нелинейной части объекта, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и различных входных воздействиях.

Модель Гаммерштейна. Рассмотрим систему, поведение которой может быть описано с помощью модели Гаммерштейна (см. рис. 2). Выход нелинейного элемента $\omega(t)$ в данном случае измерению недоступен. Предполагается, что параметризованная структура ЛЭ не известна, а нелинейная характеристика НЭ известна с точностью до набора параметров.

В модели Гаммерштейна связь между входом $u(t)$ и выходом $x(t)$ объекта при нулевых начальных условиях может быть описана уравнениями вида [4]:

$$w(t) = f(u(t)), \; x(t) = \int_0^t h(t-\tau)\omega(\tau)d\tau, \qquad (18)$$

или, исключая переменную $\omega(t)$,

$$x(t) = \int_0^t h(t-\tau) f(\alpha, u(\tau)) d\tau, \qquad (19)$$

где $h(t)$ – весовая функция динамического элемента; $f(\alpha, u)$ – нелинейная функция, заданная с точностью до вектора неизвестных параметров $\bar{\alpha}$.

Пусть $x1(t)$ – реакция нелинейного объекта на входной сигнал в виде функции Хевисайда $u(t) = 1(t)$, $x(t)$ – реакция объекта на тестовый сигнал, форма которого отличается от ступенчатого. Измерения сигналов $x1(t)$ и $x(t)$ в дискретные моменты времени образуют выборки наблюдений $\{1, x1_i\}$ и $\{u_i, x_i\}_i, i = \overline{(1, s)}$, соответственно.

Ступенчатый сигнал $u(t) = 1$ после прохождения нелинейного элемента сохраняет ступенчатую форму, но меняет амплитуду, т. е. $\omega 1(t) = f(\alpha, 1(t)) = c1$, где $c1$ – константа. Тогда выход нелинейной системы $x1(t) = \int_0^t h1(t-\tau) 1(\tau) d\tau$ можно рассматривать как переходную функцию линейной системы с весовой функцией $h1(t)$. Оценка этой функции $\hat{h1}(t)$ может быть получена на основе выборки $(x1_i, t_i, i = \overline{1, s})$.

С учетом оценки $\hat{h1}(t)$ модель нелинейной системы (19) можно записать в виде

$$\hat{x}(t) = \int_0^t \hat{h1}(t-\tau) w(\tau) d\tau = \int_0^t \hat{h1}(t-\tau) f(u(\tau), \bar{\alpha}) d\tau. \qquad (20)$$

Оценки параметров $\bar{\alpha}$ находятся на основе выборки измерений $\{u_i, x_i\}, i = \overline{1, s}$, реакции объекта $x(t)$ на входной сигнал $u(t)$ произвольной формы как решения экстремальной задачи.

Таким образом, нами в общем виде получены алгоритмы, позволяющие строить непараметрические модели нелинейных динамических систем, представленных в виде последовательного соединения линейного и нелинейного звеньев. Эти алгоритмы не предусматривают наличия полной априорной информации о структуре объекта.

Определение типа нелинейности моделей Винера и Гаммерштейна. Пусть исследуемая система может быть описана в виде модели Винера, вид нелинейности которой неизвестен.

Если подать на вход системы единичное воздействие, то выход ее линейной части $w(t) = k(t)$ будет стремиться к неизвестной константе $C1$, а выход нелинейного объекта – к величине, равной $f(C1)$. При некотором произвольном постоянном входном воздействии $u(t) = C$ $w(t) = Ck(t)$, $q(t) = f(Ck(t))$. Проведя серию экспериментов над данной системой, в ходе которых будем подавать на ее вход различные константы, получим выборку

$$\{U, Q\} : U = \{u_1, u_2, ..., u_c\}, Q = \{q_1, q_2, ..., q_c\}, \qquad (21)$$

где q_i – установившееся значение выхода системы при входном воздействии u_i, причем значения q_i будут пропорциональны $f(u_i)$, т. е. $q_i = C2 f(u_i)$, $C2 = \text{const}$.

На основании полученной выборки можно построить непараметрическую оценку функции нелинейного звена объекта $q = \hat{f1}(u) = f(u)$:

$$\hat{f1}(u) = \sum_{i=1}^{s} q1_i H\left(\frac{u - u1_i}{C_s}\right) \Big/ \sum_{i=1}^{s} H\left(\frac{u - u1_i}{C_s}\right), \qquad (22)$$

где $q1_i$ – установившееся значение выхода системы при входном воздействии $u1_i$; $H(\cdot)$ – колоколообразная функция; C_s – параметр размытости.

Далее получим оценку функции $u = \hat{f2}(q) = f^{-1}(q)$:

$$\hat{f2}(u) = \sum_{i=1}^{s} u1_i H\left(\frac{q - q1_i}{C_s}\right) \Big/ \sum_{i=1}^{s} H\left(\frac{q - q1_i}{C_s}\right). \qquad (23)$$

При этом в общем случае восстанавливается лишь часть нелинейного звена $f(p)$ при $t > 0$, однако нам необходимо восстановить вид функции при любом аргументе. Для этого предположим, что функция нелинейного звена симметрична относительно оси ординат $f(-p) = f(p)$ или $f(-p) = -f(p)$.

Таким образом, будем считать, что вид нелинейности системы известен. При этом значения переходной функции линейного звена объекта $k(t)$ могут быть рассчитаны следующим образом:

$$k(t) = f^{-1}(q(t)) = \hat{f2}(q(t)).$$

При произвольном входном воздействии модель линейного элемента следующая:

$$w(t) = \frac{1}{sc_s} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta t} \hat{f2}(q1_i) \cdot H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j) \Delta\tau, \qquad (24)$$

а выход нелинейного объекта –

$$x(t) = \hat{f1}(w(t)).$$

Тогда непараметрическая модель примет вид

$$\hat{x}(t) = \hat{f1}\left[\frac{1}{sc_s} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta t} \hat{f2}(x_i) \cdot H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j) \Delta\tau\right]. \qquad (25)$$

где x_i – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие; u – тестовое входное воздействие.

Рассмотрим систему, в которой линейная часть объекта описывается дифференциальным соотношением

$$2 \cdot y''(t) + 0{,}3 \cdot y'(t) + y(t) = u(t),$$

а нелинейный элемент представляет собой звено насыщения с параметрами $b_1 = 2$, $v_0 = 0{,}4$ (рис. 5).

Полученная непараметрическая модель адекватно описывает данную систему при различных видах нелинейной части объекта, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и входных воздействиях.

Библиографические ссылки

1. Чайка С. Н. К идентификации динамических систем при частично параметризованной структуре модели // Динамика систем: Управление и оптимизация. Горький : Изд-во Горьк. гос. ун-та, 1989. С. 24–36.

2. Эйкофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975.

3. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1983.

4. Медведев А. В. Непараметрические алгоритмы идентификации нелинейных динамических систем // Стохастические системы управления. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1979. С. 15–22.

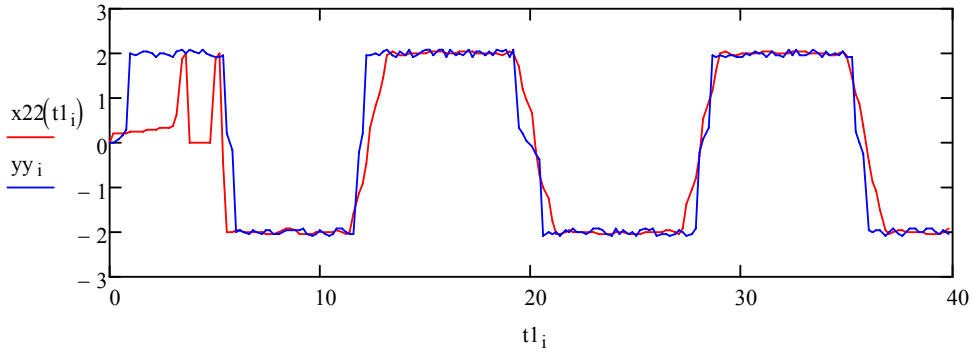


Рис. 5. Модель нелинейной системы $x2(t)$ с выходом yy_i, объемом выборки $s = 150$, шагом дискретизации $h = 0{,}2$, помехой 5 %, относительной средней ошибкой моделирования 6,4 % и тестовым входным воздействием $u(t) = 2\cos(0{,}4t)$

N. V. Koplyarova, N. A. Sergeeva

ABOUT NONPARAMETRIC ALGORITHMS OF NONLINEAR DYNAMICAL PROCESSES IDENTIFICATION

The authors consider a problem of nonlinear dynamical systems of Wiener-Hammerstein type identification, when linear dynamical part of the system is in conditions of nonparametric uncertainty. The type of nonlinearity is assumed to be unknown or known completing the parameters. The algorithm for creation of adequate, as root mean square criterion, for models of systems. The proposed method of dynamic objects modeling is on nonparametric estimation of linear and nonlinear sub-systems.

Keywords: nonlinearity, nonparametric Wiener and Hammerstein models.

© Коплярова Н. В., Сергеева Н. А., 2012

УДК 519.68

А. А. Корнеева, А. Н. Сергеев, Е. А. Чжан

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ТРУБЧАТОГО ТИПА

Рассматривается задача непараметрической идентификации многомерных систем со статистической зависимостью между компонентами вектора входной переменной. Последнее обстоятельство приводит к новому классу стохастических процессов, а именно процессов трубчатого характера. Сравниваются непараметрические и параметрические методы идентификации. Приведены результаты численного моделирования трубчатых процессов.

Ключевые слова: идентификация, непараметрическая статистика, трубчатые процессы, безынерционные системы.

При изучении таких объектов, как технические и производственные системы, процессы и явления, основной задачей является построение их моделей.

Рассмотрим общую схему исследуемого процесса (рис. 1), где введены следующие обозначения: $u(t) \in \Omega(u) \subset R^k$ – векторное управляющее воздейст-

вие на объект; $x(t) \in \Omega(x) \subset R$ – выходная переменная процесса; ξ – векторное случайное воздействие; u_t, x_t – измерения входных-выходных переменных $u(t)$, $x(t)$ в дискретное время; H^u, H^x – каналы связи, соответствующие различным переменным и включающие в себя средства контроля; $h^x(t)$ – случайные помехи измерений выходных переменных процесса с нулевыми математическими ожиданиями и ограниченной дисперсией; $h^u(t)$ – помехи при измерении входных переменных.

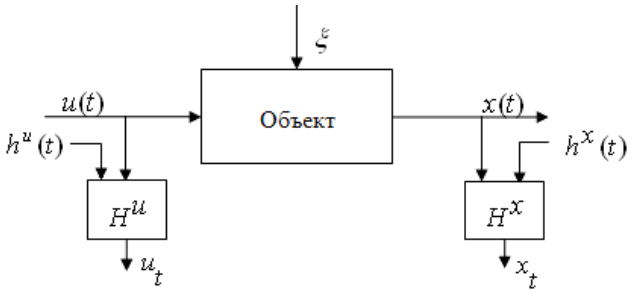


Рис. 1

Таким образом, исследуемый процесс может быть описан уравнением

$$x(t) = A(u(t-\tau), \xi), \qquad (1)$$

где A – оператор объекта; τ – запаздывание. Если запаздывание известно, то в дальнейшем его можно не учитывать, используя сдвиг в матрице наблюдений входных-выходных переменных. Контроль переменных (x,u) осуществляется через интервал времени Δt, т. е. $x_i, u_i = \overline{1,s}$ – выборка измерений переменных процесса, где s – объем выборки. Особенность задачи идентификации в этом случае состоит в том, что компоненты вектора входных переменных стохастически зависимы. Именно это обстоятельство делает структуру процессов, протекающих в пространстве входных-выходных переменных, трубчатой [1].

Идентификация стохастических объектов с зависимыми входными параметрами. Известно, что для всякого технологического процесса на производстве установлен технологический регламент, который определяет, в каком диапазоне значений должна находиться величина той или иной переменной (параметра) процесса. Если значения технологического параметра оказываются за пределами этого диапазона, то такое положение классифицируется как брак. Без нарушения общности будем считать, что на вход объекта поступают две входные переменные $u_1 \subset \Omega(u_1)$ и $u_2 \subset \Omega(u_2)$, а выходная переменная $x \subset \Omega(x)$. Без нарушения общности также примем, что все эти области представляют собой отрезки [0; 1], т. е. $\Omega(u_1) = [0;1]$, $\Omega(u_2) = [0;1]$, $\Omega(x) = [0;1]$.

Рассмотрим частный случай, представленный на рис. 2, где заштрихованная поверхность P представляет собой модель объекта, единичный куб $\Omega(u,x)$ – область допустимых значений u и x, удовлетворяющих технологическому регламенту, который и определяется областью $\Omega(u,x)$. Если мы зададим любое значение вектора $u \in \Omega(u)$, то обязательно получим $x \in \Omega(x)$. Таким образом, выход x за пределы $\Omega(x)$ при условии, что $u \in \Omega(u)$, невозможен.

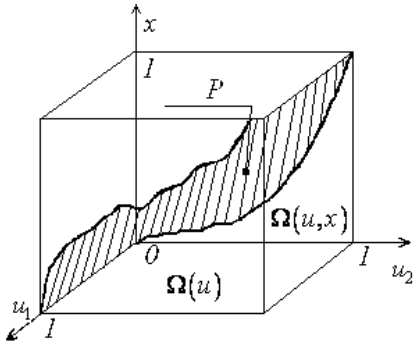


Рис. 2

А теперь возьмем другой случай (рис. 3). Пусть области значения переменных u и x, а следовательно, и технологический регламент, те же, что и в предыдущем случае, а модель представляет собой линию Y в пространстве $\Omega(u,x)$, которая начинается в точке $(0,0,0)$ и завершается в точке $(1,1,1)$. С одной стороны, справедливо считать, что область возможных значений $\Omega(u,x)$ определяется единичным кубом, но, с другой стороны, u и x принимают не все возможные значения из $\Omega(u,x)$, а лишь те из них, которые принадлежат линии Y.

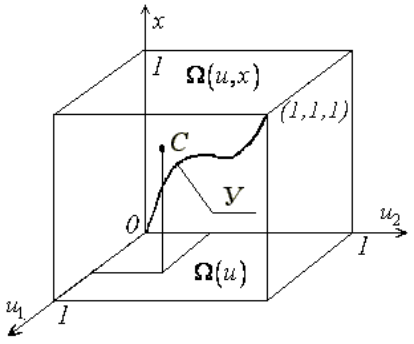


Рис. 3

Приведенные примеры моделей охватывают два крайних случая: первый случай – модели со значениями в любой точке $\Omega(u,x)$, второй случай – модели, в которых u и x принадлежат линии Y, все точки которой содержатся в $\Omega(u,x)$, но бесконечное число точек (типа точки C) не принадлежат Y и, следовательно, не имеют никакого отношения к наблюдаемому процессу.

Теперь представим типичный случай, иллюстрирующий содержание задачи идентификации и, как представляется, адекватный многочисленным практическим ситуациям. Рассмотрим при тех же условиях задачу построения процесса, который показан на рис. 4.

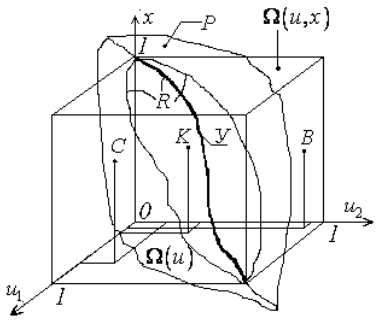


Рис. 4

В этом случае поверхность *P* представляет собой модель в евклидовом пространстве *E*, $\Omega(u,x) \subset E$. Часть поверхности *P*, которую мы обозначим *R*, содержится в $\Omega(u,x)$, т. е. удовлетворяет технологическому регламенту. В то же время точка *K* не принадлежит *Y* (и поэтому она не может быть наблюдаемой точкой процесса), но принадлежит поверхности *R* и, следовательно, $\Omega(u,x)$, а значит и технологическому регламенту. Точки же *C* и *B* таковы, что хотя и $u \in \Omega(u)$, но при подстановке в модель *R* оно дает оценку $x \notin \Omega(x)$, т. е. точки *C* и *B* не принадлежит технологическому регламенту и, следовательно, *x* может принять значение физически не реализуемое. Таким образом, не только точки *C* и *B*, но и точка *K* являются следствием ошибки той или иной природы, т. е. таких точек быть не должно.

Более интересным случаем по сравнению со случаями, которые изображены на рис. 2 и 3, является тот, которому соответствует процесс, представляющий собой некоторую объемную полоску (рис. 5).

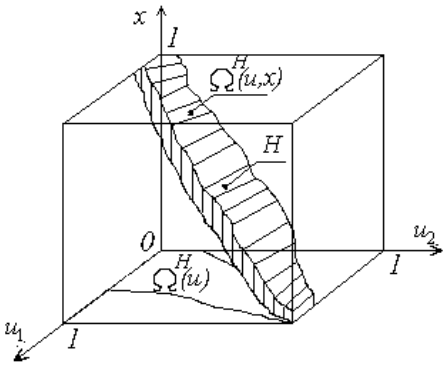


Рис. 5

Такие процессы назовем *H*-процессами, а модели этих процессов – *H*-моделями. Значения *H*-процесса принадлежат области $\Omega^H(u,x)$, причем $\Omega^H(u,x) \subset \Omega(u,x)$, т. е. технологическому регламенту.

Строго говоря, технологический регламент должен определяться не областью $\Omega(u,x)$, как это сегодня принято в промышленности, а областью $\Omega^H(u,x)$. Отыскание этой области представляет собой одну из новых задач идентификации. Другой новой задачей является построение *H*-моделей, а не моделей типа *R*, которые обычно рассматриваются при моделировании разнообразных процессов в задачах параметрической идентификации. Тривиальный путь построения *H*-моделей может состоять в том, что в качестве таких моделей принимается линия (или область ее содержащая), полученная в результате пересечения двух моделей типа *R*, однако такой путь представляется малоэффективным.

Проанализируем два важных обстоятельства, возникающих при моделировании реальных процессов. Первое из них состоит в том, что объем выборки *s*, $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$, катастрофически мал по отношению к размерности вектора $u = (u_1, ..., u_k) \in \Omega(u)$. Например, в практических задачах часто возникает ситуация, когда $k = 20...30$, а $s = 900...1\,000$, и в этой ситуации нельзя получить удовлетворительного решения задачи идентификации. Второе обстоятельство заключается в том, что если параметрическая модель построена по имеющимся данным, то при $u \in \Omega(u) \subset R^k$ мы можем получить оценку $x_s \notin \Omega(x)$, согласно которой значения *x*(*u*) находятся вне технологического регламента или даже физически не реализуются. Оба эти обстоятельства могут быть объяснены тем, что мы имеем дело с трубчатыми объектами.

Таким образом, на практике мы часто встречаемся с *H*-процессами и, соответственно, с необходимостью построения *H*-моделей, связанного с решением задачи аппроксимации функций по наблюдениям [2].

Важно заметить, что априори не известно, имеет ли исследуемый процесс трубчатую структуру или нет.

Если процесс обладает трубчатой структурой, то модель примет вид

$$x_s(u) = f(u, \alpha_s) I_s(u), \tag{2}$$

либо

$$x_s(u) = I_s(u) \sum_{j=1}^{s} \alpha_s \varphi_j, \tag{3}$$

где $I(u)$ – индикатор:

$$I(u) = \begin{cases} 1, & \text{если } u \in \Omega^H(u), \\ 0, & \text{если } u \overline{\in} \Omega^H(u). \end{cases} \tag{4}$$

Заметим, что, вообще говоря, область $\Omega^H(u)$ нам не известна, а известна лишь выборка $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$. Если индикатор равен нулю, то оценка $x_s(u)$ не мо-

жет быть вычислена, т. е. при таких значениях компонент вектора $u \in \Omega(u)$ процесс протекать не может.

В качестве оценки индикатора $I(u)$ можно принять следующее приближение:

$$I_s(u) = \operatorname{sgn}(sc_s)^{-1} \sum_{i=1}^{s} \Phi(c_s^{-1}(x_s(u) - x_i)) \times \times \prod_{j=1}^{k} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)), \quad (5)$$

где

$$x_s(u) = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_i \prod_{j=1}^{k} \Phi(c_s^{-1}(u_j - u_i^j))}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} c_s^{-1}(u_j - u_i^j)}, \quad (6)$$

здесь c_s – параметр размытости; $\Phi(z)$ – колоколообразная функция.

Таким образом, при известном значении $u = ku' \in \Omega(u)$ по формуле (6) строится оценка $x_s(u = u')$, а затем вычисляется индикатор $I_s(u)$. Если индикатор оказался равен единице, то на следующем этапе используются модели (2) или (3). Если же индикатор оказался равным нулю, то это означает, что хотя и $u \in \Omega(u)$, но $u \overline{\in} \Omega^H(u)$, т. е. компоненты вектора $u = u' = (u_1', ..., u_k')$ определены неверно. Иными словами, реально протекающий трубчатый процесс не соответствует совокупности заданных значений компонент вектора $u = u'$. Причины этого могут быть связаны с тем, что компоненты вектора $u = u' = (u_1', ..., u_k')$ либо выбраны неверно, либо измерены со значительной погрешностью типа «выброс». Конечно же, это справедливо только при условии, что мы располагаем представительной выборкой $\left\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\right\}$. Поэтому следует заметить, что использование традиционных параметрических моделей без учета индикатора $I_s(u)$ может привести к получению оценки $x_s(u = u')$, которая будет далека от реальной.

Численное моделирование трубчатых процессов. При имитационном моделировании помеха на выход объекта накладывается случайным образом. Для генерации выборки случайной величины используется П-генератор случайных чисел по нормальному закону с заданными параметрами [3].

При генерации чисел по случайному закону $f(\xi, m_\xi, \sigma_\xi ...)$ задаются параметры этого закона, а затем определяются границы генерирования значений случайной величины через порядок малости, величина которого задается исследователем. Выборка генерируемых точек должна наиболее полно охватывать всю область возможных значений, но следует отрезать «хвосты» распределения, где вероятность выпадения значений ξ становится малой. Далее интервал делится на l равных подынтервалов, для каждого из которых значение вероятности p_j попадания случайной величины находится исходя из закона больших чисел. Количество точек, которые попадут в j-й подынтервал, будет $n_j = [p_j, s]$, где s – общий объем выборки. Совокупность полученных точек образует выборку случайной величины ξ, распределенной по заданному закону, и обладает всеми требуемыми значениями параметров.

В качестве примера рассмотрим объект с десятью входами, из которых два входа независимы, и одним выходом. В классификации трубчатых процессов данный объект представляет собой поверхность в пространстве переменных. Выход этого объекта имеет вид

$$x(u) = 2\sin u_1 + 0,3u_2^3 + u_3 - 0,6u_4 + 0,3u_5 + u_6^2 + + 0,5u_7^2 + 0,2u_8 + 0,3\sin u_9 - 0,04\cos u_{10}. \quad (7)$$

В качестве модели примем непараметрическую оценку регрессии [4]:

$$x_s(u) = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_i \prod_{j=1}^{k} \Phi(c_s^{-1}(u_j - u_i^j))}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} c_s^{-1}(u_j - u_i^j)}. \quad (8)$$

Для оценивания полученной модели будем применять относительную ошибку аппроксимации, которая находится по формуле

$$I / \sigma^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{s} (x_i - x_s^i)^2}{\sum_{i=1}^{s} (x_i - m_x)^2}}. \quad (9)$$

При двух независимых входных воздействиях трубка имеет вид плоскости. Относительная ошибка в данном случае равна 0,08.

Результаты численных экспериментов при моделировании объекта (7) представлены на рис. 6 и в таблице.

Полученные значения модели $x_s(u)$, объекта $x(u)$ и объекта с аддитивной помехой $x_\xi(u)$ в каждой точке выборки (i – порядковый номер точки) позволяют сделать вывод о том, что модель незначительно отличается от объекта (см. рис. 6).

Анализ данных таблицы показывает, что относительная ошибка (9) уменьшается с ростом выборки, т. е. оценка модели тем лучше, чем меньше ошибка и больше выборка:

s	Помеха, %	Ошибка
100	5	0,090 513
250	5	0,053 977
500	5	0,047 723
100	2	0,045 374
250	2	0,035 055
500	2	0,030 32

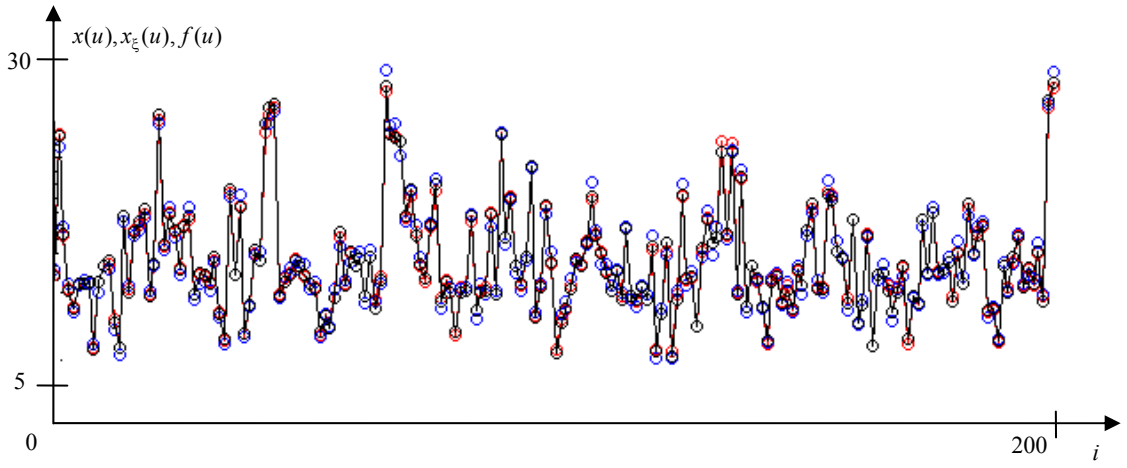


Рис. 6

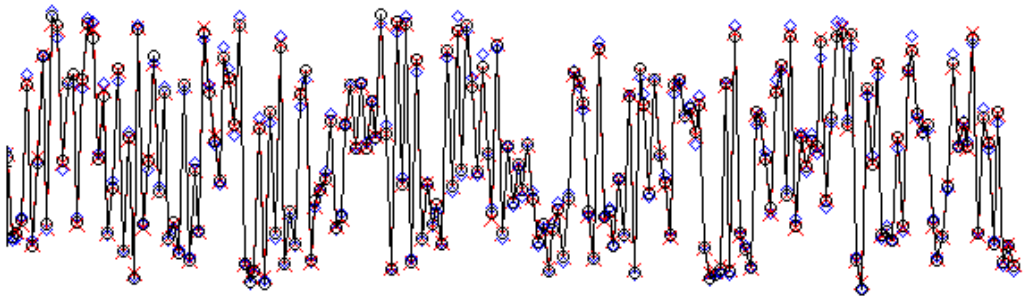


Рис. 7

Рассмотрим объект, входные воздействия которого имеют линейную структуру, как и выход объекта:

$$x(u) = u_1 + 1,2u_3 - 0,8(u_4 + u_7) + \\ + 3(u_2 + u_5) + 0,7u_7 - u_9 + 2u_{10}. \qquad (10)$$

В качестве модели также будем использовать оценку регрессии. В этом случае оценка улучшается: при выборке $s = 200$ она равна 0,009 784 при уровне помех 5 % (рис. 7, где окружностями обозначен объект, а крестиками – модель). В этом случае модель совпадает с объектом.

Теперь сделаем переменную u_2 независимой. В этом случае оценка по сравнению с предыдущим вариантом моделирования ухудшится незначительно – до 0,039 154 при уровне помехи 5 %.

Библиографические ссылки

1. Медведев А. В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютерный анализ данных моделирования. В 2 т. Т. 2. Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1995. С. 201–206.

2. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Процессы // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 3 (29). С. 4–9.

3. Сергеева Н. А., Цепкова М. В., Чжан Е. А. П-генератор случайных чисел по закону Лапласа // Решетневские чтения : материалы XV Междунар. науч. конф. В 2 ч. Ч. 2. Красноярск, 2011. С. 78–79.

4. Надарая Э. А. Непараметрическое оценивание плотности вероятности и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбил. ун-та, 1983.

A. A. Korneeva, A. N. Sergeev, E. A. Chzhan

INVESTIGATIONS OF NONPARAMETRIC MODELS OF TUBULAR TYPE PROCESSES

The article considers a problem of identification of multivariate systems with static connection of sub-vectors of input variable. The last circumstance leads to the new class of stochastic processes, namely, «tubular» processes. Nonparametric and parametric methods of identification are compared. The results of computer simulation are presented.

Keywords: identification, nonparametric statistics, «tubular» processes, non-inertial systems.

© Корнеева А. А, Сергеев А. Н., Чжан Е. А., 2012

УДК 519.68

А. А. Корнеева, Н. А. Сергеева

ОБ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исследована проблема идентификации многомерной безынерционной системы с запаздыванием в условиях непараметрической неопределенности. Рассмотрена задача заполнения матрицы наблюдений в случае, когда дискретности контроля входных-выходных переменных существенно отличаются. Предложена методика заполнения матрицы наблюдения. Приведены результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующие эффективность данной методики при решении задачи идентификации.

Ключевые слова: безынерционный объект, непараметрические модели, непараметрические оценки, стохастическая система, матрица наблюдений.

Одним из основных направлений кибернетики является моделирование и идентификация стохастических процессов. Особую роль при формулировке задач идентификации и управления играет уровень априорной информации, который во многом зависит от средств контроля входных-выходных переменных исследуемого процесса. Во многих практических задачах приходится сталкиваться с ситуацией, когда дискретности контроля входных-выходных переменных существенно отличаются. Это обусловлено тем, что измерения одних переменных осуществляются электрическим способом, а других – путем лабораторных анализов, физико-механических испытаний и др.

Дискретность измерения этих переменных будет значительно отличаться, что приведет к пропускам входных-выходных переменных матрицы наблюдений процесса.

Приведем достаточно общую схему исследуемого процесса (рис. 1).

Особенность рассматриваемых нами процессов состоит в том, что контроль входных переменных $u(t)$ и $\mu(t)$ осуществляется через интервал времени Δt, контроль выходной переменной $x(t)$ – через интервал ΔT, а контроль выходной переменной $z(t)$ – через интервал T, причем выполняется соотношение $\Delta t \le \Delta T \le T$. Отличие в дискретности измерения переменных, характеризующих состояние исследуемого процесса, обусловлено имеющимися средствами контроля. В частности, измерение переменной $x(t)$ может выполняться электрическими средствами и осуществляться достаточно быстро, а для измерения переменной $z(t)$ необходим, к примеру, химический анализ, который требует значительно большего времени. Отметим, однако, что чаще всего именно переменная $z(t)$ является самой важной для процесса, так как она характеризует качество готовой продукции.

Выходные переменные процесса зависят от всех входных переменных:

$$x(t) = A(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \xi(t), t), \qquad (1)$$

где τ – запаздывание по различным каналам процесса, которое не следует путать с задержкой при измерении тех или иных переменных процесса.

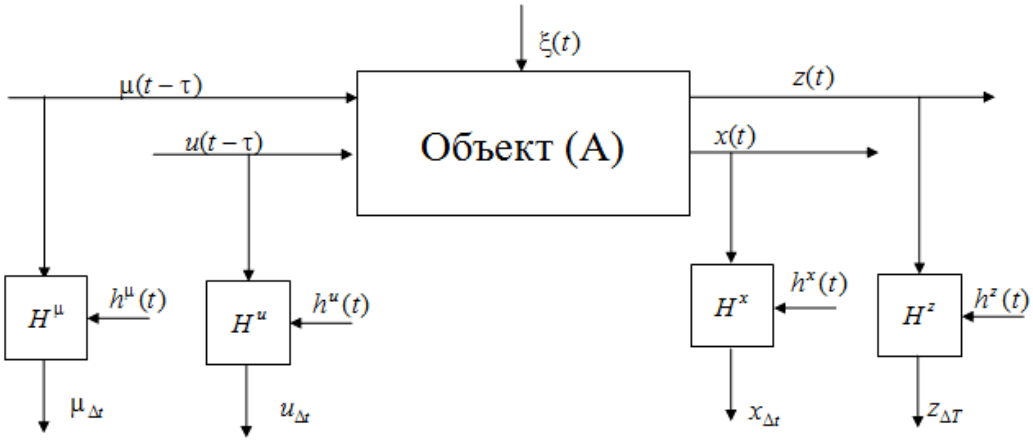


Рис. 1. Схема стохастического процесса и контроля переменных:

A – неизвестный оператор объекта; $x(t) \in \Omega(x) \subset R^1$, $z(t) \in \Omega(z) \in R^1$ – выходные переменные процесса;

$u(t) = (u_1(t), u_2(t), ..., u_m(t)) \in \Omega(u) \subset R^m$ – управляющее воздействие; $\mu(t) = (\mu_1(t), \mu_2(t), ..., \mu_n(t)) \in \Omega(\mu) \subset R^n$ – векторная входная переменная процесса; $\xi(t)$ – векторное случайное воздействие; (t) – непрерывное время; H^{μ}, H^{u}, H^{x}, H^{z} – каналы связи, соответствующие различным переменным и включающие в себя средства контроля; $h^{\mu}(t)$, $h^{u}(t)$, $h^{x}(t)$, $h^{z}(t)$ – случайные помехи измерений соответствующих переменных процесса с нулевым математическим ожиданием и ограниченной дисперсией

Таблица 1

u				μ				x	z
u_1	u_2	...	u_m	μ_1	μ_2	...	μ_n		
u_{11}	u_{21}	...	u_{m1}	μ_{11}	μ_{21}	...	μ_{n1}	x_1	z_1
u_{12}	u_{22}	...	u_{m2}	μ_{12}	μ_{22}	...	μ_{n2}	–	–
u_{13}	u_{23}	...	u_{m3}	μ_{13}	μ_{23}	...	μ_{n3}	–	–
u_{14}	u_{24}	...	u_{m4}	μ_{14}	μ_{24}	...	μ_{n4}	x_4	–
u_{15}	u_{25}	...	u_{m5}	μ_{15}	μ_{25}	...	μ_{n5}	–	–
u_{16}	u_{26}	...	u_{m6}	μ_{16}	μ_{26}	...	μ_{n6}	–	–
u_{17}	u_{27}	...	u_{m7}	μ_{17}	μ_{27}	...	μ_{n7}	x_7	z_7
...	...	...	...	…	…	...	...	...	...
u_{1s}	u_{2s}	...	u_{ms}	μ_{1s}	μ_{2s}	...	μ_{ns}	x_s	z_s

При моделировании подобных процессов, с учетом различного времени, затрачиваемого на контроль переменных $x(t)$ и $z(t)$, при прогнозировании $z(t)$ как переменной с большей дискретностью измерения целесообразно использовать весь набор переменных, влияющих на прогноз $z(t)$. В этом случае модель будет следующей:

$$z(t) = A(u(t-\tau), \mu(t-\tau), x(t), \xi(t), t). \qquad (2)$$

Матрица наблюдений входных-выходных переменных описанного процесса может быть представлена, например, в виде табл. 1.

В этой таблице принято, что дискретность измерения выходной переменной $x(t)$ в три раза больше дискретности измерения входных переменных $u(t)$ и $\mu(t)$, т. е. $\Delta T = 3\Delta t$, выходная переменная $z(t)$ измеряется с дискретностью $T = 2\Delta T = 6\Delta t$, s – объем исходной выборки.

Интерес представляет задача заполнения пропусков входных-выходных переменных процесса с целью повышения качества модели. Конечно, при решении задачи идентификации можно использовать только полностью заполненные строки матрицы наблюдений, не учитывая строки с пропусками. Однако при этом происходит потеря информации, что является неприемлемым с практической точки зрения. Кроме того, для решения задачи идентификации предпочтительно иметь выборки большего объема. Из сказанного следует, что поиск новых методов заполнения пропусков входных-выходных переменных матриц наблюдений становится актуальной задачей, для решения которой можно воспользоваться методами параметрической и непараметрической идентификации.

Идентификация в узком и широком смыслах. При моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в узком смысле [1; 2]. Ее содержание состоит в том, что на первом этапе на основании имеющейся априорной информации определяется параметрический класс операторов A^{α}, например:

$$\tilde{x}_{\alpha}(t) = A^{\alpha}(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \alpha), \qquad (3)$$

где A^{α} – параметрическая структура модели; α – вектор параметров. На втором этапе осуществляется оценка параметров α на основе имеющейся выборки $\{x_i, u_i, \mu_i, i = \overline{1,s}\}$, где s – объем выборки. Оценка параметров может выполняться с помощью многочисленных рекуррентных процедур, в частности методом стохастических аппроксимаций либо методом наименьших квадратов [1; 2]. Успех решения задачи идентификации в этом случае существенно зависит от того, насколько удачно определен оператор (3).

Идентификация в широком смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора, поскольку часто оказывается значительно проще определить класс оператора на основе сведений качественного характера, например о линейности процесса или типе нелинейности, однозначности или неоднозначности и др. В данном случае задача идентификации состоит в оценивании этого оператора на основе выборки $\{x_i, u_i, \mu_i, i = \overline{1,s}\}$ в форме

$$\tilde{x}_s(t) = A_s(u(t-\tau), \mu(t-\tau), \vec{x}_s, \vec{u}_s, \vec{\mu}_s), \qquad (4)$$

где $\vec{x}_s = (x_1, x_2, ..., x_s), \vec{u}_s = (u_1, u_2, ..., u_s)$, $\vec{\mu}_s = (\mu_1, \mu_2, ..., \mu_s)$ – временные векторы.

Оценка оператора A_s может быть осуществлена средствами непараметрической статистики [3]. Примечательным здесь является то, что при этом исключается этап выбора параметрической структуры, и, следовательно, можно утверждать, что идентификация в этом случае как вариант идентификации в широком смысле является более адекватной многим реальным задачам.

Методика заполнения матрицы наблюдений. Как было замечено ранее, на практике часто возникают случаи, когда дискретности измерения входных-выходных переменных исследуемого процесса могут не совпадать. В результате матрица наблюдений будет состоять из не полностью заполненных строк (см. табл. 1).

В данной статье предлагается давать оценки x_s и z_s выходных переменных $x(t)$ и $z(t)$ в незаполненных строках матрицы наблюдений при известных значениях входных переменных $u(t)$, благодаря чему используется выборка, состоящая из результатов заполненных строк матрицы наблюдений (см. табл. 1).

Таблица 2

u				μ				x	z
u_1	u_2	...	u_m	μ_1	μ_2	...	μ_n		
u_{11}	u_{21}	...	u_{m1}	μ_{11}	μ_{21}	...	μ_{n1}	x_1	z_1
u_{12}	u_{22}	...	u_{m2}	μ_{12}	μ_{22}	...	μ_{n2}	x_{2s}	z_{2s}
u_{13}	u_{23}	...	u_{m3}	μ_{13}	μ_{23}	...	μ_{n3}	x_{3s}	z_{3s}
u_{14}	u_{24}	...	u_{m4}	μ_{14}	μ_{24}	...	μ_{n4}	x_4	z_{4s}
u_{15}	u_{25}	...	u_{m5}	μ_{15}	μ_{25}	...	μ_{n5}	x_{5s}	z_{5s}
u_{16}	u_{26}	...	u_{m6}	μ_{16}	μ_{26}	...	μ_{n6}	x_{6s}	z_{6s}
u_{17}	u_{27}	...	u_{m7}	μ_{17}	μ_{27}	...	μ_{n7}	x_7	z_7
...	...	...	...	…	…	...	...	...	...
u_{1s}	u_{2s}	...	u_{ms}	μ_{1s}	μ_{2s}	...	μ_{ns}	x_s	z_s

В итоге мы получим заполненную матрицу, представленную в табл. 2, и оценки $x(u, \mu)$, $z(u, \mu)$, $z(u, \mu, x_s)$ класса (3) или (4) будем осуществлять уже на основании этой матрицы наблюдений.

В качестве оценок $x(u, \mu) = M\{x \mid u, \mu\}$, $z(u, \mu) = M\{z \mid u, \mu\}$, $z(u, \mu, x_s) = M\{x \mid u, \mu, x_s\}$ можно использовать как параметрические [1; 2], так и непараметрические оценки функции регрессии [3; 4]. Предложенный прием оказывается вполне оправданным, так как задача идентификации в последнем случае (см. табл. 2) решается более точно, чем в случае, когда строки с пропусками исключаются из матрицы наблюдений (см. табл. 1).

Непараметрические оценки функции регрессии по наблюдениям. Пусть даны наблюдения $\left\{u_i, \mu_i, x_i, z_i, i = \overline{1,s}\right\}$ случайных величин $u(t)$, $\mu(t)$, $x(t)$, $z(t)$, распределенных с неизвестными плотностями вероятности $p(x, u)$, причем $p(u) > 0 \; \forall u \in \Omega(u)$. Для восстановления оценки $x(u, \mu) = M\{x \mid u, \mu\}$ используются непараметрические оценки [4]:

$$x_s(u,\mu) = \frac{\sum\limits_{i=1}^{s} x_i \prod\limits_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{c_s}\right) \prod\limits_{k=1}^{n} \Phi\left(\frac{\mu_k - \mu_{ki}}{c_s}\right)}{\sum\limits_{i=1}^{s} \prod\limits_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ji}}{c_s}\right) \prod\limits_{k=1}^{n} \Phi\left(\frac{\mu_k - \mu_{ki}}{c_s}\right)}, \qquad (5)$$

где ядерная функция $\Phi(\cdot)$ и коэффициент размытости ядра c_s обладают некоторыми свойствами сходимости:

$$\Phi(z) \ge 0, \quad \int\limits_{\Omega(z)} \Phi(z)dz < \infty, \quad \lim_{s\to\infty} c_s^{-1}\Phi(z) = \delta(z), \qquad (6)$$

$$c_s > 0, \quad \lim_{s\to\infty} c_s = 0, \quad \lim_{s\to\infty} s c_s^m = \infty,$$

и выполняется свойство дельтообразности: $\lim\limits_{s\to\infty} c_s^{-1}\Phi\left((x - x_i)/c_s\right) = \delta(x - x_i)$.

Ядерная функция имеет треугольный вид и описывается следующей системой уравнений:

$$\Phi = \begin{cases} 1 - \left|\frac{u - u_i}{c_s}\right|, \text{ если } \left|\frac{u - u_i}{c_s}\right| \le 1, \\ 0, \text{ если } \left|\frac{u - u_i}{c_s}\right| > 1. \end{cases} \qquad (7)$$

Параметр размытости c_s определяется путем решения задачи минимизации квадратичного показателя соответствия выхода объекта и выхода модели, основанного на методе скользящего экзамена, когда при построении модели не учитывается i-я пара измерений:

$$I = \frac{1}{s} \sum_{j\ne i, j=1}^{s} \left(x_j - x_s\left(u_j, \mu_j, c_s\right)\right)^2 = \min_{c_s}. \qquad (8)$$

В случае если каждой компоненте вектора $u(t)$ соответствует компонента вектора c_s, то во многих практических задачах c_s можно принять скалярной величиной. Для этого необходимо предварительно привести компоненты вектора $u(t)$ по выборке наблюдений к одному и тому же интервалу, использовав, например, операции центрирования и нормирования.

Для восстановления зависимости $z(u, \mu) = M\{z \mid u, \mu\}$ применяются непараметрические оценки вида

$$z_s(u,\mu) = \frac{\sum\limits_{i=1}^{s} z_i \prod\limits_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ij}}{c_s}\right) \prod\limits_{k=1}^{n} \Phi\left(\frac{\mu_k - \mu_{ki}}{c_s}\right)}{\sum\limits_{i=1}^{s} \prod\limits_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ij}}{c_s}\right) \prod\limits_{k=1}^{n} \Phi\left(\frac{\mu_k - \mu_{ki}}{c_s}\right)}. \qquad (9)$$

Как было отмечено ранее, для восстановления выходной переменной $z(t)$ можно использовать полученные оценки выходной переменной $x(t)$. В этом случае для восстановления $z(u, \mu, x_s) = M\{x \mid u, \mu, x_s\}$ применяются следующие непараметрические оценки:

$$z_s(u,\mu,x_s) = \frac{\sum\limits_{i=1}^{s} z_i \Phi\left(\frac{x_s - x_{si}}{c_s}\right) \prod\limits_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ij}}{c_s}\right) \prod\limits_{k=1}^{n} \Phi\left(\frac{\mu_k - \mu_{ki}}{c_s}\right)}{\sum\limits_{i=1}^{s} \Phi\left(\frac{x_s - x_{si}}{c_s}\right) \prod\limits_{j=1}^{m} \Phi\left(\frac{u_j - u_{ij}}{c_s}\right) \prod\limits_{k=1}^{n} \Phi\left(\frac{\mu_k - \mu_{ki}}{c_s}\right)}. \qquad (10)$$

Далее будет показано, что использование оценки (10) дает лучший результат по сравнению с оценкой (9).

Этапы восстановления пропусков матрицы наблюдений. Этапы восстановления пропусков матрицы наблюдений рассмотрим на примере восстановления выходной переменной $x(t)$ [5].

На первом этапе восстанавливается функция регрессии x_s (5) по наблюдениям $u(t)$, полностью

представленным в исходной матрице измерений, т. е. по полностью заполненным в результате эксперимента строкам (в табл. 1 это первая, четвертая, седьмая строки и т. д.). Строки с пропусками значений выхода $x(t)$ на данном этапе не учитываются, за счет чего объем выборки сокращается. Оптимальное значение коэффициента размытости c_s определяется в соответствии с (8).

На втором этапе происходит заполнение пропусков в матрице наблюдений с использованием оценки x_s, полученной на предыдущем этапе. Там, где наблюдения $x(t)$ пропущены, в оценку $x_s(u_1, u_2, \ldots, u_m)$ подставляются измеренные значения $u = (u_1, u_2, \ldots, u_m)$ и вычисляется соответствующая оценка x_s, которая восполняет недостающее наблюдение $x(t)$ (например, недостающая оценка x_2 в матрице наблюдений, представленной в табл. 2, заполняется значением x_{s2}).

На заключительном этапе осуществляется построение непараметрической оценки $x_s(u_1, u_2, \ldots, u_m)$ по всей имеющейся (заполненной) матрице наблюдений.

Аналогично заполняются пропуски матрицы наблюдений для выходной переменной $z(t)$.

В итоге по элементам восстановленной матрицы выстраиваются непараметрические оценки $z(u, \mu) = M\{z \mid u, \mu\}$ (9) и $z(u, \mu, x_s) = M\{x \mid u, \mu, x_s\}$ (10).

Вычислительный эксперимент. Для исследования был выбран объект, представленный на рис. 1, для которого векторное управляющее воздействие $u = (u_1, u_2, \ldots, u_m) \in [0; 3]$, а воздействие $\mu(t)$ отсутствует. Дискретность измерения ΔT выходной переменной $x(t)$ в три раза больше дискретности измерения Δt входной переменной $u(t)$, т. е. $\Delta T = 3\Delta t$. Выходная переменная $z(t)$ измеряется с еще большей дискретностью $T = 2\Delta T = 6\Delta t$.

Выходные переменные процесса описываются следующими зависимостями:

$$x = 0,5u_1^2 + \sin u_2 + 2\sqrt{u_3}, \qquad (11)$$

$$z = u_1 + \sin u_2 + u_3 + 0,5x, \qquad (12)$$

которые необходимы для получения в компьютерном эксперименте соответствующих исходных выборок $\left\{u_i, x_i, z_i, i = \overline{1,s}\right\}$. В дальнейшем характер зависимостей $x(u)$ и $z(u, x)$ предполагается неизвестным.

Для построения модели исследуемого процесса $x(u)$ используется классическая непараметрическая оценка регрессии (5). На первом этапе оценка (5) строится по исходной матрице наблюдений с пропусками выходной переменной $x(u)$ (см. табл. 1), на втором этапе – по матрице, заполненной с помощью предложенной выше методики (см. табл. 2). Оценка качества моделей проводится в соответствии со следующей формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}(x_i - x_s(u_i))^2}{\frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s}(m - x_i)^2}}, \qquad (13)$$

где σ – относительная ошибка моделирования; m – оценка математического ожидания выхода объекта: $m = \frac{1}{s}\sum_{i=1}^{s} x_i$.

По результатам эксперимента были получены графики зависимости относительной ошибки моделирования σ от объема исходной выборки s при помехе на выходе объекта 5 % (рис. 2). А поскольку рассматриваемый процесс является стохастическим, то проводилось усреднение по результатам десяти экспериментов.

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что применение предложенной методики приводит к повышению точности моделирования на 5…10 %, а на малых объемах выборок ($s = 100...300$) точность увеличивается на 15…20 %.

Для оценивания выходной переменной $z(t)$ использовались непараметрические оценки вида $z(u) = M\{z \mid u\}$ (9) и $z(u, x_s) = M\{z \mid u, x_s\}$ (10) (рис. 3 и 4).

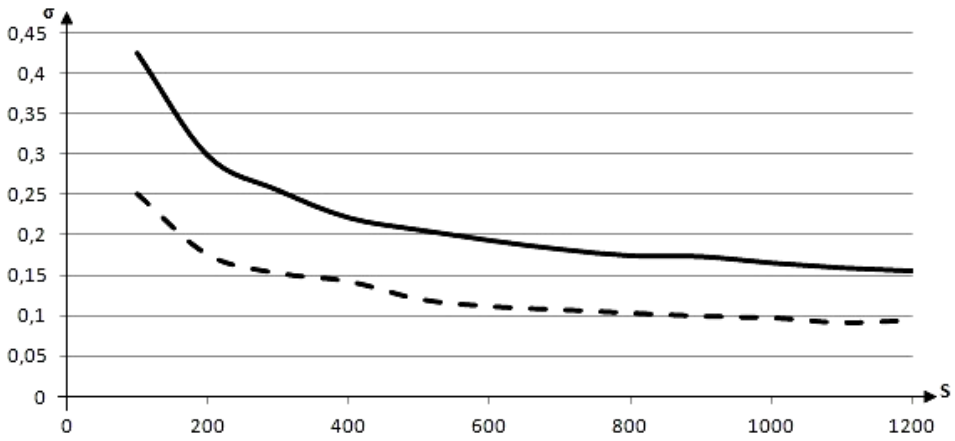


Рис. 2. Результаты оценки выхода $x(t)$:
сплошная линия – оценивание по исходной матрице наблюдений с пропусками выхода $x(t)$ (см. табл. 1);
пунктирная линия – оценивание по восстановленной матрице (см. табл. 2)

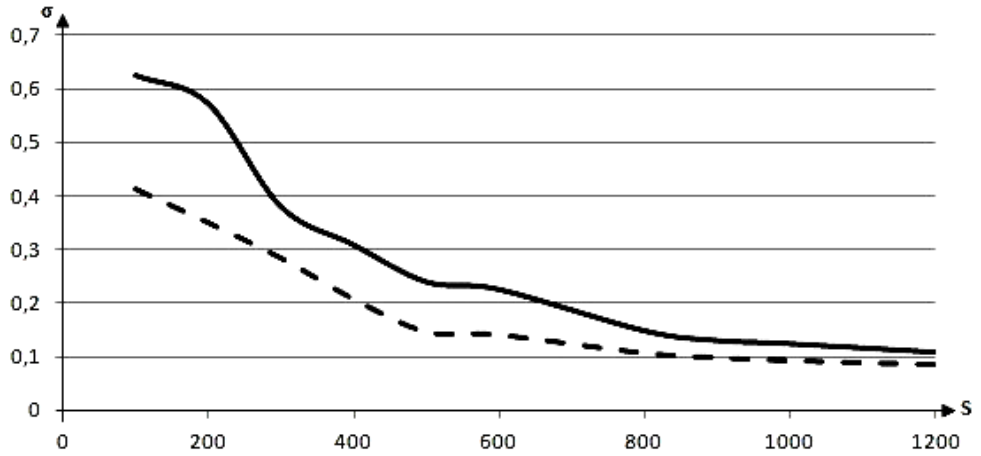


Рис. 3. Результаты оценки выхода $z(t)$:
сплошная линия – оценивание по матрице с пропусками выходной переменной $z(t)$;
пунктирная линия – оценивание по восстановленной матрице наблюдений;
σ – относительная ошибка моделирования; s – объем исходной выборки; помеха на выходе объекта 5 %

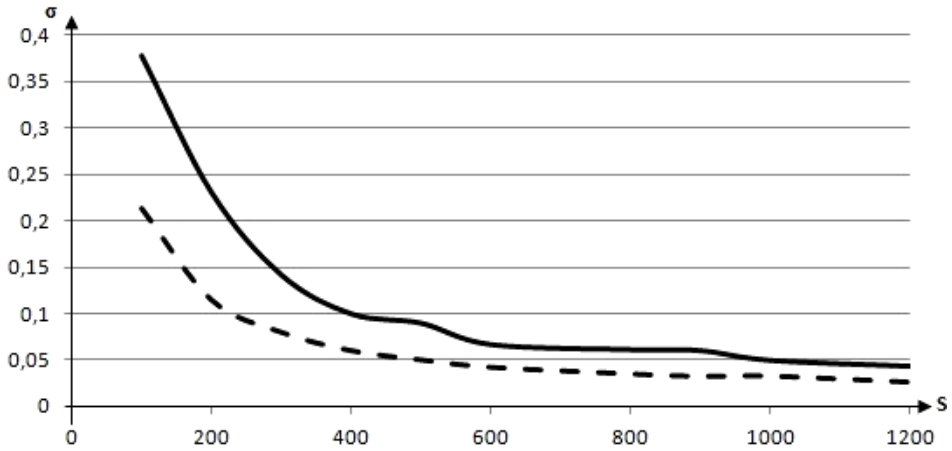


Рис. 4. Результаты оценки выхода $z(t)$ с учетом значений выхода $x(t)$
(обозначения аналогичны обозначениям на рис. 3)

И в этом случае оценка по заполненной матрице наблюдений оказалась точнее.

Таким образом, учет выходной переменной с меньшей дискретностью $x(t)$ при оценивании и восстановлении выходной переменной с большей дискретностью $z(t)$ позволяет значительно сократить относительную ошибку моделирования (см. рис. 3 и 4).

Авторами предложена методика восстановления пропусков матрицы наблюдений входных-выходных переменных. Приведены соответствующие алгоритмы заполнения этих пропусков. Показано, что заполнение матрицы приводит к повышению качества работы модели. В этой связи рассмотрена задача восстановления матрицы наблюдений с пропусками для решения задачи идентификации стохастических, статических объектов, в том числе и объектов с запаздыванием.

Представляется достаточно интересной необходимость использования при построении модели по основному выходу $z(t)$ другой выходной переменной $x(t)$, контролируемой с меньшей дискретностью времени, чем $z(t)$. В этом случае точность модели $z_s(u, x_s)$ будет значительно выше.

Библиографические ссылки

1. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М. : Наука, 1984.

2. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975.

3. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1983.

4. Надарая Э. А. Непараметрические оценки плотности вероятности и кривой регрессии. Тбилиси : Изд-во Тбил. ун-та, 1983.

5. Корнеева А. А., Медведев А. В. К анализу данных в задаче идентификации // Кибернетика и высокие технологии XXI века : тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2012. Т. 1. С. 52–62.

A. A. Korneeva, N. A. Sergeeva

DATA ANALYSIS IN A PROBLEM OF STATIC SYSTEMS IDENTIFICATION

The authors investigate a problem of identification of multidimensional inertia-free system with delay in conditions of non-parametric uncertainty. The main emphasis is laid on the problem of filling of a matrix of observation for the case when control discretenesses of "input-output" variables differ very much. The filling of the observation matrix technique is offered, numerical results of calculation experiments ,illustrating the efficiency of the offered technique for identification problems solving, are given.

Keywords: inertia-free object, non-parametric models, non-parametric estimation, stochastic system, matrix of observation.

© Корнеева А. А., Сергеева Н. А., 2012

УДК 621(075.8)

Е. И. Кротова

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предлагается метод автоматического контроля процесса получения гранулированных материалов при использовании в качестве контролируемого параметра выборочных значений влажности с применением статистического анализа и идентификации вида распределения.

Ключевые слова: контроль, параметр, выборка, вид распределения, идентификация.

Материалы в оболочках используются в производстве строительных материалов, минеральных удобрений, лекарственных средств, в пищевой промышленности, машиностроении. Оболочки наносятся на металлы, химические соединения (гидриды, соли кислот, оснований), многие классы органических соединений: катализаторы, стабилизаторы, пластификаторы, жидкое и твердое топливо, красители, удобрения, пищевые добавки, ферменты, семена.

Нанесение оболочек на материалы (дражирование) позволяет уменьшить их реакционную способность, а также смешивать несмешивающиеся и реагирующие друг с другом соединения, придает материалам новые физические и физико-механические свойства: изменяет плотность, гранулометрический состав, форму и т. д.

Методы нанесения оболочек могут быть разделены на три основные группы: химические, физико-химические, физические [1; 2].

Все известное оборудование для нанесения оболочек на гранулированные материалы физическими методами можно разделить на оборудование, в котором технологический процесс осуществляется в разреженных потоках практически без взаимодействия гранул между собой (это детерминированные рабочие процессы), и оборудование, в котором процессы нанесения оболочек осуществляются в концентрированных слоях зернистых материалов при активном их перемешивании (стохастические рабочие процессы) [3].

Оборудование второго типа включает в себя в основном барабанные и тарельчатые машины различных типов и оборудование с псевдоожиженным слоем [3].

Набольшей функциональностью и производительностью обладают барабанные дражираторы, в которых рост гранул сопровождается их сушкой, однако особенности конструкции этих дражираторов затрудняют осуществление автоматизированного контроля качества получаемых гранул [3].

Объектом исследования в данной статье является процесс нанесения оболочек на гранулы в барабанных дражираторах.

Существующие математические методы описания процесса гранулирования требуют большого объема экспериментальных данных при подборе эмпирических коэффициентов и не всегда учитывают картину движения сыпучего материала, процессы истирания и сушки, а недостаточность теоретических знаний затрудняет создание нового высокоэффективного оборудования и определение оптимальных режимных параметров, что, как правило, приводит к неоправданным затратам энергии и снижению качества продукции.

При решении вопроса о контроле физико-химических свойств сыпучих материалов, к которым относится и влажность, необходимо:

– выбрать оптимальное число и род параметров, характеризующих сыпучий материал;

– определить объем представительной выборки;

– разработать методы нахождения аналитической формы распределения, адекватной реальному распределению значений контролируемого параметра [1; 2].

При выборе параметров, по которым будет производиться контроль оборудования переработки сыпучих материалов, например их гранулирования, нужно учитывать, что обычно используются показатели готового продукта по влажности, температуре, гранулометрическому составу, цвету, вкусу и другим характеристикам качества готового вещества, полученные от датчиков. Недостатком такого контроля является отсутствие возможности управления технологическим процессом на различных стадиях.

Известно, что технологические параметры установок гранулирования рассчитываются из условия, что влажность материала имеет фиксированное значение, однако это требование редко выполняется из-за низкого качества исходного сырья.

В настоящее время для контроля влажности в большинстве случаев используются прямые и косвенные методы [2]. Прямые методы основаны на химическом, весовом определении влагосодержания в готовом продукте после окончания технологического процесса. Косвенные методы, которые делятся на электрические и неэлектрические, основаны на том, что измеряется величина, функционально связана с влагосодержанием материала. Среди косвенных методов измерения наиболее распространенными являются электрометрические методы, в которых влагосодержание преобразуется в электрическую величину: сопротивление, проводимость, емкость.

Проведенный в [2] анализ достоинств и недостатков этих методов позволил предложить следующее решение задачи повышения эффективности технологических устройств переработки сыпучих материалов: непостоянство значений параметра влажности, считающееся недостатком автоматических устройств контроля, несет в себе информацию о различном влагосодержании в разных частях объема гранулируемого сырья, наличии примесей, неоптимальности теплового режима, присутствии комков в порошковых добавках, плохом перемешивании жидкости мешалкой и т. п. А поскольку исходный сыпучий материал для получения гранул состоит из множества частиц, то для описания его свойств необходимо использовать статистический анализ, при этом фиксированные значения параметров гранулируемых материалов заменяются их средними значениями (математическими ожиданиями) [4].

В случае если частицы сыпучего материала имеют близкие значения влажности, они распределены по нормальному закону, однако при значительном разбросе значений влажности частиц вид распределения отличается от нормального. Таким образом, контроль качества гранулируемого сырья и диагностику работы технологического оборудования можно проводить на всех стадиях технологического процесса, исходя из вида распределения контролируемого параметра влажности.

Подобный подход применим и к установкам дражирования семян, главным требованием к которым является сохранение готового продукта без ухудшения его качества.

При разработке математической модели процесса получения монодисперсных и полидисперсных гранул используется модель системы «ресурс–потребитель», а в качестве основного параметра, характеризующего этот процесс, берется время роста гранул, совпадающее со временем сушки τ, поскольку в барабанных дражираторах эти процессы совмещаются [1–3].

В соответствии с общими принципами системно-структурного анализа химико-технологических систем и процессов, в них происходящих, множество системообразующих параметров $\{u\}$ необходимо разбить на четыре основные группы [2]:

– $\{u_k\}$ – множество конструктивных параметров;

– $\{u_R\}$ – множество режимных параметров;

– $\{u_{\text{ФМ}}\}$ – множество физико-механических параметров;

– $\{u_{\text{т}}\}$ – множество технологических параметров.

Для барабанного дражиратора имеем:

– множество $\{u_k\}$ – радиус и длина барабана;

– множество $\{u_R\}$ – угловая скорость барабана, угол загрузки компонентов, объемно-весовые характеристики компонентов;

– множество $\{u_{\text{ФМ}}\}$ – радиусы и плотности частиц ресурса (материала оболочки) и зерна гранулы (потребителя);

– множество $\{u_{\text{т}}\}$ – влажность зерна гранул, скорость дополнительной подачи ресурса за время в начале технологического процесса нанесения оболочек, скорость и температура сушки.

Для контроля процесса сушки, а следовательно и энергосбережения, необходимо учитывать влажность гранул в конце каждой стадии. Это позволяет изменять время сушки, т. е. время пребывания в дражираторе, в зависимости от влажности гранул, благодаря чему становится возможной автоматизация технологического процесса.

Для исследования зависимости времени сушки τ от влажности гранул на стадиях дражирования будем использовать идентификацию вида распределения значений влажности гранул.

В [1; 2] проанализирована модель скорости роста двуслойных гранул оболочки на грануле в процессе дражирования. Из уравнения для скорости роста гранул можно выразить время роста гранул τ, совпадающее со временем сушки [2]:

$$\tau = -\frac{1}{\gamma}\ln\left[-\frac{\gamma}{K}\ln\left[W\left(1+c_0 z_2\right)^{1/2} + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \left(Hc_0 - L\right)z_2 + H\right]\right]. \qquad (1)$$

В уравнение (1) введены сложные коэффициенты, содержащие системообразующие параметры $\{u\}$ [2]:

$$\gamma = -d\left(T\right)T_1,\ K = b_0\left[\frac{\omega_0 R_0}{R_0 - R_{\text{c}}} + d\left(T\right)\right],$$

$$W = AD\beta,\ H = AGD,\ L = KT_1,$$

$$A = a_0 \frac{\omega_0 R_0 T_1 p_2}{c_0 r_0},\quad D = e^{-\lambda(T)\left[\frac{r_1}{r_0}\right]^2} a_w a_1(z_1),$$

$$\beta = a_1(z_{12}),$$

$$G = 2[\beta + B],\quad B = \frac{2 r_0 p_1 a_1(z_{11})}{(R_0 - R_c) p_2},$$

$$a_w = \exp\left\{-\frac{(w - w_0)^2}{\sigma_w}\right\},$$

где T_1 – время подачи покрывающего материала; a_0, b_0 – экспериментальные коэффициенты; ω_0 – частота вращения барабана; R_0 – радиус дражировочного барабана; R_c – радиус верхней границы слоя; $d(T)$ – скорость сушки; p_1, p_2 – вероятности пребывания частиц в зонах 1 и 2 (ската и подъема частиц в барабане); c_0 – соотношение материала ресурса и потребителя; r_0 – радиус частицы ядра; $\lambda(T)$ – параметр локального влагоотделения; r_1 – радиус частицы материала оболочки; a_w – фактор влажности; $a_1(z_1)$ – закон роста оболочки; $a_1(z_{11})$, $a_1(z_{12})$ – законы скорости роста оболочки на ядре гранулы в зонах 1 и 2, задаваемые для каждого конкретного агрегата; w – конечная влажность гранул; w_0 – начальная влажность гранул; σ_w – среднеквадратичное отклонение влажности от технологически заданного значения.

В работе [1] предлагается параметр идентификации вида распределения Z, определяемый суммой отношения энтропийного коэффициента $k_э$ к контрэксцессу χ и учетверенного коэффициента асимметрии s, полученных для массива отсчетов влажности [4]:

$$Z = \frac{k_э}{\chi} + 4s. \qquad (2)$$

Процесс изменения влажности гранул в дражираторе описывается соотношением [2]:

$$w_t \geq w_0 e^{-d(T)T_1\tau}, \qquad (3)$$

где w_t – текущее значение влажности; w_0 – начальная влажность; $d(T)$ и T_1 определены ранее; τ рассчитывается по (1).

При достижении w_t значения конечной влажности w процесс гранулирования прекращается и готовый продукт можно выгружать.

Рассмотрим структурную схему системы контроля влажности гранулированных материалов [5], основанную на применении предложенного метода автоматического контроля параметров технологического процесса (рис. 1).

Датчик изменяет свои электрические свойства (сопротивление) в зависимости от влажности материала, в который он помещен. Выходной сигнал с датчика подается на вход электронного измерителя-преобразователя, в котором осуществляется преобразование «сопротивление–частота», а затем измеренное значение частоты отображается в визуальной форме с помощью индикатора.

С другого выхода измерителя-преобразователя массив данных задаваемого объема N в виде выборки значений частоты $x(t)$, пропорциональных влажности гранулированного материала, подается на вход идентификатора вида (закона) распределения, в котором осуществляется идентификация закона распределения плотности вероятности по параметру Z. На выходе идентификатора формируются среднеквадратичное отклонение σ_t и величина отклонения δ_t, характеризующая нормальный закон распределения значений частоты, соответствующих выборкам влажности $x_j(t)$.

Параметр S_t является определяющим для операции задания режима сушки, а именно времени сушки τ в случае, если распределение влажности является нормальным. При отличии закона распределения от нормального происходит останов технологического процесса гранулирования и сушки.

Электронный измеритель-преобразователь (рис. 2) работает следующим образом.

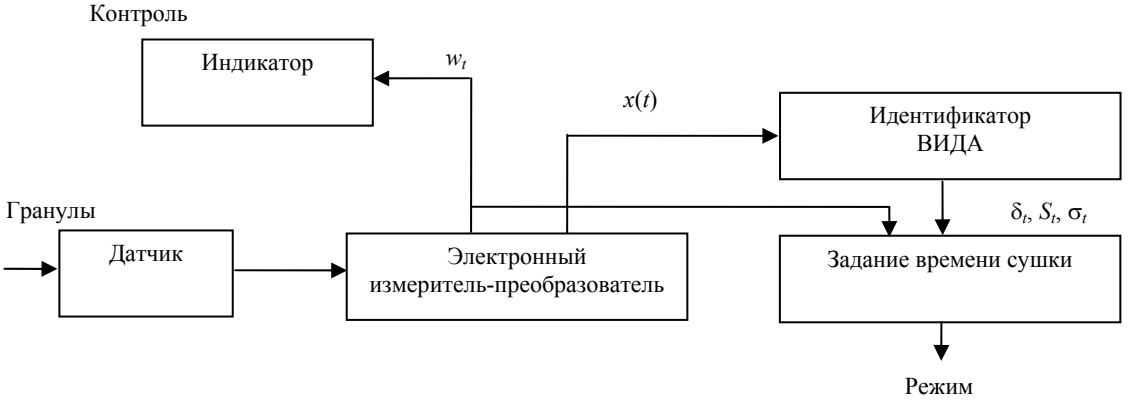


Рис. 1. Структурная схема системы контроля влажности гранул

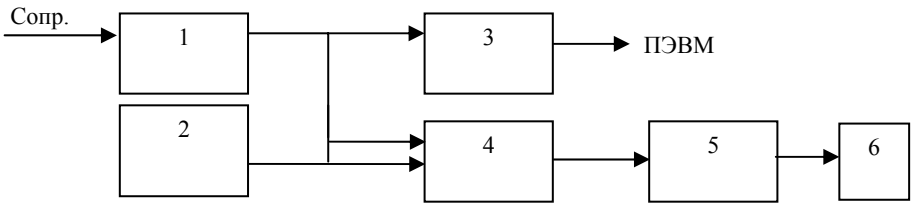


Рис. 2. Структурная схема электронного измерителя-преобразователя

Сопротивление датчика (Сопр.) включено в схему измерительного генератора *1*. При изменении сопротивления датчика в зависимости от влажности материала происходит изменение частоты этого генератора. С помощью частотомера *3* данное изменение фиксируется и вводится в виде числового файла (вручную или автоматически с выхода частотомера *3* на ПЭВМ) в программу идентификации вида распределения.

Для обеспечения оперативного контроля сушки гранул предусмотрена операция сравнения частоты измерительного генератора *1* с частотой опорного генератора *2* при помощи устройства сравнения *4*. Выходное напряжение этого устройства интегрируется с помощью интегратора *5*. Время интегрирования выбирается с учетом инертности датчика. При равенстве частот на выходе интегратора будет получен такой уровень напряжения, который приведет к включению индикатора *6* при достижении требуемой конечной (заданной технологически) влажности.

Индикатор *6* представляет собой ключевую схему, состоящую из компаратора и транзисторного ключа, управляющего включением и выключением лампочки или светодиода.

Экспериментальные исследования проводились при дражировании семян в барабанном дражираторе. Контроль влажности осуществлялся следующим образом: предварительно отградуированный датчик погружался в материал на глубину 5…10 см. Далее проводились контроль и фиксирование значений частоты измерительного генератора с помощью частотомера и ввод его показаний в виде числового файла в ПЭВМ, где реализовался алгоритм идентификации при объеме выборки $N = 100$. После получения информации о виде закона распределения частоты измерительного генератора, соответствующей влажности материала, по формуле (1) определялось оптимальное время сушки для заданной конечной влажности готового продукта. При этом контролировалось состояние индикатора (лампочки), который при достижении заданной конечной влажности выключался.

Эффективность предложенного метода автоматического контроля с идентификацией оценивалась с помощью относительного уменьшения времени технологического процесса Δ гранулирования семян [6]:

$$\Delta = [(\tau' - \tau)/\tau']100\ \%, \qquad (4)$$

где τ' – время сушки без идентификации; τ – время сушки в дражираторе с применением автоматического контроля влажности и идентификацией вида распределения ее выборочных значений.

Зависимость Δ от начальной влажности гранул w_0 при двойной и тройной относительной толщине оболочки z_2 приведена в таблице и на рис. 3. Начальная влажность соответствует оценке среднего значения m_1^* ее значений x_i:

$$w_0 = m_1^* = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\ . \qquad (5)$$

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

– созданная модель сушки гранулированных материалов, учитывающая связь начальной и конечной (заданной технологически) влажности, позволяет определить необходимое время сушки;

– разработанное электронное устройство для автоматического контроля влажности гранул в смесителях-дражираторах показало надежность при апробации в условиях производства.

– предложенный метод контроля параметров технологического процесса с использованием статистических характеристик и идентификацией распределения выборочных значений влажности обеспечивает наблюдение за процессом в режиме реального времени и приводит к значительному сокращению времени сушки (до 4 ч) при нормальном распределении значений влажности с точностью 5 %, что снижает энергозатраты при гранулировании.

Таблица

w_0, %	τ', ч		τ, ч		Δ, %	
	$z_2 = 2$	$z_2 = 3$	$z_2 = 2$	$z_2 = 3$	$z_2 = 2$	$z_2 = 3$
25	17	21	6	8	64	61
20	13	17	5	7	61	58
15	11	13	4	6	63	53
10	10	11	3	5	70	54

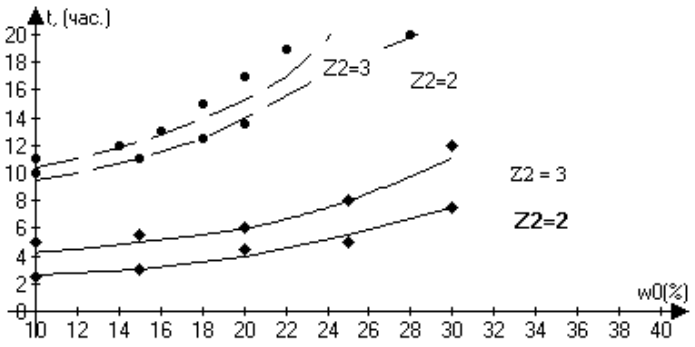


Рис. 3. Зависимость времени сушки τ от начальной влажности w_0 гранул для двойной и тройной относительной толщины оболочки z_2:
— — – расчетные значения без идентификации; —— – расчетные значения с идентификацией (нормальное распределение);
• • • – экспериментальные результаты без идентификации; ♦ ♦ ♦ – экспериментальные результаты с идентификацией (нормальное распределение)

При этом если начальная влажность сыпучего материала имеет значительный разброс значений и их распределение отличается от нормального, то до начала подачи покрывающего вещества оболочки исходный материал нужно предварительно просушить до получения нормального распределения влажности со средним значением, соответствующим технологической норме.

Библиографические ссылки

1. Кротова Е. И. Моделирование работы алгоритма идентификации закона распределения влажности гранулированных материалов // Информационные технологии моделирования и управления : междунар. сб. тр. / под ред. О. Я. Кравца. Вып. 18. Воронеж : Науч. кн., 2004. С. 95–101.

2. Кротова Е. И. Разработка метода расчета процесса сушки гранулированных материалов с использованием средств автоматизации : автореф. дис. … канд. техн. наук. Ярославль, 2006.

3. Классен П. В., Гришаев И. Г. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химических и нефтехимической технологий). М. : Химия, 1982.

4. Кротова Е. И. Идентификация типа распределений результатов экспериментальных исследований // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 1998. № 1. С. 57–59.

5. Пат. РФ № 2195099, МКП[7] A 01 C 1/06. Дражиратор / Зайцев А. И., Миронов Б. А., Зайцев И. А. и др. ; заявитель и патентообладатель Ярослав. гос. техн. ун-т. № 99124455/13 ; заявл. 22.11.1999 ; опубл. 27.12.2002, Бюл. 36.

6. Кротова Е. И. Модель блока контроля состояния системы по виду распределения контролируемых параметров // Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках : сб. тр. IV Всерос. науч. интернет-конф. Вып. 21. Тамбов, 2002. С. 75.

E. I. Krotova

METHOD OF AUTOMATIC QUALITY ASSURANCE OF WORK OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS

The author presents a method of automatic control of process of production of granulated materials with the use as controllable parameter of selective values of humidity with application of statistical analysis and identification of a kind of distribution.

Keywords: control, parameter, sample, kind of distribution, identification.

© Кротова Е. И., 2012

УДК 519.6

А. А. Кузнецов, А. С. Кузнецова

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЕЧНЫХ ДВУПОРОЖДЕННЫХ ГРУПП ПЕРИОДА 5*

Пусть $B_0(2, 5, k)$ – максимальная конечная двупорожденная бернсайдова группа периода 5 ступени нильпотентности k и $\{a_1, a_2\}$ – порождающие элементы данной группы. Проведены вычисления функции роста групп $B_0(2, 5, k)$ относительно порождающего множества $A = \{a_1, a_1^{-1}, a_2, a_2^{-1}\}$ для случаев k = 1, 2, 3, 4, 5.

Ключевые слова: группы Бернсайда, функция роста, диаметр Кэли.

Пусть $B_0(2,5,k)$ – максимальная конечная двупорожденная бернсайдова группа периода 5 ступени нильпотентности k. В данном классе групп наибольшей является группа $B_0(2,5,12)$, порядок которой равен 5^{34} [1]. Положим, что $\{a_1, a_2\}$ – порождающие элементы $B_0(2,5,k)$.

Авторами вычислены функции роста указанных групп для порождающего множества $A = \{a_1, a_1^{-1}, a_2, a_2^{-1}\}$ при $k \le 5$. Функция роста группы $B_0(2,5,6)$ относительно A получена Ч. Симсом в работе [2].

На множестве A введем отношение порядка $\prec$ (меньше): $a_1 \prec a_1^{-1} \prec a_2 \prec a_2^{-1}$.

Для получения функции роста и диаметра Кэли относительно A необходимо перечислить все элементы группы в формате минимальных слов [2], а после определения количества слов на каждой длине можно будет найти функцию роста группы, при этом максимально возможная длина минимальных слов будет являться диаметром Кэли группы.

Отметим, что для случаев k = 2, 3, 4, 5 были использованы компьютерные вычисления, основанные на алгоритме перечисления элементов группы.

Алгоритм перечисления элементов группы. Пусть p – простое число, а G – конечная группа экспоненты p. Это значит, что $g^p = 1$ для всех $g \in G$. Так как группа G нильпотентна, то мы можем найти цепочку подгрупп $G_i (1 \le i \le n)$, обладающих следующими свойствами:

– $G = G_1 \supset G_2 \supset \ldots \supset G_n \supset G_{n+1} = e$;

– G_i нормальны в G;

– факторы G_i / G_{i+1} имеют порядок p и лежат в центре G / G_{i+1}.

Пусть для $1 \le i \le n$ элемент $a_i \in G_i$, но $a_i \notin G_{i+1}$. Тогда каждый элемент группы $g \in G$ однозначным образом записывается в виде

$$g = a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} \ldots a_n^{\gamma_n}, 0 \le \gamma_i \le p. \quad (1)$$

Такое представление элементов группы (*pc*-представление) можно получить при помощи алгоритма, известного как P-Quotient Algorithm [3]. Он реализован в системах компьютерной алгебры GAP и Magma.

Если A – порождающее множество группы G, то любой ее элемент, записанный в виде слова $a_1 a_2 \ldots a_s$, где $a_i \in A$, можно преобразовать к виду (1):

$$a_1 a_2 \ldots a_s \overset{pq}{\to} a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} \ldots a_n^{\gamma_n}. \quad (2)$$

Процедура (2) дает возможность решить проблему равенства слов в G. На ее основе мы можем перечислить элементы G в формате минимальных слов.

Обозначим через $K_s(G)$ множество всех минимальных слов группы G, не превосходящих по длине s, через множество $Q_s(G)$ – элементы $K_s(G)$, записанные в виде правой части (2), через e – пустое слово – единицу группы.

Пусть $s_0 \in N$ – минимальное число, для которого выполняется равенство $K_{s_0}(G) = K_{s_0+1}(G)$. В этом случае s_0 будет являться диаметром Кэли группы G. Опишем алгоритм, вычисляющий K_s.

Шаг 1: $s = 0$, $K_0 = \{e\}$, $Q_0 = \{e\}$, $T = K_0$.

Шаг 2: $s = s + 1$, $K_s = K_{s-1}$, $Q_s = Q_{s-1}$, $V = xT \bigcup yT$, $T = \varnothing$, $i = 1$.

Шаг 3. Для $v_i \in V$ $\hat{v} = f(v_i)$. Если $\hat{v} \notin Q_s$, то $K_s = K_s \bigcup v_i$, $Q_s = Q_s \bigcup \hat{v}$, $T = T \bigcup v_i$.

Шаг 4. Если $i < |V|$, то $i = i + 1$ и переход на шаг 3; если $i = |V|$, то переход на шаг 5.

Шаг 5. Если $T \ne \varnothing$, то переход на шаг 2; если $T = \varnothing$, то переход на шаг 6.

Шаг 6. Если диаметр G равен $s - 1$, то тогда $K_{s-1}(G)$ – множество всех минимальных слов группы.

Шаг 7. Завершение работы алгоритма.

* Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд науки и научно-технической деятельности».

Таблица 1

Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов
0	1	2	8	4	4
1	4	3	8	–	–
$\lvert B_0(2,5,1)\rvert = 5^2 = 25$					

Таблица 2

Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов
0	1	2	12	4	62	6	2
1	4	3	32	5	12	–	–
$\lvert B_0(2,5,2)\rvert = 5^3 = 125$							

Группа $B_0(2,5,1)$. Данная группа представляет собой элементарную абелеву группу, порядок которой равен 5^2. Нетрудно вычислить функцию роста данной группы и диаметр Кэли (табл. 1). Справедлива следующая теорема.

Теорема 1. Относительно порождающего множества A группа $B_0(2,5,1)$ имеет диаметр Кэли, равный 4, а функция ее роста задана табл. 1.

Доказательство теоремы очевидно.

Группа $B_0(2,5,2)$. Любой элемент группы $B_0(2,5,2)$ может быть представлен в виде нормального коммутаторного слова [1]:

$$g = a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} a_3^{\gamma_3}, \ \ \gamma_i \in Z_5.$$

Здесь и далее $a_1^{-1} = a_1^4$ и $a_2^{-1} = a_2^4$.

Для умножения элементов будем использовать полиномы Холла, полученные в [4].

Пусть $a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3}$ и $a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3}$ – два произвольных элемента в группе $B_0(2,5,2)$, записанных в коммутаторном виде. Тогда их произведение

$$a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} \cdot a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3} = a_1^{z_1} a_2^{z_2} a_3^{z_3},$$

где $z_i \in Z_5$, и

$$z_1 = x_1 + y_1,$$

$$z_2 = x_2 + y_2,$$

$$z_3 = x_3 + y_3 + x_2 y_1.$$

Применив алгоритм перечисления элементов группы, получим функцию роста группы $B_0(2,5,2)$ (табл. 2).

Имеет место следующая теорема.

Теорема 2. Относительно порождающего множества A группа $B_0(2,5,2)$ имеет диаметр Кэли, равный 6, а функция ее роста задана табл. 2.

Доказательство теоремы следует из вычислений функции роста группы $B_0(2,5,2)$ по алгоритму перечисления элементов группы.

Группа $B_0(2,5,3)$. Каждый элемент группы $B_0(2,5,3)$ может быть представлен в виде нормального коммутаторного слова

$$g = a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} a_3^{\gamma_3} a_4^{\gamma_4} a_5^{\gamma_5}, \ \gamma_i \in Z_5.$$

Пусть $a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} a_4^{x_4} a_5^{x_5}$ и $a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3} a_4^{y_4} a_5^{y_5}$ – два произвольных элемента в группе $B_0(2,5,3)$, записанных в коммутаторном виде. Тогда их произведение

$$a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} a_4^{x_4} a_5^{x_5} \cdot a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3} a_4^{y_4} a_5^{y_5} = a_1^{z_1} a_2^{z_2} a_3^{z_3} a_4^{z_4} a_5^{z_5},$$

где $z_i \in Z_5$, и

$$z_1 = x_1 + y_1,$$

$$z_2 = x_2 + y_2,$$

$$z_3 = x_3 + y_3 + x_2 y_1,$$

$$z_4 = x_4 + y_4 + x_2 \binom{y_1}{2} + x_3 y_1,$$

$$z_5 = x_5 + y_5 + x_2 y_1 y_2 + \binom{x_2}{2} y_1 + x_3 y_2.$$

Здесь и далее $\binom{n}{r} = \dfrac{n!}{r!(n-r)!}$ – биномиальный коэффициент.

Используя алгоритм перечисления элементов группы, вычислим функцию роста группы $B_0(2,5,3)$ (табл. 3).

Справедлива следующая теорема.

Теорема 3. Относительно порождающего множества A группа $B_0(2,5,3)$ имеет диаметр Кэли, равный 10, а функция ее роста задана табл. 3.

Доказательство теоремы следует из вычислений функции роста группы $B_0(2,5,3)$ по алгоритму перечисления элементов группы.

Группа $B_0(2,5,4)$. Каждый элемент группы $B_0(2,5,4)$ может быть представлен в виде нормального коммутаторного слова:

$$g = a_1^{\gamma_1} a_2^{\gamma_2} a_3^{\gamma_3} a_4^{\gamma_4} a_5^{\gamma_5} a_6^{\gamma_6} a_7^{\gamma_7} a_8^{\gamma_8},\ \gamma_i \in Z_5.$$

Пусть $a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} a_4^{x_4} a_5^{x_5} a_6^{x_6} a_7^{x_7} a_8^{x_8}$ и $a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3}\ a_4^{y_4}\ a_5^{y_5} a_6^{y_6} a_7^{y_7} a_8^{y_8}$ – два произвольных элемента в группе $B_0(2,5,4)$, записанных в коммутаторном виде. Тогда их произведение

$$a_1^{x_1} a_2^{x_2} a_3^{x_3} a_4^{x_4} a_5^{x_5} a_6^{x_6} a_7^{x_7} a_8^{x_8} \cdot a_1^{y_1} a_2^{y_2} a_3^{y_3} a_4^{y_4} a_5^{y_5} a_6^{y_6} a_7^{y_7} a_8^{y_8} = a_1^{z_1} a_2^{z_2} a_3^{z_3} a_4^{z_4} a_5^{z_5} a_6^{z_6} a_7^{z_7} a_8^{z_8},$$

где $z_i \in Z_5$, и

$$z_1 = x_1 + y_1,$$

$$z_2 = x_2 + y_2,$$

$$z_3 = x_3 + y_3 + x_2 y_1,$$

$$z_4 = x_4 + y_4 + x_2 \binom{y_1}{2} + x_3 y_1,$$

$$z_5 = x_5 + y_5 + x_2 y_1 y_2 + \binom{x_2}{2} y_1 + x_3 y_2,$$

$$z_6 = x_6 + y_6 + x_2 \binom{y_1}{3} + x_3 \binom{y_1}{2} + x_4 y_1,$$

$$z_7 = x_7 + y_7 + \binom{x_2}{2}\binom{y_1}{2} + x_2 \binom{y_1}{2} y_2 + x_3 y_1 y_2 + x_4 y_2 + x_5 y_1,$$

$$z_8 = x_8 + y_8 + \binom{x_2}{3} y_1 + \binom{x_2}{2} y_1 y_2 + x_2 y_1 \binom{y_2}{2} + x_3 \binom{y_2}{2} + x_5 y_2,$$

Применив алгоритм перечисления элементов группы, найдем функцию роста группы $B_0(2,5,4)$ (табл. 4).

Имеет место следующая теорема.

Теорема 4. Относительно порождающего множества A группа $B_0(2,5,4)$ имеет диаметр Кэли, равный 19, а функция ее роста задана табл. 4.

Доказательство теоремы следует из вычислений функции роста группы $B_0(2,5,4)$ по алгоритму перечисления элементов группы.

Таблица 3

Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов
0	1	3	32	6	572	9	178
1	4	4	88	7	1 068	10	16
2	12	5	236	8	918	–	–
$\lvert B_0(2,5,3)\rvert = 5^5 = 3\,125$							

Таблица 4

Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов
0	1	5	236	10	24 380	15	29 304
1	4	6	632	11	49 056	16	3 168
2	12	7	1 660	12	83 204	17	198
3	32	8	4 220	13	102 930	18	40
4	88	9	10 512	14	80 944	18	4
$\lvert B_0(2,5,4)\rvert = 5^8 = 390\,625$							

Таблица 5

Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов
0	1	6	632	12	215 242	18	259 624
1	4	7	1 688	13	546 024	19	4 752
2	12	8	4 476	14	1 266 612	20	92
3	32	9	11 896	15	2 438 246	–	–
4	88	10	31 368	16	3 112 570	–	–
5	236	11	82 356	17	1 789 674	–	–
$\lvert B_0(2,5,5)\rvert = 5^{10} = 9\,765\,625$							

Таблица 6

Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов	Длина	Количество слов
0	1	8	4 476	16	10 401 496	24	1 000 867 498
1	4	9	11 896	17	26 831 306	25	130 718 312
2	12	10	31 528	18	68 290 046	26	1 353 842
3	32	11	83 508	19	169 729 186	27	3 454
4	88	12	221 108	20	403 331 722	28	714
5	236	13	582 828	21	873 779 504	29	146
6	632	14	1 529 508	22	1 558 150 656	30	12
7	1 688	15	3 998 452	23	1 853 591 734	–	–
$\lvert B_0(2,5,6)\rvert = 5^{14} = 6\,103\,515\,625$							

Группа $B_0(2,5,5)$. Аналогичным образом вычислим функцию роста группы $B_0(2,5,5)$ (табл. 5).

Справедлива следующая теорема.

Теорема 5. В алфавите A группа $B_0(2,5,5)$ имеет диаметр Кэли, равный 20, а функция ее роста задана табл. 5.

Доказательство теоремы следует из вычислений функции роста группы $B_0(2,5,5)$ по алгоритму перечисления элементов группы.

Группа $B_0(2,5,6)$. Функция роста группы $B_0(2,5,6)$ вычислена в работе [2] (табл. 6).

Библиографические ссылки

1. Hawas G., Wall G., Wamsley J. The Two Generated Burnside Group of Exponent Five // Bull. Austral. Math. Soc. 1974. № 10. P. 459–470.

2. Sims C. Fast Multiplication and Growth in Groups // Proc. of the 1998 Intern. Symposium on Symbolic and Algebraic Computation. Rostock, Germany, 1998. P. 165–170.

3. Sims C. Computation with Finitely Presented Groups. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1994.

4. Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. Быстрое умножение элементов в конечных двупорожденных группах периода пять // Прикл. дискрет. математика. 2012. № 4 (17). С. 54–60.

A. A. Kuznetsov, A. S. Kuznetsova

COMPUTER MODELING OF FINITE TWO-GENERATOR GROUPS OF EXPONENT 5

Let $B_0(2,5,k)$ be the largest finite, provided by two, Burnside group of period of the 5^{th} step of nilpotency k, and $\{a_1, a_2\}$ be generators of this group. In this article the growth functions of the groups $B_0(2,5,k)$,relative to $A = \{a_1, a_1^{-1}, a_2, a_2^{-1}\}$, are calculated for cases k = 1, 2, 3, 4, 5.

Keywords: Burnside groups, growth function, Cayley diameter.

© Кузнецов А. А., Кузнецова А. С., 2012

УДК 004.4

В. В. Кукарцев, Д. А. Шеенок

ОЦЕНКА ЗАТРАТ НА МОДЕРНИЗАЦИЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ПО НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

Предложен подход для оценки затрат на модернизацию программного обеспечения с учетом различных этапов жизненного цикла и введения программной избыточности. Проведены расчеты затрат на модернизацию программного обеспечения реальной системы.

Ключевые слова: программная избыточность, трудозатраты, программное обеспечение, декомпозиция.

При разработке высокобюджетных программных проектов важную роль играет оценка затрат. Расхождение планируемых затрат с фактическими может привести к серьезным финансовым потерям и даже банкротству компании-разработчика. Существует множество простых и сложных моделей и основанных на них методик оценки будущей стоимости проекта, но они в совокупности имеют следующие недостатки.

Во-первых, при оценке трудозатрат не различаются явным образом затраты персонала компании-разработчика на этапах проектирования, разработки, тестирования, документирования, а также затраты на руководителей, на организацию всего жизненного цикла проекта.

Во-вторых, расчет трудозатрат базируется на оценке объема кода программного продукта, что при современных технологиях проектирования и разработки не совсем адекватно отражает трудоемкость технологического процесса разработки.

В-третьих, не учитывается явным образом трудоемкость модернизации части системы, что заставляет рассматривать каждую новую доработку системы как отдельный новый проект. Современные сложные программные комплексы имеют большую иерархическую программную архитектуру, и доработка одного программного компонента обязательно влечет за собой изменения в других, связанных с ним компонентах. Поэтому при модернизации системы должна учитываться глубина доработки.

В-четвертых, информация, необходимая для расчета многих параметров, может отсутствовать на ранних этапах проекта, а их предполагаемая оценка может быть ошибочной.

В-пятых, в существующих моделях не учитываются затраты на повышение надежности наиболее важных компонентов путем введения программной избыточности. Снижение вероятности сбоя получают за счет одновременной работы нескольких версий одного и того же компонента, реализованных разными командами разработчиков или с использованием разных языков программирования. Таким образом снижается вероятность того, что на одних и тех же входных данных откажут все версии компонента. Для одновременной работы нескольких версий необходима разработка среды их исполнения. В среду исполнения входит алгоритм голосования, который выбирает наиболее приемлемые выходные данные от всех версий [1]. Введение программной избыточности необходимо для обеспечения безопасности функционирования критически важных информационных систем, связанных с управлением технологическими процессами или финансовыми расчетами.

Следовательно, необходима разработка методики оценки трудозатрат на модернизацию уже существующего программного продукта, которая поможет менеджерам проектов уменьшить ошибку оценки и снизить финансовые риски компании.

При расчете размера оцениваемой системы будут учитываться объектные указатели (компоненты) системы, аналогично модели COMOMO II [2].

Рассмотрим основные этапы методики оценки затрат на модернизацию программного обеспечения критических по надежности систем.

1. Анализ технических требований заказчика. Заказчик передает свои задокументированные требования на доработку системы для анализа компании разработчика или аналитики выявляют требования заказчика в ходе интервью. После проведенного анализа формируется проект технического задания на модернизацию системы.

2. Декомпозиция задач. На этапе проектирования архитектуры системы задачи модернизации декомпозируются на множество простых. Затем задачи сопоставляются с доработкой уже существующих компонентов системы или разработкой новых.

3. Группировка компонентов. Компоненты, которые необходимо разработать или модернизировать, группируются на типы по аналогичному назначению и сложности.

4. Определение избыточности программных компонентов. Для уменьшения вероятности сбоя в наиболее важных компонентах определяется количество версий, которые будут реализованы или разными командами разработчиков, или с использованием различных технологий. Также проводится оценка трудозатрат на разработку алгоритма голосования для данного компонента.

5. Оценка трудозатрат на разработку компонентов. Вычисляется среднее время разработки компонента каждого типа, на основании предыдущих работ или с помощью экспертной оценки. Если тип компонентов ранее не разрабатывался, то время определяется экспертно, исходя из анализа подобных типов компонентов.

6. Определение глубины модернизации компонентов. Определяется глубина доработки компонентов (весовые коэффициенты) в процентах.

7. Вычисление трудоемкости разработки. Суммируется трудоемкость разработки компонентов каждого типа. Если компонент подлежит модернизации, то трудоемкость разработки этого компонента умножается на весовой коэффициент. Также учитываются затраты на разработку алгоритма голосования данного компонента и на его версии, если компонент реализуется с применением программной избыточности.

8. Определение затрат на этапы жизненного цикла. На основании предыдущих работ вычисляется соотношение среднего времени, затраченного на другие этапы жизненного цикла, и среднего времени разработки. Вычисленные коэффициенты (соотношения) умножаются на трудоемкость этапа разработки. Таким образом, получается трудоемкость этапов анализа или проектирования, разработки, тестирования и работ по организации процесса.

9. Вычисление финансовых затрат на модернизацию проекта. Трудоемкость каждого этапа умножается на среднюю норму оплаты труда сотрудника, работающего на данном этапе жизненного цикла. Затем полученные суммы складываются.

Для проведения расчетов по приведенной методике используются следующие параметры:

M – множество типов компонентов;

i – тип компонента, $i \in M$;

N – множество новых и подлежащих доработке компонентов i-го типа;

j – номер компонента i-го типа, $j \in N$;

T_i – трудоемкость разработки нового или уже имеющегося компонента i-го типа, человеко-часов;

w_{ij} – весовой коэффициент модернизации существующего j-го компонента i-го типа (для новых компонентов равен $w_{ij} = 1$, если нет j компонента i-го типа, то $w_{ij} = 0$);

r_{ij} – количество версий в компоненте, если вводится программная избыточность (если программная избыточность не вводится, то $r_{ij} = 1$);

T_{Rij} – трудоемкость разработки алгоритма голосования для j-го компонента i-го типа (если программная избыточность не вводится, то $T_{Rij} = 0$);

T_m – общие трудозатраты на управление и организацию проекта, человеко-часов;

w_m – весовой коэффициент, определяющий процент трудоемкости организации от трудоемкости разработки;

C_m – стоимость оплаты одного человеко-часа менеджера проекта, руб.;

T_a – общая трудоемкость работы аналитиков и проектировщиков, человеко-часов;

w_a – весовой коэффициент, определяющий процент трудоемкости анализа и проектирования от трудоемкости разработки, человеко-часов;

C_a – стоимость одного человеко-часа аналитика или проектировщика, руб.;

T_{dev} – общая трудоемкость этапа разработки, человеко-часов;

C_{dev} – стоимость оплаты одного человеко-часа разработчика, руб.;

T_t – общая трудоемкость этапа тестирования;

w_t – весовой коэффициент, определяющий процент трудоемкости анализа от трудоемкости разработки;

C_t – стоимость оплаты одного человеко-часа тестировщика, руб.;

T_{doc} – общая трудоемкость документирования доработок системы, человеко-часов;

w_{doc} – весовой коэффициент, определяющий процент трудоемкости документирования от трудоемкости разработки;

C_t – стоимость оплаты одного человеко-часа специалиста по технической документации, руб.;

T_p – общая трудоемкость проекта, человеко-часов;

C_p – общая стоимость проекта, руб.

Трудоемкость разработки рассчитывается по матрице w_{ij} и с учетом введения программной избыточности следующим образом:

$$T_{dev} = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(w_{ij}T_i + \left(r_{ij} - 1\right)T_i + T_{Rij}\right).$$

Трудоемкости остальных этапов жизненного цикла рассчитываются по соответствующим весовым коэффициентам из трудоемкости разработки:

$$T_m = w_m T_{dev},$$
$$T_a = w_a T_{dev},$$
$$T_t = w_t T_{dev},$$
$$T_{doc} = w_{doc} T_{dev}.$$

Общая трудоемкость рассчитывается по формуле

$$T_p = \left(1 + w_m + w_a + w_t + w_{doc}\right)T_{dev}.$$

Формула расчета общей стоимости в детализированном виде выглядит следующим образом:

$$C_p = \left(w_m C_m + w_a C_a + C_{dev} + w_t C_t + w_{doc} C_{doc}\right) \times$$
$$\times \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\left(w_{ij}T_i + \left(r_{ij} - 1\right)T_i + T_{Rij}\right).$$

Для проверки корректности оценки по предложенной методике был проведен анализ оценочных и фактических данных на шести примерах модернизации системы. Расхождение фактической и прогнозируемой стоимости вычислялось по формуле

$$\text{Расхождение} = \left|\frac{\text{Стоимость}_{\text{прогнозируемая}} - \text{Стоимость}_{\text{фактическая}}}{\text{Стоимость}_{\text{фактическая}}}\right|.$$

На основании данных по расхождениям была произведена оценка показателя PRED(L). Он отражает процент оценок, отклонение которых от фактических значений меньше L [3]. Показатель рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{PRED}(L) = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\begin{cases}1, & \text{Расхождение} \le L,\\ 0,\end{cases}$$

где n – общее количество оценок.

В таблице приведены значения PRED(L) для параметра L, равного 20, 25 и 30 %.

Таблица

L	PRED(L)
PRED(20)	83 %
PRED(25)	83 %
PRED(30)	100 %

Согласно этим данным, расчеты по предложенной методике достаточно точны, что позволяет принять решение о ее использовании в ИТ-компаниях, занимающихся разработкой и поддержкой программного обеспечения сложных информационно-управляющих систем.

Предложенная методика оценки затрат на модернизацию программного обеспечения позволяет учитывать трудозатраты персонала на различных этапах жизненного цикла программного обеспечения; определять размер системы исходя из количества объектных указателей; учитывать глубину доработки архитектурных компонентов программной системы; использовать для расчета коэффициентов экспертную оценку, если нет актуальных данных по предыдущим работам; учитывать трудозатраты на введение программной избыточности.

Библиографические ссылки

1. Царев Р. Ю. Система многоатрибутивного формирования мультиверсионных программных средств

отказоустойчивых систем управления : дис. канд. … техн. наук. Красноярск, 2003.

2. Алиев Х. Р. Эффективная модель оценки разработки программного обеспечения [Электронный ресурс] // Исследовано в России. 2008. Т. 11, Вып. 3. С. 338–364. URL: http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2008/030.pdf (дата обращения: 29.09.2012).

3. Глазова М. А. Моделирование стоимости разработки проектов в ИТ-компаниях : дис. … канд. экон. наук. М., 2008.

V. V. Kukartsev, D. A. Sheenok

COST ESTIMATION FOR MODERNIZATION OF CRITICAL RELIABILITY SYSTEMS SOFTWARE

The authors present the approach of estimation of cost of software upgrade with the account of different stages of life cycle and putting into effect software redundancy. The calculations of the cost of modernization of the software of the real system are made.

Keywords: software redundancy, laboriousness, software, decomposition.

© Кукарцев В. В., Шеенок Д. А., 2012

УДК 004.052.2

В. А. Кулягин

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Рассматривается аспект применения предложенной ранее модели оценки надежности автоматизированных систем управления предприятием на проекте автоматизации торгового предприятия. Цель – дать оценку надежности системы в виде определенного показателя и рассчитать его на каждом этапе жизненного цикла разработки, экспериментально подтвердить зависимости параметров, присутствующих в формулах, оценить эффективность предложенного метода оценки надежности.

Ключевые слова: модели оценки надежности программного обеспечения, автоматизированная система управления предприятием.

Проекты автоматизации торговли отличаются от проектов автоматизации иных видов деятельности. При автоматизации торговли возрастает значимость факторов производительности и надежности системы автоматизации вследствие больших объемов данных, которыми оперирует торговая компания, а также высокого уровня оперативности ввода данных в систему и их анализа. Автоматизированные системы управления предприятием (АСУП) в торговле достаточно часто требуют интеграции с разнообразным компьютеризированным торговым оборудованием: сканерами штрих-кодов, принтерами этикеток (штрих-кодов), терминалами сбора данных и т. д. При автоматизации торговли акцент всегда делается на автоматизацию незначительного количества формализованных бизнес-процессов (закупки, хранения, обработки заказов и т. д.), в то время как, например, бухгалтерский учет в торговой компании достаточно простой. Практически всегда при внедрении новой системы автоматизации торговли или сложных функций существующих систем автоматизации вопрос о «ручном» вводе данных в новую систему не стоит – большой объем данных требует максимального использования автоматических средств. И наконец, непрерывный цикл работы торговой компании существенно усложняет планомерное внедрение системы автоматизации. В связи с приведенными причинами возникает интерес к исследованию оценки и обеспечения надежности применительно к этому классу АСУП.

Для оценки надежности АСУП торговых организаций предлагаются модели, описанные в [1]. Если входная надежность компонентов задана в виде значений вероятности безотказной работы, то используется базовая модель надежности. Если же она задана в виде значений вероятности успешного срабатывания, то используется модифицированная модель оценки надежности на основе статических вероятностей компонентов. Надежность автоматизированной системы управления предприятием в торговле $R_{\text{АСУП}_t}$ за рабочее время t:

$$R_{\text{АСУП}_t} = \prod_{l=1}^{N} R_{\text{АСУП}_{t_l}},$$

$$R_{\text{АСУП}_{t_l}} = \prod_{i=\text{K}_{l_1}+1}^{\text{K}_l} R_{it},$$

$$R_{it} = R_i,$$

если используется динамическая модель надежности,

$$R_{it} = e^{-\lambda_i t},$$

если используется статическая модель надежности,

$$\lambda_i = (1 - R_i)\frac{t}{dt_i},$$

$$R_i = \sum_{j=1}^{F}[R_{ij} \cdot R_{\text{ТО}_ij} \cdot R_{\text{инт}_ij}] \cdot R_{\text{ОС}_i} \cdot R_{\text{ап}_i} \times \times R_{\text{с}_i} \cdot R_{\text{СУБД}_i} \cdot R_{\text{пом}_i} \cdot R_{\text{пл}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{АСУ}П_{t_l}}$ – надежность l-й секции (магазина или склада), $l = 1\ldots N$; N – количество секций (магазинов или складов); K_l – максимальный индекс модуля l-й секции; R_{it} – вероятность безотказной работы пользователя i за время t, $i = 1\ldots$К; R_i – надежность работы пользователя i; R_{ij} – надежность программного компонента j для пользователя i, $j = 1\ldots F$; К – количество пользователей системы; F – количество программных компонентов системы; $R_{\text{СУБД}_i}$ – надежность подключаемой системы управления базами данных для пользователя i; $R_{\text{пл}}$ – надежность платформы ERP-системы; $R_{\text{с}_i}$ – надежность локальной сети для пользователя i; $R_{\text{ОС}_i}$ – надежность операционной системы для пользователя i; $R_{\text{ап}_i}$ – надежность аппаратного обеспечения вычислительной машины для пользователя i; $R_{\text{пом}_i}$ – надежность помещения, в котором осуществляется работа пользователя i (включает в себя влияние климатических факторов – температуры, влажности, солнечного света и факторов надежности электросети); $R_{\text{ТО}_ij}$ – надежность подключенного торгового оборудования для пользователя i, компонента j; $R_{\text{инт}_ij}$ – надежность сети Интернет для пользователя i, компонента j; t – интервал времени, за который оценивается вероятность безотказной работы; dt_i – средний интервал времени между двумя последовательными прогонами программы для пользователя i (определяется экспертом); λ_i – частота появления ошибок у пользователя i.

Коэффициент готовности системы $S_{\text{АСУП}}$:

$$S_{\text{АСУП}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}, \quad T_2 = \frac{1}{y}, \quad y = -\frac{\ln\left(R_{\text{АСУП}_t}\right)}{t},$$

где T_1 – среднее время простоя системы вследствие отказа (определяется экспертом); T_2 – среднее время появления отказа; y – частота появления отказов [1].

Для помощи специалисту, исследователю в оценке надежности АСУП торговых организаций на различных этапах жизненного цикла разработки была создана программная утилита «Оценка надежности АСУП». Программная система реализована в виде отдельного компонента ERP-системы «1С: Предприятие 8.2», который можно подключать и запускать на любой конфигурации. Программный продукт дает возможность удобно вводить и хранить параметры, уточнять входные параметры по ходу выполнения разработки, вычислять показатели надежности системы на основных этапах жизненного цикла разработки, оценивать эффективность выбранной модели оценки надежности.

В начале работы с программой в диалоге предлагается выбрать шесть файлов:

1) Input_design – файл, содержащий данные, необходимые для оценки надежности системы на стадии проектирования: код используемой модели оценки надежности, количество компонентов, количество пользователей, значения надежности готовых аппаратных и программных компонентов, вероятности использования модулей пользователями, предельные уровни надежности, уровень языка программирования, количество независимых входов и выходов разрабатываемых модулей, среднее время между двумя последовательными прогонами программы пользователями;

2) Input_coding – файл, содержащий дополнительные данные, необходимые для оценки надежности системы на стадии кодирования: коэффициенты сложности разработанных модулей, общее количество ошибок в модулях;

3) Input_testing – файл, содержащий дополнительные данные, необходимые для оценки надежности системы на стадии тестирования: значения надежности разработанных модулей;

4) Input_working – файл, содержащий дополнительные данные, необходимые для оценки надежности системы на стадии эксплуатации: значения надежности разработанных модулей, вероятности использования компонентов пользователями;

5) Input_maintaince – файл, содержащий информацию, необходимую для оценки надежности системы на стадии сопровождения; может содержать любые параметры, которые менялись за время эксплуатации системы;

6) Output – файл, в который записывается результат выполнения алгоритма: показатели надежности системы и относительные стандартные отклонения показателей.

Рассмотрим процесс разработки автоматизированной системы штрихкодирования и учета товаров на складе предприятия «Шелковые сети», а также оценим надежность системы на каждом этапе жизненного цикла разработки.

Стадия предпроектного обследования. Сфера деятельности рассматриваемого предприятия – розничные и оптовые продажи конечному потребителю и через дистрибьюторов. Центральный офис выполняет на предприятии основные функции, к которым относится закупка товаров, ценообразование, перемещение товаров на периферийные оптовые точки и в розничные магазины, оптовые продажи, ведение бухгалтерского учета, функции управления и т. д. Требуется автоматизировать бизнес-процессы предприятия на трех оптовых и четырех розничных точках.

Особенности бизнес-процессов данного предприятия заключаются в том, что передача товаров с центрального оптового склада в розничные точки осуществляется по схеме «комитент–комиссионер». Оптовые склады принадлежат организации-комитенту, а розничные магазины – организации-комиссионеру, принимающему товар на комиссию. Также номенкла-

тура товара содержит более 300 000 позиций и имеет, помимо основных, дополнительные характеристики (цвет, размер), согласно которым необходимо вести учет. Все эти особенности требуют доработки типовых функций ERP-системы.

Стадия проектирования. На данном этапе распределяются обязанности участников проекта (табл. 1), определяются сроки выполнения этих обязанностей.

Срок сдачи проекта – 40 дней с начала разработки. В оптовых складах размещаются серверы, на которых располагаются информационные базы 1С и другие программы. Устаревшая часть компьютерного парка заменяется новой компьютерной техникой, приобретается недостающее торговое оборудование, лицензионное программное обеспечение и программы «1С:Предприятие 8». Часть пользователей будет работать в терминальном режиме на сервере, поэтому необходимо приобрести лицензии на терминальный доступ. Некоторые автоматизированные рабочие места (АРМ) пользователей оснащаются специализированным торговым оборудованием. АРМ кассира розничной торговой точки включает сканер штрихкодов, принтер чеков, ридер магнитных карт, АРМ товароведа оснащается сканером штрихкодов и принтером этикеток. На центральном складе у кладовщика устанавливается сканер штрихкодов и принтер этикеток. Специалистом технической поддержки выполняется экспертная оценка надежности используемых программных и аппаратных компонентов, результаты в виде числовых показателей заносятся в файл.

Разработка программной ERP-системы ведется на базе программных продуктов «1С:Предприятие 8». Составлена общая организационная схема предприятия, проработаны все возможные варианты размещения и взаимодействия информационных баз (ИБ) и выбрана наиболее оптимальная ИБ с точки зрения функциональности и надежности (см. рисунок).

Программа «1С:Предприятие» представляет собой совокупность технологической платформы и прикладных решений различного масштаба и различной направленности, созданных на основе технологической платформы [2].

Конфигурация «1С:Управление торговлей» автоматизирует следующие направления хозяйственной деятельности предприятия: управление взаимоотношениями с клиентами, маркетинг, управление продажами, денежные средства, управление запасами, управление закупками, финансовый учет. Реализованы функции учета от ведения справочников и ввода первичных документов до получения различных аналитических отчетов. Цель применения – автоматизация работы трех оптовых складов.

Отраслевое решение «1С-Рарус:Розница.Магазин одежды и обуви» предназначено для автоматизации оперативного и управленческого учета, анализа и планирования операций в розничной торговле одеждой, обувью, аксессуарами, товарами для спорта и активного отдыха, в формате как одиночных магазинов, так и розничной торговой сети.

Конфигурация «1С:Комплексная автоматизация 8» решает прикладные задачи комплексной автоматизации управления и учета предприятий.

В единой информационной базе ведется управленческий, бухгалтерский и налоговый учет как одной, так и нескольких организаций [3]. Цель применения программы на предприятии «Шелковые сети» – автоматизация бухгалтерского учета и расчета зарплаты, управление персоналом, комплексный анализ всех данных на предприятии, возможность мониторинга и анализа эффективности для руководителей.

Информационные базы «1С:Управление торговлей», расположенные на оптовых складах, обмениваются между собой всеми данными. Информационная база «1С:Управление торговлей» на центральном складе обменивается с главной информационной базой «1С-Рарус:Розница». Из центрального склада в розницу поступают номенклатура, документы поступления товаров и розничные цены.

Центральная розничная база обменивается всеми данными с информационными базами магазинов, это необходимо для распределения товаров по магазинам и синхронизации данных о проданных дисконтных картах и подарочных сертификатах.

Также организуется односторонний обмен всеми данными из базы «1С:Управление торговлей» в базу «1С:Комплексная автоматизация» для получения комплексных отчетов по всем видам учета.

Таблица 1

Роли участников проекта

Специалист	Обязанности
Ведущий программист	Проектирование архитектуры программно-аппаратной системы, доработка ERP-системы (написание модулей), эксплуатационное тестирование, внедрение, сопровождение ERP-системы
Программист 1	Разработка правил переноса данных из ранней версии программы
Программист 2	Участие в запуске проекта (консультации для пользователей)
Программист 3	Участие в запуске проекта (консультации для пользователей)
Специалист технической поддержки	Проектирование архитектуры программно-аппаратной системы. Установка и настройка серверов, компьютеров, торгового оборудования. Установка и настройка лицензионного программного обеспечения на вычислительные машины

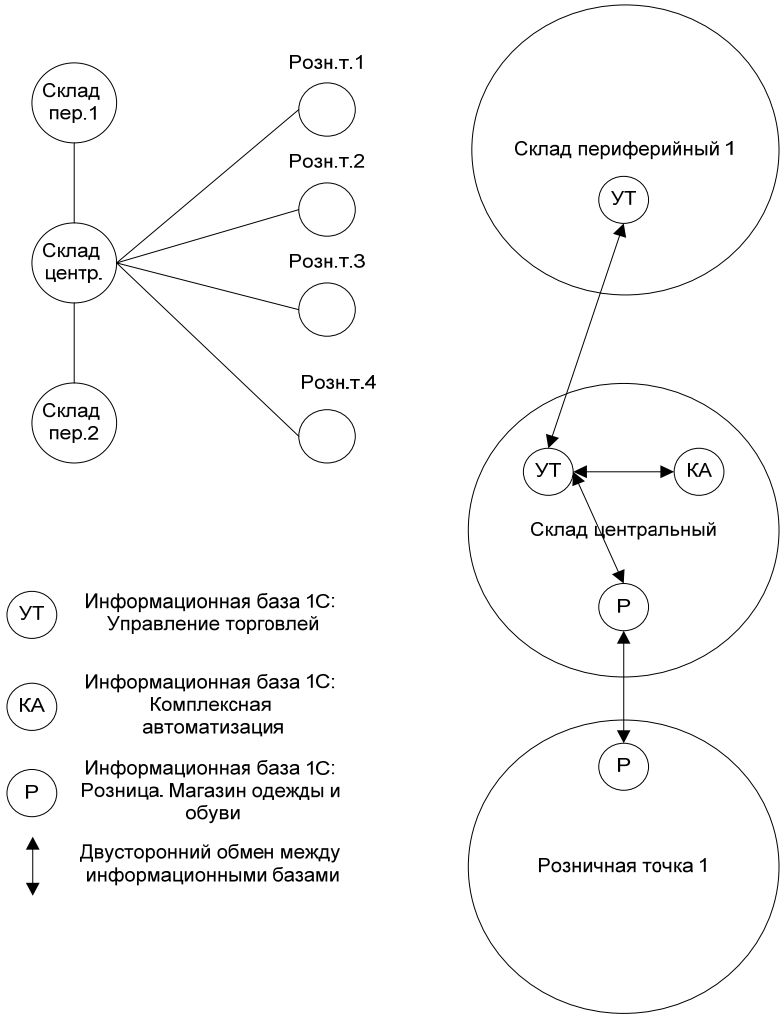


Схема обмена между ИБ предприятия

На центральном складе планируется использовать клиент-серверный режим работы «1С:Предприятие» в связи с большим количеством одновременно работающих пользователей, на остальных складах и в розничных магазинах – файл-серверный. Клиент-серверный режим, с одной стороны, увеличивает производительность работы многопользовательской системы, с другой стороны, добавляет еще одно звено – сервер, за надежностью которого также необходимо следить. Обмен данными выполняется в автоматическом режиме с интервалом в 1–2 часа, поэтому во всех торговых точках будет использоваться доступ к Интернету провайдера, надежность которого проверена.

Трудоемкость разработки ERP-системы оценена в 202 человеко-часов. Определены те компоненты, которые необходимо разработать с нуля и оценить их надежность на каждом этапе разработки по заданному методу.

В файл Input_design программы «Оценка надежности АСУП» вводятся начальные параметры. Общее количество используемых программных компонентов ERP-системы – 60, количество пользователей – 36. Методом экспертных оценок программисты выполняют оценку вероятности использования каждого компонента пользователями и оценку надежности стандартных программных компонентов. Также определяется общее количество входов и выходов для каждого проектируемого модуля. Уровень языка программирования «1С:Предприятие» $\lambda = 1{,}9$, минимально допустимая надежность разрабатываемых модулей $R_{\text{минстj}} = 0{,}992$, минимально допустимая надежность АСУП за $t = 1$ч $R_{\text{мин}t} = 0{,}5$, минимально допустимый коэффициент готовности системы $S_{\min} = 0{,}95$.

Расчет количества ошибок в проектируемых модулях:

$$B_j = \frac{\left(V_j^*\right)^2}{(3\,000 \cdot l)},$$

$$V^*_j = (2 + \eta_{2j}^*) \log_2(2 + \eta_{2j}^*).$$

Надежность разрабатываемых программных модулей:

$$R_{\text{тестj}} = 1 - y_j,$$
$$y_j = c_j \cdot \acute{\varepsilon}_{0j},$$
$$\acute{\varepsilon}_{0j} = B_j \cdot X_j,$$
$$c_j = l \cdot c_{\text{слj}},$$

где y_j – частота появления ошибок в модуле j; $\acute{\epsilon}_{0j}$ – количество оставшихся ошибок в модуле после тестирования; l – коэффициент пропорциональности, определяется на основании данных о ранее выполненных проектах; $c_{слj}$ – коэффициент сложности модуля j, на данном этапе задается экспертом; X_j – доля ошибок, оставшихся в модуле после тестирования.

Надежность компонента j для пользователя i:

$$R_{ij} = PU_{ij} \cdot R_{тестj}, \text{ где } \sum_{j=1}^{F} PU_{ij} = 1,\ i = 1, \ldots, \text{К},$$

где PU_{ij} – вероятность использования компонента j пользователем i, $i = 1, \ldots, \text{К}, j = 1, \ldots, F$ [1].

Далее найденные R_{ij} подставляются в формулу (1).

Используя программную утилиту «Оценка надежности АСУП» и файл с входными данными, рассчитывают показатели надежности на данном этапе: $R_{\text{АСУП}_{t=1\text{ч}}} = 0{,}641\ 2$, $S_{\text{АСУП}} = 0{,}964\ 44$.

Стадия кодирования. Выполняется программирование необходимых модулей программной системы в соответствии с техническим заданием, сформированным на стадии проектирования. Рассчитывается структурная сложность каждого разработанного модуля.

Структурная сложность программ определяется числом взаимодействующих компонентов; числом связей между компонентами; сложностью взаимодействия компонентов.

При функционировании программы разнообразие ее поведения и разнообразие связей между ее входными и результирующими данными в значительной степени определяется набором маршрутов (чередующихся последовательностей вершин и дуг графа управления), по которым исполняется программа.

Все маршруты исполнения программного модуля условно можно разделить на две группы:

– вычислительные маршруты;

– маршруты принятия логических решений.

Поскольку доля вычислительной части во многих программных комплексах обработки информации относительно невелика, вычислительные маршруты не определяют структурную сложность программ.

Сложность маршрутов принятия логических решений оценивается формулой

$$c_{слj} = \sum_{i=1}^{m} p_{ij},$$

где p_{ij} – число ветвлений или число проверяемых условий в i-м маршруте j-го модуля [4].

Значения коэффициентов сложности записываются в файл Input_coding программной утилиты «Оценка надежности АСУП», затем рассчитываются значения надежности модулей и показатели надежности автоматизированной системы в целом: $R_{\text{АСУП}_{t=1\text{ч}}} = 0{,}706\ 5$, $S_{\text{АСУП}} = 0{,}972\ 22$.

Стадия тестирования. Используется модифицированный нисходящий метод тестирования. Этот подход требует, чтобы каждый модуль прошел автономное тестирование перед подключением к программе. Программа собирается и тестируется сверху вниз. В зависимости от того, в каком виде заданы значения надежности входных компонентов, используется либо модель оценки надежности Нельсона, либо модель Джелинского–Моранды для вычисления надежности каждого тестируемого модуля $R_{тестj}$:

$$R_{тестj} = 1 - \frac{n_j}{m_j},$$

где n_j – количество неудачных прогонов программы; m_j – количество удачных прогонов программы [5].

Тестирование и исправление ошибок в модулях ведется до момента времени, пока $R_{тестj}$ не станет больше $R_{стj}$. Полученные значения надежности модулей записываются в файл Input_testing, с помощью программной утилиты «Оценка надежности АСУП» рассчитываются показатели надежности: $R_{\text{АСУП}_{t=1\text{ч}}} = 0{,}626\ 8$, $S_{\text{АСУП}} = 0{,}962\ 62$.

Стадия эксплуатации. Наиболее часто встречающиеся типы ошибок на начальном этапе эксплуатации системы – это недостаток функциональности разработанных модулей (вследствие ошибок, допущенных на стадии проектирования), сбои в программных модулях, вызванных некорректными действиями пользователей (вследствие отсутствия соответствующей справочной информации, недостаточного уровня обучения персонала, отсутствия защиты от несанкционированных действий пользователя), перебои в работе сети Интернет, сбои и неполадки, вызванные несовместимостью отдельных компонентов вычислительных машин, торгового оборудования.

Значения надежности работы пользователей вычисляются на основании статистики об отказах, для этого используются встроенные в ERP-систему измерительные мониторы. Значения надежности R_i записываются в файл Input_working, затем с помощью утилиты «Оценка надежности АСУП» рассчитываются показатели надежности системы: $R_{\text{АСУП}_{t=1\text{ч}}} = 0{,}633\ 7$, $S_{\text{АСУП}} = 0{,}963\ 47$.

Проверим гипотезу о законе распределения случайной величины (экспоненциальное распределение с параметром $\lambda = 0{,}456\ 24$), используя критерий Пирсона. Для проверки критерия вводится статистика:

$$\chi^2 = \sum \frac{\left(V_i - NP_i^{H_0}\right)}{NP_i^{H_0}}.$$

Для критерия значимости 0,05 по табл. 2 критических значений Хи-квадрат распределения находится порог: 16,9. Наблюдаемое значение критерия $6{,}83 < 16{,}9$, следовательно гипотеза о том, что заданное распределение является экспоненциальным распределением с параметром $\lambda = 0{,}456\ 24$, верна с уровнем значимости 0,05.

Используемая методика оценки надежности доказала свою применимость и может быть использована для оценки надежности в других проектах автоматизации торговых предприятий.

Таблица 2

Значения параметров для вычисления критерия Пирсона

Время появления ошибки фактическое, ч	Интервал	Частота фактическая V_i	Время появления ошибки теоретическое, ч	Частота теоретическая $NP_i^{H_0}$	$\frac{\left(V_i - NP_i^{H_0}\right)}{NP_i^{H_0}}$
0,3	(0; 4,3]	2	2,2	1	1
2,5	(4,3; 8,6]	2	4,4	2	0
5,9	(8,6; 12,9]	4	6,6	2	2
7,1	(12,9; 17,2]	2	8,8	2	0
9,1	(17,2; 21,5]	0	11	2	2
10,9	(21,5; 25,8]	3	13,2	2	0,5
12,5	(25,8; 30,1]	2	15,4	2	0
12,8	(30,1; 34,4]	2	17,6	2	0
15,4	(34,4; 38,7]	2	19,8	2	0
17,2	(38,7; 43]	1	22	3	1,33
21,9			24,2		$S = 6,83$
24,1			26,4		
25,8			28,6		
27,9			30,8		
28,7			33		
30,2			35,2		
33,7			37,4		
35,8			39,6		
38,2			41,8		
42,7			43		

Библиографические ссылки

1. Кулягин В. А. Модель оценки и обеспечения надежности автоматизированных информационных систем в торговле // Системный анализ. Информатика. Управление : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Запорожье, 2012. С. 172–174.

2. Профессиональная разработка в системе «1С:Предприятие 8» / А. П. Габец, Д. И. Гончаров, Д. В. Козырев и др. СПб. : Питер, 2006.

3. 1С:Предприятие 8. Система программ [Электронный ресурс]. URL: http://www.users.v8.1c.ru/ (дата обращения: 12.12.2012).

4. Кирьянчиков В. А., Опалева Э. А. Качество и надежность программного обеспечения. СПб. : Питер, 2002.

5. Романюк С. Г. Оценка надежности программного обеспечения // Открытые системы. М., 1994. № 4. С. 95–104.

V. A. Kulyagin

ANALYSIS OF APPLICATION OF RELIABILITY ASSESSMENT MODEL OF ENTERPRISE AUTOMATED MANAGEMENT SYSTEMS

The author considers the aspect of application of the offered earlier model of reliability assessment of an enterprise automated management systems, in the case of project development of trade enterprise automation. The purpose is to give system reliability assessment in the form of a certain index and to calculate it at each stage of life cycle of development, and experimentally confirm dependence of parameters which occur at formulas and to evaluate efficiency of the offered method of reliability assessment.

Keywords: software reliability estimation models, automated enterprise management system.

© Кулягин В. А., 2012

УДК 681.5(075.8)

А. Н. Ловчиков

УСТОЙЧИВОСТЬ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА В РЕЖИМЕ ПРЕРЫВИСТЫХ ТОКОВ*

На основе предложенного автором нового подхода к анализу и синтезу широтно-импульсных систем исследуется динамика широтно-импульсного стабилизатора напряжения в наиболее сложном режиме прерывистых токов.

Ключевые слова: широтно-импульсный стабилизатор, режим прерывистых токов.

В работе [1] предложен метод исследования, позволяющий успешно решать задачи анализа устойчивости и синтеза систем с широтно-импульсной модуляцией. Предложенная методика может быть распространена на случай, когда в широтно-импульсной системе имеется дополнительная существенная нелинейность.

Импульсный стабилизатор напряжения (ИСН) состоит из транзисторного ключа, управляемого широтно-импульсным модулятором (ШИМ), первичного источника напряжения E и источника опорного напряжения $U_{оп}$, LC-фильтра (r – активное сопротивление дросселя), сопротивления нагрузки R и диода, включающегося в работу при закрытии транзисторного ключа (рис. 1). В процессе работы сопротивление нагрузки и напряжение источника изменяются. Система в этом случае может работать в двух режимах: при непрерывном и прерывистом изменении тока дросселя фильтра I_2. Анализу устойчивости системы в первом случае посвящено достаточно большое количество работ, в частности [1], и методика решения этой задачи известна. Второй, более сложный случай, в литературе рассмотрен только с энергетических позиций. Динамические характеристики этого режима практически не исследованы.

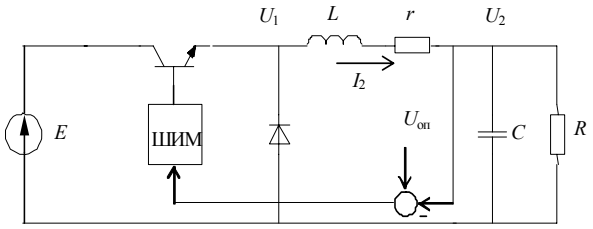


Рис. 1

В данной статье на основе предложенного в [1] подхода к анализу устойчивости систем с широтно-импульсной модуляцией рассматривается устойчивость ИСН в режиме прерывистых токов дросселя I_2.

Постановка задачи. Схему, изображенную на рис. 1, можно представить в виде гипотетической схемы (рис. 2), в которой широтно-импульсный преобразователь (ШИП) совмещает в себе действия ШИМ, транзисторного ключа и первичного источника питания. ШИП генерирует ЭДС $E_{ШИП}$, равную E при открытом ключе и нулю при закрытом.

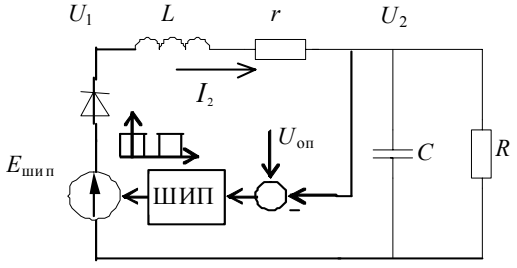


Рис. 2

В этой схеме (см. рис. 2) так же, как и в исходной, напряжение на входе фильтра при условии идеальности характеристик диода в режиме прерывистых токов дросселя $U_1 = E$, когда транзисторный ключ открыт; $U_1 = 0$ при закрытом ключе и $I_2 \neq 0$; $U_1 = U_2$ при $I_2 = 0$.

Используем далее схему рис. 2. Разложим напряжение $E_{ШИП}$ в ряд Фурье, ограничившись членами ряда, определяющими постоянную составляющую и первую гармонику. При этом для упрощения выражений без потери достоверности получаемых результатов считаем, что ось ординат проходит посередине импульса. Тогда функция, характеризующая заданную последовательность импульсов, является четной и при разложении в ряд Фурье $b_K = 0$ [2]. Следовательно, в нашем случае надо найти коэффициенты a_0 и a_1:

$$a_0 = \frac{1}{T}\int_{-\tau/2}^{nT-\tau/2} E dt = E\gamma,$$

$$a_1 = \frac{2}{T}\int_{-\tau/2}^{nT-\tau/2} E\cos\frac{2\pi}{T}t\,dt = \frac{2E}{\pi}\sin\pi\gamma,$$

где τ – время открытого состояния ключа на периоде следования импульсов; T – период следования импульсов; $\gamma = \tau/T$ – относительная длительность импульса. Поскольку τ в процессе работы стабилизатора изменяется во времени, то можно принять, что $\tau(t)$ и $\gamma(t)$ являются функцией времени.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания (проект 7.55.16.2011).

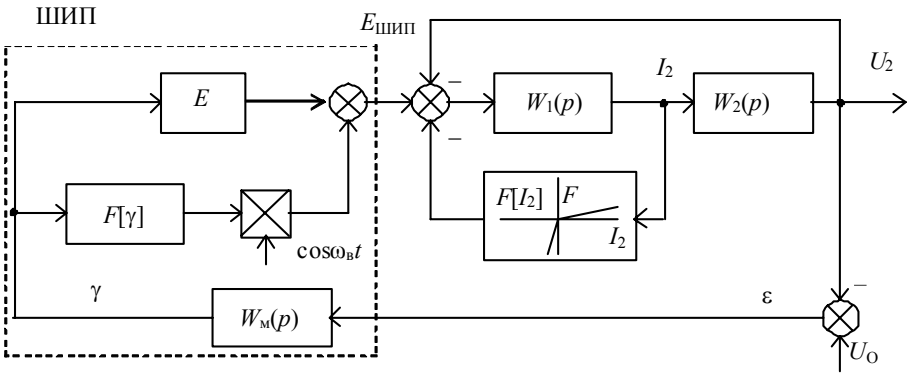


Рис. 3

С учетом вышеизложенного система дифференциальных уравнений, описывающая процессы в стабилизаторе, примет вид

$$\begin{aligned} L\dot{I}_2(t) &= E\gamma(t) + \frac{2E}{\pi}\sin(\pi\gamma(t))\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) - \\ &- U_2(t) - rI_2(t) - F\left[I_2(t)\right], \\ C\dot{U}_2(t) &= I_2(t) - YU_2(t), \\ \dot{\gamma}(t) &= k(U_{оп} - U_2(t)), \end{aligned} \qquad (1)$$

где $Y = 1/R$; k – коэффициент передачи модулятора, который в данном случае принят астатическим. На основании (1) строим структурную схему (рис. 3), где передаточные функции $W_1(p) = 1/(Lp + r)$, $W_2(p) = 1/(Cp + Y)$, $W_М(p) = k/p$, нелинейная функция $F[I_2(t)]$ определяет нелинейность диодного типа с коэффициентами k_1 в открытом состоянии диода, когда $I_2 > 0$, и k_2 – в закрытом, $F[\gamma] = \frac{2E}{\pi}\sin(\pi\gamma(t))$.

Задача исследования устойчивости системы заключается в определении условий возникновения автоколебаний при наличии постоянной составляющей и вынужденных колебаний $\omega_в$. Вынужденные высокочастотные колебания не оказывают воздействия на переменную γ, так как значительно ослабляются фильтром и самим модулятором. Решение ищем в виде

$$\begin{aligned} I_2 &= I_2^0 + I_{21} + I_{2*}, \\ U_2 &= U_2^0 + U_{21} + U_{2*}, \\ \gamma &= \gamma_0 + \gamma_1, \end{aligned}$$

где I_2^0, U_2^0, γ_0 – постоянные составляющие; I_{21}, U_{21}, γ_1 – переменные составляющие, характеризующие автоколебательный режим; I_{2*}, U_{2*} – переменные, характеризующие вынужденные колебания в системе.

Метод решения. Так как частота автоколебаний много меньше частоты вынужденных колебаний, уравнение для определения вынужденных колебаний в системе принимает вид

$$Q(p)I_{2*} + R(p)F\left[I_2\right] = R(p)F\left[\gamma\right]\cos\omega_в t, \qquad (2)$$

где $Q(p) = LCp^2 + (LY + Cr)p + 1 + rY$, $R(p) = Cp + Y$.

Решение (2) ищем в виде

$$I_{2*} = A_в \sin(\omega_в t + \varphi),$$

где $\omega_в = 2\pi/T$; $A_в$ – амплитуда вынужденных колебаний.

Изобразим нелинейность $F[I_2]$ (рис. 4).

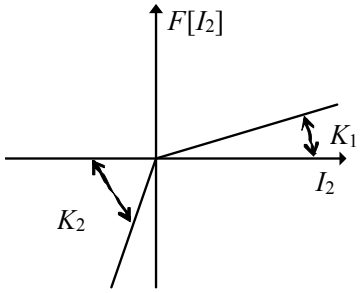


Рис. 4

Нелинейность $F[I_2]$ после гармонической линеаризации определится равенством

$$F\left[I_2\right] = F^0\left[A_в, I_2^0 + I_{21}\right] + q\left(A_в, I_2^0 + I_{21}\right)I_{2*}. \qquad (3)$$

Коэффициент $q(A_в, I_2^0 + I_{21}) = 0$, так как нелинейность $F[I_2]$ однозначна. Обозначим $I_2^0 + I_{21} = I_{20}$. Выражения для F^0 и q имеют вид, представленный на рис. 4 [3]:

$$\begin{aligned} F^0 &= \frac{K_1 + K_2}{2}I_{20} + \frac{K_1 - K_2}{\pi} \times \\ &\times \left(I_{20}\arcsin\frac{I_{20}}{A_в} + A_в\sqrt{1 - \frac{I_{20}^2}{A_в^2}}\right), \end{aligned} \qquad (4)$$

$$q = \frac{K_1 + K_2}{2} + \frac{K_1 - K_2}{\pi}\left(\arcsin\frac{I_{20}}{A_в} + \frac{I_{20}}{A_в}\sqrt{1 - \frac{I_{20}^2}{A_в^2}}\right).$$

В уравнение (2) подставляем второе слагаемое из (3), где q определяется из второго уравнения (4). Параметры $A_в$ и φ вынужденного автоколебательного режима определяются из равенств

$$A_B^2 = F[\gamma]^2 \frac{\left|R(j\omega_в)\right|^2}{\left|Q(j\omega_в)+q(I_{20},A_в)R(j\omega_в)\right|^2}, \qquad (5)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arg\left[Q(j\omega_B)+R(j\omega_B)q(I_{20},A_B)\right] + \arg\left[R(j\omega_B)\right].$$

Выражения (5) определены с учетом

$$F[\gamma]\cos\omega_в t = F[\gamma]\sin\left(\omega_в t+\frac{\pi}{2}\right) = \frac{F[\gamma]}{A_B}\left[\cos\varphi\left(\varphi-\frac{\pi}{2}\right)-\frac{\sin\left(\varphi-\frac{\pi}{2}\right)}{\omega_в}t\right]I_{2*}.$$

В результате решения (5) можно определить зависимость $F^0(I_{20}, A_в)$ от F[γ], т. е. $F_1^0\left(I_{20}, F[\gamma]\right)$, которая в дальнейшем используется для определения автоколебательного режима и решения уравнения для постоянных составляющих. Для этого $F_1^0\left(I_{20}, F[\gamma]\right)$ представим в виде

$$F_1^0\left(I_{20},F[\gamma]\right) = \Phi^0\left(I_{20}^0, F^0[\gamma]\right) + \mu_1 I_{21} + \mu_2 A_1, \qquad (6)$$

где $I_{20}^0, F^0[\gamma]$ – постоянные составляющие; A_1 – амплитуда первой гармоники вынужденных автоколебаний; $\mu_1 = \left.\frac{\partial F_1^0}{\partial I_{20}}\right|_{I_{20}^0,\,F^0[\gamma]}$, $\mu_2 = \left.\frac{\partial F_1^0}{\partial F[\gamma]}\right|_{I_{20}^0,\,F^0[\gamma]}$.

Нелинейность F[γ] можно представить через коэффициенты гармонической линеаризации относительно автоколебаний в системе:

$$F[\gamma] = \Phi_1^0\left(A_\gamma,\gamma^0\right) + q_\gamma\left(A_\gamma,\gamma^0\right)\gamma_1. \qquad (7)$$

В (7) предполагается, что решение задачи определения автоколебательного режима в системе ищется в виде

$$\gamma = \gamma^0 + \gamma_1 = \gamma^0 + A_\gamma \sin\omega t.$$

Тогда

$$F^0[\gamma] = \Phi_1^0\left(A_\gamma,\gamma^0\right), \quad A_1 = q_\gamma\left(A_\gamma,\gamma^0\right)\gamma_1,$$

где параметры автоколебательного режима определяются формулами

$$\Phi_1^0\left(A_\gamma,\gamma^0\right) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{2E}{\pi}\sin\left(\pi\left(\gamma^0+A_\gamma\sin\psi\right)\right)d\psi,$$

$$q_\gamma\left(A_\gamma,\gamma^0\right) = \frac{1}{\pi A_\gamma}\int_0^{2\pi}\frac{2E}{\pi}\sin\left(\pi\left(\gamma^0+A_\gamma\sin\psi\right)\right)\sin\psi\, d\psi$$

Проведя интегрирование в (8), получим

$$\Phi_1^0\left(A_\gamma,\gamma^0\right) = \frac{2E\sin\pi\gamma^0}{\pi}J_0\left(\pi A_\gamma\right),$$

$$q_\gamma\left(A_\gamma,\gamma^0\right) = \frac{4E\sin\pi\gamma^0}{\pi A_\gamma}J_1\left(\pi A_\gamma\right),$$

где $J_0\left(\pi A_\gamma\right)$, $J_1\left(\pi A_\gamma\right)$ – функции Бесселя первого рода соответственно нулевого и первого порядка.

С учетом (6) и (7) уравнение для определения параметров автоколебательного режима примет вид

$$N(p) + \mu_2 q_\gamma\left(A_\gamma,\gamma^0\right) = 0, \qquad (9)$$

где

$$N(p) = E + kp\left[1+Y\left(\mu_1+r\right)\right] + k\left[LY+C\left(\mu_1+r\right)\right]p^2 + kLCp^3.$$

Уравнение для постоянных составляющих:

$$E\gamma^0 - U_{оп}\left(1+rY\right) - \Phi^0\left[I_2^0, \Phi_1^0\left(A_\gamma,\gamma^0\right)\right] = 0. \qquad (10)$$

Из (9) определяются параметры автоколебательного режима:

$$\omega_K^2 = \frac{1+Y\left(\mu_1+r\right)}{LC},$$

$$q_\gamma\left(A_\gamma,\gamma^0\right) = \frac{-E\cdot k\left[LY+C\left(\mu_1+r\right)\right]\omega_K^2}{\mu_2}. \qquad (11)$$

Следует отметить, что вместо $F_1^0\left(I_{20},F[\gamma]\right)$, решая (5) и (10) совместно, можно определить нелинейную зависимость $F_2^0\left(I_{20},\gamma\right)$. Тогда, применив к ней разложение в ряд Тейлора и ограничившись первыми членами, можно найти

$$F_2^0\left(I_{20},\gamma\right) = \Phi_2^0\left(I_2^0,\gamma^0\right) + \eta_1 I_{21} + \eta_2\gamma_1, \qquad (12)$$

где $\eta_1 = \left.\frac{\partial F_2^0}{\partial I_{20}}\right|_{I_2^0,\gamma^0}$, $\eta_2 = \left.\frac{\partial F_2^0}{\partial\gamma}\right|_{I_2^0,\gamma^0}$.

В этом случае уравнения, аналогичные (10) и (11), примут вид

$$E\gamma^0 - U_{оп}\left(1+rY\right) - \Phi_2^0\left(I_2^0,\gamma^0\right) = 0, \qquad (13)$$

$$\omega_K^2 = \frac{1+Y\left(\eta_1+r\right)}{LC}, \qquad (14)$$

$$\eta_2 = E - k\left[LY+C\left(\eta_1+r\right)\right]\omega_K^2.$$

Преобразованием (12) проведена обычая линеаризация нелинейности $F[\gamma]$. Это можно делать только при значении γ, близком к нулю или единице. Провести же аналитически гармоническую линеаризацию $F_1^0\left(I_{20},\gamma\right)$ затруднительно. Кроме того, как показывают исследования, характеристика $F_1^0\left(I_{20},F[\gamma]\right)$ в широком диапазоне изменения I_{20} и $F[\gamma]$ близка к линейной. Так что погрешность от преобразования (6) гораздо меньше, чем (12). Но при малых и больших значениях γ можно пользоваться уравнениями (12)–(14).

Нахождение граничных значений параметров фильтра, определяющих области устойчивости, производилось по уравнениям (11). Зависимости относительного значения постоянной времени выходного фильтра $\sqrt{LC}/T$ приведены на рис. 5 и 6, где T – период частоты преобразования, от относительного изменения напряжения на источнике $U_1/U_{1\text{ном}}$, где $U_{1\text{ном}} = 1{,}5 \cdot U_{1\text{опт}}$. Линии 1, отражающие границы устойчивости для режима непрерывных токов дросселя, определялись по линеаризованной системе уравнений (1), линии 2 по (11). Линии 3 отражают значения относительной постоянной времени фильтра, обеспечивающего заданный коэффициент пульсации.

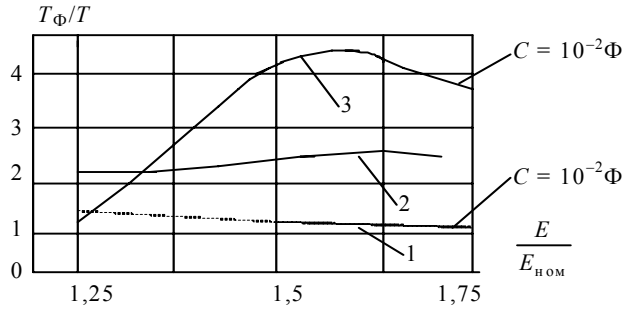


Рис. 5

Таким образом, графики показывают, что режим прерывистых токов дросселя фильтра расширяет область устойчивости. С возрастанием емкости выходного конденсатора и уменьшением сопротивления нагрузки увеличивается граничное значение постоянной времени фильтра. Однако даже при достаточно большом значении C и номинальной нагрузке затруднительно обеспечить низкий уровень пульсации выходного напряжения и одновременно добиться устойчивости стабилизатора при астатическом управлении.

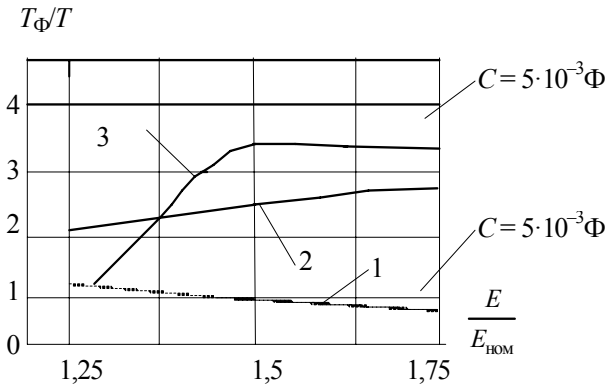


Рис. 6

Библиографические ссылки

1. Ловчиков А. Н. Анализ и синтез широтно-импульсных систем // Информатика и системы управления : межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. А. Н. Ловчиков, Б. П. Соустин / Краснояр. гос. техн ун-т. Красноярск, 1997. С. 140–147.

2. Математические основы теории автоматического регулирования : в 2 т. Т. 2. / под. ред. Б. К. Чемоданова. М. : Высш. шк., 1977.

3. Попов Е. П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М. : Наука,1988.

A. N. Lovchikov

STABILITY OF PULSE-WIDTH MODULATION STABILIZER IN MODE OF INTERMITTENT CURRENTS

In its article, on the basis of the offered by the author new approach to analysis and synthesis of pulse-duration systems, the dynamics of pulse-width modulation stabilizer of tension in the most complex run of pulsating currents is investigated.

Keywords: pulse-width modulation stabilizer, condition of intermittent currents.

© Ловчиков А. Н., 2012

УДК 004.9:629.78

А. В. Лопатин, Ю. В. Захаров, К. Г. Охоткин, В. В. Вильянен, А. В. Пашковский

ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМИРУЕМОГО ОБОДА БОЛЬШОЙ КОСМИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С ГИБКИМИ КОМПОЗИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ*

Рассмотрена новая геометрически нелинейная модель трансформируемого обода большой космической антенны, построенного с использованием гибких композитных полос как основных элементов. Найденное решение позволит определять оптимальную форму изогнутой криволинейной полосы и оценивать запасенную энергию.

Ключевые слова: трансформируемая космическая антенна, гибкий изогнутый композитный элемент, геометрическая нелинейность.

В настоящее время активно развиваются космические телекоммуникационные услуги широкополосного доступа. В связи с этим актуальна тенденция роста диаметра космических антенн, которые используются для передачи больших объемов данных. У космических антенн есть большой диаметр в операционной конфигурации. Во время вывода на орбиту внутренний объем под обтекателем ракеты-носителя ограничен. Поэтому имеются существенные ограничения, накладываемые на любые большие бортовые антенны космических аппаратов: антенна должна быть сжато упакована, чтобы поместить ее под обтекатель ракеты-носителя, и должна быть развернута на орбите с высокой точностью. Несколько структурных моделей трансформируемых космических антенн могут быть найдены в литературе [1–5]. Одна из таких моделей – антенна, состоящая из обода и приложенной к нему тонкой радиоотражающей мембраны. Концепция такой космической антенны была представлена ранее в работе [5]. Развертывание обода на орбите может быть выполнено несколькими способами. Самым перспективным является трансформация, когда развертывание обода антенны производится запасенной потенциальной энергией деформации его упругих гибких элементов. Применение композиционных материалов в дизайне такой оправы является самым эффективным.

Рассмотрена новая модель трансформируемого составного обода большой космической антенны с использованием гибких элементов. При моделировании использована геометрически нелинейная модель, представленная в работе авторов [6]. При этом использованы статические уравнения, описывающие геометрически нелинейную деформацию элемента – гибкой полосы – во время разворачивания обода антенны. В целях удобства проектирования была аналитически решена обратная задача. В этой задаче были исследованы и найдены усилия, смещения и потенциальная энергия, возникающие в гибкой полосе при ее деформации от прямолинейного состояния до сильно криволинейного. Полученное аналитическое решение позволит определять оптимальную форму изогнутой полосы и оценивать зарезервированную энергию. Эти результаты позволяют подойти к проектированию основных упругих элементов обода антенны.

Модель трансформируемого обода антенны. Основной элемент трансформируемого обода антенны – криволинейная композитная полоса, которая в ненагруженном состоянии имеет форму, показанную на рис. 1.

Рис. 1. Изогнутая полоса

Такую изогнутую полосу можно получить формовкой на шаблоне, повторяя ее контур. Две изогнутых полосы формируют основной упругий элемент обода (рис. 2). Развернутый обод антенны состоит из двух кругов изогнутых углепластиковых полос и труб, соединяющих их (рис. 3).

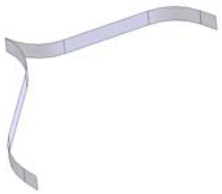


Рис. 2. Гибкий упругий элемент

Через полосы на внутреннем круге продеты гибкие кабели. Кабели натягивают, прежде чем поместить антенну под обтекатель ракеты-носителя. Точки контакта кривых полос сдвигаются по радиусу к центру антенны (рис. 4).

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.B37.21.0405 «Моделирование композитных элементов крупногабаритных трансформируемых механических систем космических аппаратов связи и телекоммуникаций».

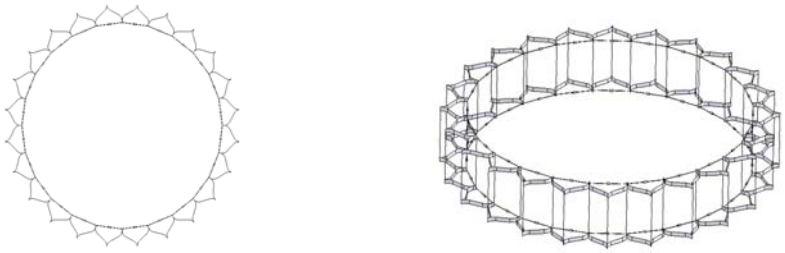


Рис. 3. Развернутый обод антенны

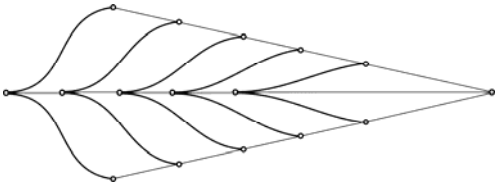


Рис. 4. Деформирование полос при развертывании обода антенны

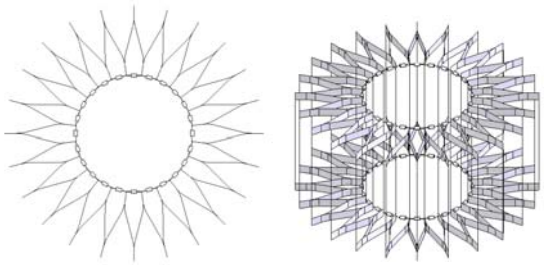


Рис. 5. Свернутый обод антенны

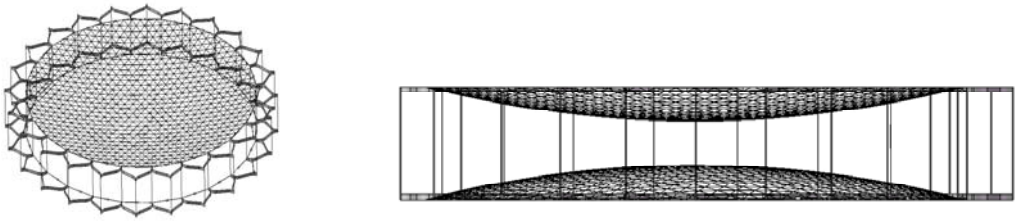


Рис. 6. Развернутая антенна с вантовой системой

В свернутой конфигурации (рис. 5) кривые полосы выправляются и резервируют энергию вследствие структурной деформации.

Развертывание антенны на орбите (рис. 6) осуществляется освобождением зарезервированной энергии. Кабель размотан, и происходит упругое движение элементов по радиусу от центра антенны до внешнего круга (см. рис. 4).

Начальными параметрами для проектирования являются внутренний диаметр обода в развернутом состоянии и внешний диаметр обода в свернутой конфигурации. Первый размер определяет диаметр апертуры, второй – диаметр пространства для хранения свернутой антенны под обтекателем ракеты-носителя.

Геометрически нелинейная модель гибкой полосы – элемента обода антенны. Рассмотрим задачу определения формы изогнутой полосы. Форма может быть найдена из решения обратной задачи, когда изначально прямоугольная полоса изгибается к необходимому положению (рис. 7).

Упругие параметры прямоугольной полосы:

$$B = E_x hb,\ D = E_x I = E_x b\frac{h^3}{12},$$

где h – толщина полосы; b – ширина полосы; E_x – упругий модуль материала полосы в направлении оси x.

В нашей модели прямоугольную полосу будем рассматривать как гибкий упругий нерастяжимый стержень, консольно закрепленный. Концы стержня могут свободно смещаться вдоль заданных направляющих. Длина стержня L.

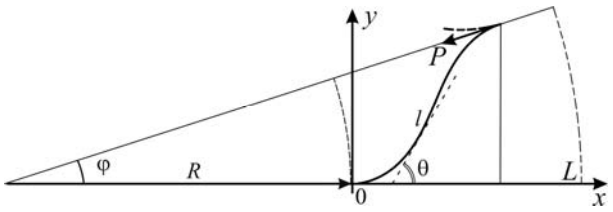


Рис. 7. Изогнутая полоса. Система координат

Деформация стержня имеет место в секторе с центральным углом φ. Величина угла определяется как $\varphi = \pi/n$, где n – число упругих элементов, состоящих из двух изогнутых полос (см. рис. 1); R – заданный внутренний радиус развернутого обода антенны. Рассмотрим далее изгиб стержня для заданных величин

R, L и φ (см. рис. 7). Найдем форму изогнутого стержня, отклонение конца стержня и запасенную энергию.

Выберем декартову систему координат так, что изначально прямой стержень расположен вдоль оси x, защемлен на левом конце в начале координат. На правом конце рассмотрим два варианта его соединения со вторым стержнем (полосой): защемление и шарнирное соединение.

Стержень подвергается деформации изгиба под действием неизвестной равнодействующей силы реакции со стороны второго стержня P, которая сосредоточена на правом конце стержня и из соображений симметрии задачи имеет постоянное направление под углом φ к центру обода. P_x и P_y – декартовы компоненты силы P.

Обозначим через l – криволинейную координату – длину вдоль изогнутой линии стержня, θ(l) – угол наклона касательной в текущей точке к линии стержня; тогда $d\theta/dl$ – кривизна кривой линии стержня. Зная зависимость θ(l), можно определить форму изогнутого стержня в параметрическом задании, с параметром криволинейной длины l, выражениями

$$x(l)=\int_0^l \cos\theta(l)dl, \quad y(l)=\int_0^l \sin\theta(l)dl .$$

Приведем далее систему нелинейных уравнений равновесия стержня, следуя работе [6]. Поскольку отсутствует внешнее давление (распределенная нагрузка), то уравнение равновесия элемента стержня имеет следующий вид:

$$\frac{d\vec{F}}{dl}=0\ ,\ \vec{F}=\text{const}\ , \tag{1}$$

где F – упругая сила. Пусть $F_x = -P\sin\varphi$, $F_y = P\cos\varphi$ – ее компоненты в декартовой системе координат, F_n, F_τ – компоненты в касательной системе координат.

Уравнение моментов:

$$\frac{dM}{dl}=-F_n=F_x\sin\theta-F_y\cos\theta\ , \tag{2}$$

где M – изгибающий момент.

Закон Гука:

$$M=D\frac{d\theta}{dl}\ . \tag{3}$$

Из уравнений (1)–(3) имеем одно нелинейное уравнение для определения зависимости θ(l):

$$D\frac{d^2\theta}{dl^2}+P\sin\varphi\sin\theta+P\cos\varphi\cos\theta=0\ ,$$

или

$$\frac{d^2\theta}{dl^2}+\frac{P}{D}\sin(\theta+\varphi)=0\ .$$

Преобразуем это уравнение равновесия стержня в уравнение типа нелинейного маятника. Введем безразмерную длину $t = l/L$, изменяющуюся от 0 до 1, и сделаем замену γ = θ + φ. Введем обозначение для неизвестного параметра $q^2 = PL^2/D$. Тогда получим уравнение для угла γ типа уравнения нелинейного маятника:

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2}+q^2\sin\gamma=0. \tag{4}$$

Решение этого уравнения хорошо известно:

$$\begin{gathered}\gamma(t)=2\arcsin[k\ \mathrm{sn}(qt+F_1,k)],\\ d\gamma(t)/dt=2kq\ \mathrm{cn}(qt+F_1,k),\\ \theta(t)=-\varphi+2\arcsin[k\ \mathrm{sn}(qt+F_1,k)],\end{gathered} \tag{5}$$

где функции sn и cn – эллиптические синус и косинус Якоби. Модуль эллиптических функций k и параметр F_1 играют роль констант интегрирования, и их связь с параметром q и углом φ определяется далее из граничных условий для каждого конкретного случая изгиба стержня. Введем обозначение для аргумента эллиптических функций

$$u=qt+F_1.$$

Используя выражение (5), получим

$$\cos\gamma(t)=1-2k^2\ \mathrm{sn}^2\ u,\ \sin\gamma(t)=2k\ \mathrm{sn}\ u\ \mathrm{dn}\ u.$$

Интегрируя геометрические соотношения dx/dl = $= \cos\theta$, $dy/dl = \sin\theta$, получим координаты произвольной точки стержня в параметрическом виде, определяющие изогнутую форму стержня:

$$\begin{gathered}\frac{x}{L}=\int_0^t\cos\theta dt=\int_0^t\cos(\gamma-\varphi)\,dt=\\ =\cos\varphi\int_0^t\cos\gamma dt+\sin\varphi\int_0^t\sin\gamma dt=X_0\cos\varphi+Y_0\sin\varphi,\\ \frac{y}{L}=\int_0^t\sin\theta dt=\int_0^t\sin(\gamma-\varphi)\,dt=\\ =\cos\phi\int_0^t\sin\gamma dt-\sin\varphi\int_0^t\cos\gamma dt=Y_0\cos\varphi-X_0\sin\varphi.\end{gathered} \tag{6}$$

Использованные здесь обозначения X_0 и Y_0, полученные с помощью (4), имеют вид

$$\begin{gathered}X_0=\int_0^t\cos\gamma dt=\int_0^t\left(1-2k^2\ \mathrm{sn}^2\ u\right)dt=\\ =-t+\frac{2}{q}\left[E(\mathrm{am}\,u)-E(\mathrm{am}\,F_1)\right],\\ Y_0=\int_0^t\sin\gamma dt=\int_0^t 2k\ \mathrm{sn}\,u\ \mathrm{dn}\,u dt=\frac{2k}{q}\left[\mathrm{cn}\,F_1-\mathrm{cn}\,u\right],\end{gathered} \tag{7}$$

где $E(\mathrm{am}\,u)$ – неполный эллиптический интеграл второго рода от эллиптической амплитуды Якоби. Выражения (6) и (7) задают форму профиля изогнутого стержня в параметрическом виде с параметром t – приведенной криволинейной длиной.

Определим теперь запасенную потенциальную энергию изогнутого стержня:

$$U=\frac{1}{2D}\int_0^L M^2dl=\frac{1}{2}\frac{D}{L}\int_0^1\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 dt\ .$$

Введем безразмерный параметр полной потенциальной энергии изогнутого стержня f:

$$U = \frac{3D}{L} f \text{, т. е. } f = \frac{1}{6}\int_0^1 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 dt . \quad (8)$$

Таким образом, зная решение $\theta(t)$, можно точно вычислить запасенную энергию.

Рассмотрим случай защемления в соединении двух стержней в элементе обода антенны. Определим связь между параметрами k, F_1, q и φ из граничных условий:

1) на левом конце стержня $\theta(0) = 0$;

2) на правом конце стержня $\theta(1) = \pi/n = \varphi$.

Применим первое условие, используя решение (4) уравнения (5). Получим $\mathrm{sn}\, F_1 = \sin(\varphi_0/2)/k$, следовательно

$$F_1 = F\left[\arcsin\left(\frac{\sin\varphi/2}{k}\right), k\right].$$

Соответственно, модуль k изменяется в пределах $\sin(\varphi_0/2) < k < 1$.

Применив второе условие, аналогично получим, что

$$\mathrm{sn}(q + F_1) = \sin(\varphi)/2. \quad (9)$$

Из-за периодичности эллиптического синуса sn уравнение (9) имеет бесконечное количество корней, каждое из них будет определять отдельную ветвь (моду) решений с разным числом перегибов стержня. Исходя из разумного предположения, что изогнутый стержень в реальной задаче будет иметь одну точку перегиба, выберем второй корень уравнения (9), который даст соотношение

$$q = 2K(k) - F_2 - F_1,\ F_2 = F\left(\arcsin\left(\frac{\sin\varphi}{k}\right), k\right), \quad (10)$$

где $K(k)$ и $F(\varphi, k)$ – соответственно полный и неполный эллиптические интегралы первого рода.

Поскольку правый конец стержня смещается по линии под углом φ, то исходя из геометрии задачи (см. рис. 7), получим дополнительное соотношение

$$\frac{y_1}{(r + x_1)} = \mathrm{tg}\varphi , \quad (11)$$

где y_1 и x_1 – координаты правого конца изогнутого стержня, а y_1 – прогиб стержня. Используя выражения (6) и (7), найдем координаты правого конца стержня:

$$x_1 = \sin\varphi Y_1 + \cos\varphi X_1,\ y_1 = \sin\varphi X_1 - \cos\varphi Y_1,$$

$$X_1 = -1 + \frac{2}{q}\left(2E\left(k\right) - E_2 - E_1\right),$$

$$Y_1 = \frac{2k}{q}\left(\sqrt{1 - \frac{\sin^2\varphi/2}{k^2}} + \sqrt{1 - \frac{\sin^2\left(\varphi\right)}{k^2}}\right), \quad (12)$$

$$E_1 = E\left(\arcsin\left(\frac{\sin\varphi/2}{k}\right), k\right),\ E_2 = E\left(\arcsin\left(\frac{\sin\varphi}{k}\right), k\right),$$

где $E(k)$ и $E(\varphi, k)$ – соответственно полный и неполный эллиптические интегралы второго рода. Далее рассмотрим число упругих элементов n = 18, 24, 32, 48. Внутренний радиус обода антенны зададим r = 2, 3, 4, 5, …, где введен безразмерный радиус $r = R/L$.

Система алгебраических уравнений (10)–(12) позволяет найти неизвестные параметры решения q и k. Последовательно задавая известные параметры $\varphi = \pi/n$, n и r, подставляя выражение (10) для параметра $q(k)$ в (12), а выражения $x_1(k)$ и $y_1(k)$ из (12) в геометрическое соотношение (11), получим одно нелинейное алгебраическое уравнение для определения зависимости модуля k от n и r. Это уравнение можно легко решить любым численным методом. Определив модуль k, можно вычислить параметр q, используя выражение (10).

Далее, используя параметрические выражения (6), (7) с найденными значениями параметров, можно построить изогнутые формы стержня. Координаты точек стержня в параметрическом задании $x(t)$ и $y(t)$ определяются выражениями (6) и (7) подстановкой значений q и F_1 из (10). Таким образом, каждому значению параметров n и r будет соответствовать своя форма изгиба стержня, определяемая одним вычисляемым параметром – модулем k, который находится численным решением алгебраического уравнения (10). Минимальному значению $k = \sin\varphi/2$ соответствует минимальное значение силы P и неизогнутая форма стержня. Когда сила $P \to \infty$ и модуль $k \to 1$, мы имеем максимально возможную сильно искривленную форму стержня.

Значение прогиба правого конца изогнутого стержня $y_1(k)$ можно вычислить с помощью выражений (12), зная параметры решения q и k. Ранее в работе [5] был введен безразмерный параметр z:

$$z = \frac{y_1}{(1 + r)\,\mathrm{tg}\varphi} .$$

В работе [5] были найдены значения этого параметра, а также параметра энергии f по линейной теории. Найденные в [5] значения являются оценкой сверху.

Сделав предельный переход $k \to 1$ в уравнениях (10)–(12), получим ограничение на область значений параметров n и r:

$$\mathrm{tg}\frac{\pi}{n} \le \frac{1}{r} , \quad (13)$$

или приближенно $\pi r \le n$. Это соотношение важно при проектировании обода антенны для выбора разрешенных значений параметров n и r.

Последовательные формы изогнутого гибкого элемента обода при r = 2, 3, 4 для случая n = 18, построенные по аналитическим выражениям (6) и (7), приведены на рис. 8, а для случая n = 32 – на рис. 9.

Вычисленные значения модуля k путем решения алгебраической системы (10)–(12) приведены в табл. 1, вычисленные по геометрически нелинейной модели с использованием выражения (12) значения безразмерного параметра прогиба z, приведены в табл. 2, значения безразмерного параметра запасенной энергии f одного стержня, вычисленные с помощью выражения (8) для различных n и r, – в табл. 3. В этих таблицах прочерки поставлены там, где наступает ограничение (13).

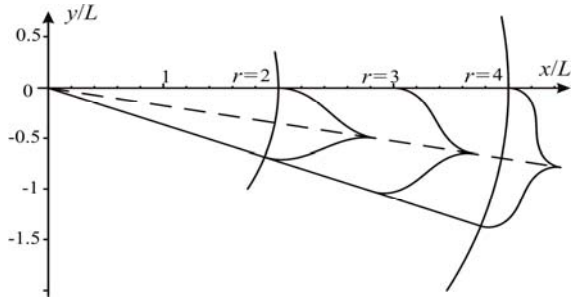


Рис. 8. Последовательные формы изогнутого гибкого элемента обода с защемлением при $r = 2, 3, 4$ для случая $n = 18$

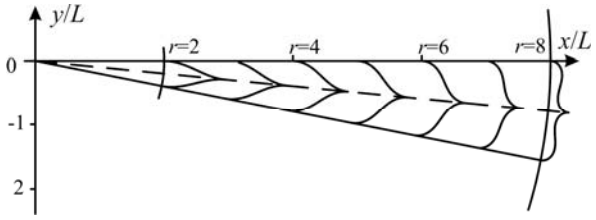


Рис. 9. Последовательные формы изогнутого гибкого элемента обода с защемлением при $r = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ для случая $n = 32$

Полная сохраненная энергия обода антенны равна сумме энергий деформации всех кривых полос: $f_{\text{полн}} = 2nf$. Большую запасенную энергию обода антенны обеспечивает разбиение на возможно большее число элементов.

Таким образом, развита новая модель трансформируемого композитного обода большой космической антенны. В свернутой конфигурации изогнутые элементы обода выправляются и резервируют энергию вследствие структурной деформации. Открытие антенны на орбите осуществляется за счет выпуска зарезервированной энергии. Выполненный анализ с точным учетом геометрической нелинейности позволяет определять форму упругих полос, которые формируют обод антенны на случай любых сильных изгибов элементов.

Полученные аналитические решения позволяют оценивать форму и величину прогибов элементов, запасенную энергию кривой полосы, и, впоследствии, вычислять полную сохраненную энергию, требуемую для разворачивания антенны. Такой анализ необходим на ранней стадии дизайна обода антенны. Все аналитические решения легко реализуются в пакете Maple.

Таблица 1

Значения модуля $k(n, r)$

n	r								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	0,460	0,598	0,755	–	–	–	–	–	–
24	0,349	0,451	0,559	0,678	0,841	–	–	–	–
32	0,263	0,340	0,418	0,500	0,587	0,686	0,821	–	–
48	0,176	0,227	0,278	0,331	0,384	0,439	0,497	0,558	0,623

Таблица 2

Значения безразмерного параметра прогиба $z(n, r)$

n	r								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	0,946	0,923	0,890	–	–	–	–	–	–
24	0,970	0,958	0,945	0,927	0,892	–	–	–	–
32	0,983	0,977	0,970	0,963	0,954	0,942	0,920	–	–
48	0,993	0,990	0,987	0,984	0,981	0,978	0,974	0,970	0,965

Таблица 3

Значения параметра запасенной энергии $f(n, r)$

n	r								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	0,412	0,889	1,822	–	–	–	–	–	–
24	0,226	0,462	0,830	1,432	2,861	–	–	–	–
32	0,125	0,250	0,431	0,682	1,039	1,588	2,768	–	–
48	0,055	0,108	0,182	0,278	0,400	0,553	0,745	0,991	1,316

Библиографические ссылки

1. Large Deployable Reflector (LDR) / K. Shintate, K. Terada, M. Usui et al. // J. of the National Institute of Information and Communications Technology. 2003. Vol. 50, № 3/4. P. 33–39.

2. Thomson M. W. AstroMesh deployable reflectors for KU- and KA-band commercial satellites // Proc. of 20th AIAA Intern. Communication Satellite Systems Conf. and Exhibit. Montreal, Quebec, 2002.

3. Development of the large and high accuracy deployable antenna for the VSOP-2 mission [Electronic resource] / Y. Murata, H. Hirabayashi, M. C. Natori et al. URL: http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/BP.11(01277).pdf (date of visit: 12.12.2012).

4. Tibert G. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications : Ph.D. Thesis [Electronic resource] Stockholm, 2002. URL: http://www2.mech.kth.se/~gunnart/TibertDocThesis.pdf (date of visit: 12.12.2012).

5. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. Design of large space antenna composite rim // Composite Structures. 2006. № 76. P. 99–105.

6. Zakharov Yu. V., Okhotkin K. G. Nonlinear bending of thin elastic rods // J. of Applied Mechanics and Technical Physics. 2002. Vol. 43, № 5. P. 739–744.

A. V. Lopatin, Yu. V. Zakharov, K. G. Okhotkin, V. V Vilyanen, A. V. Pashkovskiy

GEOMETRICALY NONLINEAR MODEL OF AN TRANSFORMED RIM OF A BIG SPACE ANTENNA WITH FLEXIBLE COMPOSITE ELEMENTS

A new geometrical and nonlinear model of a transformable rim of a large space antenna constructed with the use of flexible composite strips, as basic elements, is considered. The decision found will allow to define the optimum form of the bent curvilinear strip and to estimate the stored energy.

Keywords:transformable space antenna, flexible bent composite element, geometrical nonlinearity.

© Лопатин А. В., Захаров Ю. В., Охоткин К. Г., Вильянен В. В., Пашковский А. В., 2012

УДК 517.972.5

И. А. Лопатин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ОРТОТРОПНОЙ ПЛАСТИНЫ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ В УГЛАХ*

Обобщенным методом Галеркина решена задача определения основной частоты колебаний прямоугольной ортотропной пластины, в углах которой отсутствует прогиб.

Ключевые слова: ортотропная пластина, обобщенный метод Галеркина, основная частота колебаний.

Прямоугольные ортотропные пластины, испытывающие динамическое воздействие в составе ракетных и космических конструкций, обладают различными способами крепления к соседним частям этих конструкций. Как правило, закрепление прямоугольной пластины осуществляется по ее краям. Края пластины могут быть жестко защемлены, шарнирно закреплены или оперты на упругие ребра.

Динамическое поведение как изотропных, так и ортотропных пластин с такими способами закрепления краев подробно изучено. Вместе с тем крепление ортотропных пластин, помимо реализуемого на краях, может осуществляться в точках. Определенный практический интерес представляет задача вычисления частот колебаний пластины, закрепленной в четырех углах. Если речь идет о нахождении нескольких частот колебаний такой пластины, то для решения этой задачи наиболее прагматичным будет использование численного метода, например метода конечных элементов. Однако определение основной частоты изгибных колебаний пластины, закрепленной в углах, может быть выполнено без привлечения методов, требующих значительных вычислительных ресурсов.

Необходимо отметить, что основная частота колебаний является удобной оценкой весовой эффективности ортотропной пластины при ее проектировании. Это обусловлено тем, что основная частота колебаний учитывает взаимное влияние изгибной жесткости и погонной массы ортотропной пластины.

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.B37.21.0405 «Моделирование композитных элементов крупногабаритных трансформируемых механических систем космических аппаратов связи и телекоммуникаций».

Рассмотрим прямоугольную ортотропную пластину, отнесенную к системе декартовых координат *xy* (рис. 1). Размеры пластины по осям *x* и *y* обозначим *a* и *b* соответственно. Пластина закреплена в угловых точках таким образом, что в них отсутствует прогиб.

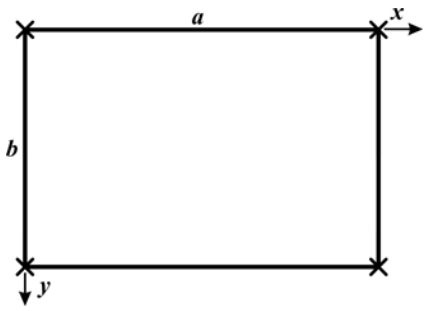


Рис. 1

Получим вариационное уравнение изгибных колебаний пластины. Воспользуемся для этого принципом Гамильтона. Рассмотрим интеграл действия Гамильтона [1]:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} (T - U)dt, \tag{1}$$

где t – время; $t_2 - t_1$ интервал времени, в течение которого происходит движение пластины; T – кинетическая энергия движения пластины; U – потенциальная энергия изгиба пластины.

Кинетическая энергия и потенциальная энергия изгиба ортотропной пластины определяются следующим образом [2]:

$$T = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2 dxdy,$$

$$U = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b \left[D_{11}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 + 2D_{12}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \right. \tag{2}$$

$$\left. + D_{22}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)^2 + 4D_{33}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right)^2 \right] dxdy,$$

где $w = w(x, y, t)$ – прогиб пластины; D_{11}, D_{12}, D_{22}, D_{33} – изгибные жесткости ортотропной пластины.

Рассматривая свободные колебания пластины, представим ее прогиб в следующем виде:

$$w(x, y, t) = w(x, y)\sin \omega t, \tag{3}$$

где ω – круговая частота колебаний; $w(x,y)$ – функция формы пластины при поперечных колебаниях.

Подставляя (3) в (2), получим

$$T = T_{\max} \cos^2 \omega t,$$

$$U = U_{\max} \sin^2 \omega t, \tag{4}$$

где $T_{\max}$ – максимальная кинетическая энергия движения пластины; $U_{\max}$ – максимальная потенциальная энергия изгиба пластины. Величины $T_{\max}$ и $U_{\max}$ определяются следующим образом:

$$T_{\max} = \frac{1}{2}\omega^2 B_p \int_0^a\int_0^b w^2 dxdy,$$

$$U_{\max} = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b \left[D_{11}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 + 2D_{12}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \right. \tag{5}$$

$$\left. + D_{22}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)^2 + 4D_{33}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}\right)^2 \right] dxdy,$$

где B_p – инерциальный параметр.

Пусть интервал времени, в течение которого рассматривается движение пластины, равен периоду колебаний. В этом случае имеет место следующее равенство:

$$t_1 - t_2 = \frac{2\pi}{\omega}. \tag{6}$$

Подставляя (4) в (1) и учитывая соотношение (6), будем иметь

$$S = T_{\max} \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2 \omega t dt - U_{\max} \int_0^{2\pi/\omega} \sin^2 \omega t dt = \tag{7}$$

$$= \frac{\pi}{\omega}\left(T_{\max} - U_{\max}\right).$$

Интегрируя по времени, найдем

$$S = \frac{\pi}{\omega}\left(T_{\max} - U_{\max}\right). \tag{8}$$

В соответствии с принципом Гамильтона в промежутке времени 2π/ω, интеграл действия S для действительного движения ортотропной пластины имеет стационарное значение, т. е.

$$\delta S = 0, \tag{9}$$

где δ – знак вариации.

С учетом равенства (8) из условия (9) будем иметь

$$\delta\left(T_{\max} - U_{\max}\right) = 0. \tag{10}$$

Подставляя (5) в (10) и выполняя варьирование, получим

$$\int_0^a\int_0^b L(x, y)\delta w dxdy + \int_0^b \left[M_x(x, y)\delta\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right]_0^a dy -$$

$$- \int_0^b \left[V_x(x, y)\delta w\right]_0^a dy + \int_0^a \left[M_y(x, y)\delta\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)\right]_0^b dx - \tag{11}$$

$$- \int_0^a \left[V_y(x, y)\delta w\right]_0^b dx + 2\left[\left[M_{xy}(x, y)\delta w\right]_0^b\right]_0^a = 0.$$

Здесь

$$L(x,y)=D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\left(D_{12}+2D_{33}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+$$
$$+D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}-B_\rho\omega^2 w,$$
$$M_x(x,y)=D_{11}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+D_{12}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2},\qquad(12)$$
$$V_x(x,y)=D_{11}\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\left(D_{12}+4D_{33}\right)\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2},$$
$$M_y(x,y)=D_{12}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+D_{22}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2},$$
$$V_y(x,y)=D_{22}\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}+\left(D_{12}+4D_{33}\right)\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y},$$
$$M_{xy}(x,y)=2D_{33}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}.$$

В равенствах (12) функции M_x, M_y соответствуют изгибающим моментам, V_x, V_y соответствуют обобщенным перерезывающим силам, M_{xy} соответствует крутящему моменту.

Уравнение (11) представляет собой основное вариационное уравнение, которому должны удовлетворять собственные формы колебаний $w(x,y)$ ортотропной пластины.

Представим прогиб пластины (рис. 2).

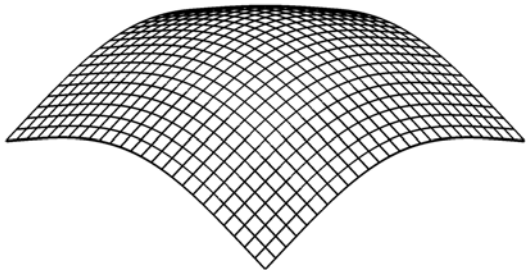


Рис. 2

Выбранная аппроксимация

$$w=A\sin\frac{\pi x}{a}+B\sin\frac{\pi y}{b}+C\sin\frac{\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{b},\qquad(13)$$

где A, B и C – неизвестные числа, не удовлетворяет статическим граничным условиям на свободных краях пластины. Вместе с тем представление прогиба в виде (13) позволяет вполне успешно определить основную частоту колебаний закрепленной в углах ортотропной пластины, если для решения этой задачи использовать обобщенный метод Галеркина. Исходным уравнением для обобщенного метода Галеркина является вариационное уравнение (11). Это уравнение автоматически обеспечивает приближенное выполнение статических граничных условий на свободных краях пластины.

Вариации функции прогиба (13) и ее первых производных определяются следующим образом:

$$\delta w=\sin\frac{\pi x}{a}\delta A+\sin\frac{\pi y}{b}\delta B+\sin\frac{\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{b}\delta C,$$
$$\delta\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)=\frac{\pi}{a}\cos\frac{\pi x}{a}\delta A+\frac{\pi}{a}\cos\frac{\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{b}\delta C,\qquad(14)$$
$$\delta\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)=\frac{\pi}{b}\cos\frac{\pi y}{a}\delta B+\frac{\pi}{b}\sin\frac{\pi x}{a}\cos\frac{\pi y}{b}\delta C.$$

Подставляя (14), (13) в (11), (12) и выполняя интегрирование, получим, учитывая произвольность вариаций δA, δB, δC однородную систему линейных алгебраических уравнений

$$2D_{11}\frac{\pi^4}{a^4}A+16D_{12}\frac{\pi^2}{a^2b^2}B+\frac{4\pi^3}{a^2b^2}\left(D_{11}\frac{b^2}{a^2}+D_{12}\right)C-$$
$$-B_p\omega^2\left(2A+\frac{16}{\pi^2}B+\frac{4}{\pi}C\right)=0,$$
$$16D_{12}\frac{\pi^2}{a^2b^2}A+2D_{22}\frac{\pi^4}{b^4}B+\frac{4\pi^3}{a^2b^2}\left(D_{22}\frac{a^2}{b^2}+D_{12}\right)C-\qquad(15)$$
$$-B_p\omega^2\left(\frac{16}{\pi^2}A+2B+\frac{4}{\pi}C\right)=0,$$
$$\frac{4\pi^3}{a^2b^2}\left(D_{11}\frac{b^2}{a^2}+D_{12}\right)A+\frac{4\pi^3}{a^2b^2}\left(D_{22}\frac{a^2}{b^2}+D_{12}\right)B+$$
$$+\frac{\pi^4}{a^2b^2}\left[D_{11}\frac{b^2}{a^2}+2\left(D_{12}+2D_{33}\right)+D_{22}\frac{a^2}{b^2}\right]C-$$
$$-B_p\omega^2\left(\frac{4}{\pi}A+\frac{4}{\pi}B+C\right)=0.$$

Преобразуем уравнения (15) таким образом, чтобы коэффициенты при неизвестных A, B, C стали безразмерными. Для этого разделим каждое из уравнений (15) на $\sqrt{D_{11}D_{22}}$. В результате преобразований получим

$$2\pi^4\alpha A+16\pi^2\beta_{12}B+4\pi^3\left(\alpha+\beta_{12}\right)C-$$
$$-\eta\left(2A+\frac{16}{\pi^2}B+\frac{4}{\pi}C\right)=0,$$
$$16\pi^2\beta_{12}A+2\pi^4\frac{1}{\alpha}B+4\pi^3\left(\frac{1}{\alpha}+\beta_{12}\right)C-\qquad(16)$$
$$-\eta\left(\frac{16}{\pi^2}A+2B+\frac{4}{\pi}C\right)=0,$$
$$4\pi^3\left(\alpha+\beta_{12}\right)A+4\pi^3\left(\frac{1}{\alpha}+\beta_{12}\right)B+$$
$$+\pi^4\left[\alpha+2\left(\beta_{12}+2\beta_{33}\right)+\frac{1}{\alpha}\right]C-\eta\left(\frac{4}{\pi}A+\frac{4}{\pi}B+C\right)=0.$$

Здесь

$$\alpha=\sqrt{\frac{D_{11}}{D_{12}}}\frac{b^2}{a^2},\quad\beta_{12}=\frac{D_{12}}{\sqrt{D_{11}D_{22}}},\quad\beta_{33}=\frac{D_{33}}{\sqrt{D_{11}D_{22}}}.$$

Величины α, β_{12}, β_{33} – безразмерные геометрические и жесткостные параметры ортотропной пластины.

Величина η в уравнениях (16) определяется равенством

$$\eta = \frac{B_p \omega^2 a^2 b^2}{\sqrt{D_{11} D_{22}}}. \qquad (17)$$

Это безразмерный частотный параметр. Таким образом, задача определения основной частоты изгибных колебаний ортотропной пластины, закрепленной в углах, сведена к нахождению параметра η, при котором однородная система (16) будет иметь решение, отличное от нуля.

Вычисление частотного параметра η может быть выполнено несколькими способами. Представим уравнения (16) в следующем матричном виде:

$$\mathbf{HX} - \eta\mathbf{GX} = \mathbf{0}. \qquad (18)$$

Здесь

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 2\pi^4\alpha & 16\pi^2\beta_{12} & 4\pi^3(\alpha+\beta_{12}) \\ 16\pi^2\beta_{12} & 2\pi^4\dfrac{1}{\alpha} & 4\pi^3\left(\dfrac{1}{\alpha}+\beta_{12}\right) \\ 4\pi^3(\alpha+\beta_{12}) & 4\pi^3\left(\dfrac{1}{\alpha}+\beta_{12}\right) & \pi^4\left[\alpha+2(\beta_{12}+2\beta_{33})+\dfrac{1}{\alpha}\right] \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 2 & \dfrac{16}{\pi^2} & \dfrac{4}{\pi} \\ \dfrac{16}{\pi^2} & 2 & \dfrac{4}{\pi} \\ \dfrac{4}{\pi} & \dfrac{4}{\pi} & 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix}.$$

При традиционном способе величина η определяется как наименьший корень кубического уравнения, которое получено из условия $\det(\mathbf{H} - \eta\mathbf{G}) = 0$. В данной работе параметр η находится как наименьшее собственное число обобщенной задачи на собственные значения (18).

Из анализа коэффициентов (16) следует, что величина частотного параметра η зависит от безразмерных параметров α, β_{12}, β_{33}. Значения этих параметров определяются жесткостными и геометрическими характеристиками ортотропной пластины.

Когда частотный параметр η найден, основная частота колебаний может быть получена из формулы (17), т. е.

$$w = \frac{\xi}{ab}\sqrt{\frac{\sqrt{D_{11}D_{22}}}{B_p}},$$

где $\xi = \sqrt{\eta}$.

В качестве примера определим частотный параметр для изотропной пластины, толщина которой равна h. Упругими характеристиками изотропного материала являются модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν. Плотность материала обозначим как ρ. Изгибные жесткости и инерциальный параметр для изотропной пластины определяются следующим образом:

$$D_{11} = D_{22} = \bar{E}\frac{h^3}{12}, \quad D_{12} = \bar{E}\nu\frac{h^3}{12},$$

$$D_{12} = \bar{E}\frac{1-\nu}{2}\frac{h^3}{12}, \quad B_p = \rho h, \qquad (19)$$

где $\bar{E} = \dfrac{E}{1-\nu^2}$.

С учетом равенств (19) безразмерные параметры α, β_{12}, $\beta33$ примут значения

$$\alpha = \frac{1}{c^2}, \quad \beta_{12} = \nu, \quad \beta_{33} = \frac{1-\nu}{2}, \qquad (20)$$

где $c = a/b$ – отношение сторон пластины.

Частота колебаний изотропной пластины определяется по формуле

$$f = \frac{c\xi}{2\pi a^2}\sqrt{\frac{D}{B_p}}.$$

Из равенств (20) следует, что частотный параметр ξ для изотропной пластины, при заданном коэффициенте Пуассона ν, зависит только от отношения c. Полагая ν = 0,3, исследуем влияние отношения сторон c, изменяющегося от 1 до 2,5, на величину частотного параметра ξ.

Приведем результаты вычисления частотного параметра $c\xi$ для некоторых значений c (см. таблицу). В справочнике [3] можно найти аналогичные результаты, полученные с помощью метода конечных разностей. Из сравнения данных следует, что величины $c\xi$, найденные двумя способами, отличаются не более чем на 1,5 %. Это дает основание заключить, что предложенный в статье подход дает вполне приемлемые значения частотного параметра.

Вычисление частотного параметра

c	$c\xi$
1	7,22
1,5	9,05
1,0	9,10
2,5	9,49

Таким образом, с помощью обобщенного метода Галеркина решена задача определения основной частоты колебаний прямоугольной ортотропной пластины, которая закреплена от прогиба в угловых точках. Для аппроксимации прогиба пластины была использована комбинация тригонометрических функций. Показано, что рассматриваемая задача сводится к определению безразмерного частотного параметра, величина которого равна наименьшему собственному числу соответствующей однородной системы уравнений третьего порядка.

В качестве примера определен частотный коэффициент для изотропной пластины. Выполнено сравнение с результатами, полученными численным методом. Это сравнение позволило сделать вывод о том, что представленные в статье формулы позволяют с высокой точностью и минимальными вычислительными затратами определять основные частоты колебаний пластин, закрепленных углах.

Библиографические ссылки

1. Leissa A.W. Vibration of plates / Acoustical Society of America. Washington, D. C., 1993.

2. Vasiliev V. V. Mechanics of composite structures. Washington, D. C. : Taylor & Francis, 1993.

3. Blevins R. D. Formulas for natural frequency and mode shape. Malabar : Krieger Publishing Company, 1979.

I. A. Lopatin

DETERMINATION OF VIBRATIONS DOMINANT MODE OF AN ORTHOTROPIC PLATE FASTENED TO THE BEDDING ANGLES

The problem of determination of the fundamental frequency of vibration of a rectangular orthotropic plate, fastened to bedding angles, is solved by the generalized Galerkin method.

Keywords: orthotropic plate, generalized Galerkin method, fundamental oscillation frequency.

© Лопатин И. А., 2012

УДК 62.501

А. В. Медведев

Н-МОДЕЛИ ДЛЯ БЕЗЫНЕРЦИОННЫХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Рассматривается проблема моделирования нового класса процессов, имеющих «трубчатую» структуру в пространстве «входных-выходных» переменных. Модели процессов этого класса существенно отличаются от общепринятых параметрических моделей, представляющих собой поверхности в том же пространстве. Специально анализируется вопрос о моделировании многомерных систем при наличии малых объемов обучающих выборок. Для построения обучающихся параметрических моделей «трубчатых» процессов вводится соответствующий непараметрический индикатор. Приводится новый класс обучающихся параметрических моделей и некоторые результаты их численного исследования.

Ключевые слова: идентификация, непараметрические алгоритмы, непараметрическая модель, априорная информация, стохастические процессы, Н-модели.

Идентификация многих стохастических объектов часто сводится к идентификации статических систем с запаздыванием. Обусловлено это тем, что некоторые выходные переменные объекта контролируются через значительно большие интервалы времени, чем входные, и существенно превышают постоянную времени объекта.

Например, ряд переменных измеряется электрическим способом (в этом случае дискретность контроля Δt может быть достаточно мала), а другие переменные контролируются в ходе химического анализа или физико-механических испытаний (в этом случае дискретность контроля ΔT велика, т. е. $\Delta T >> \Delta t$). Тогда исследуемый объект может быть представлен статическим с запаздыванием. Такой процесс целесообразно по соответствующему каналу представить в виде

$$x(t) = f(u(t-\tau), \xi(t)) \qquad (1)$$

где $x(t)$ – выходная переменная объекта; $u(t-\tau)$ – входная переменная; τ – запаздывание; $\xi(t)$ – случайное возмущение, действующее на объект; t – непрерывное время.

Покажем каналы измерения с помехами h^u, h^x и дискретностью измерения $\Delta T >> \Delta t$ (рис. 1).

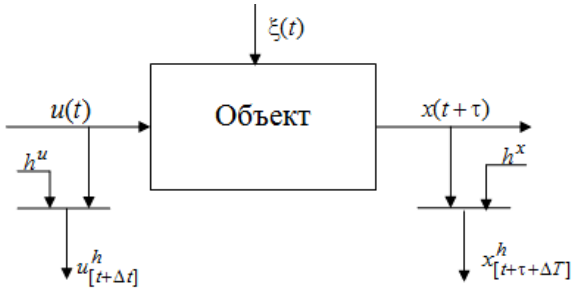


Рис. 1.

В принципе, запаздывание объекта τ может и отсутствовать, тогда мы имеем дело с обычным динамическом объектом, но из-за большого значения ΔT вынуждены его рассматривать как статический с запаздыванием, которое в этом случае обусловлено длительностью времени измерения переменной $x(t)$. Отметим еще раз, что постоянная времени объекта значительно меньше ΔT. Таким образом, выборка наблюдений в дискретном виде может быть представлена следующим образом: $u[t], x[t+n+m]$, где n – дискретность запаздывания, $n = \tau / \Delta t$; m – задержка, вызванная длительностью контроля, $m = \Delta T / \Delta t$, $t = 1, 2, \ldots, s$. Осуществляя сдвиг реализации x_t, $t = \overline{1,s}$, на $(n+m)$ тактов, выборку наблюдений можно переписать следующим образом: $\{u_t, x_t, t = \overline{1,s}\}$ и, без нарушения общности, свести задачу идентификации к идентификации статического объекта с запаздыванием.

Идентификация в «узком» и «широком» смысле. В зависимости от объема априорной информации об исследуемом объекте различают задачи идентификации в «узком» и «широком» смысле. В настоящее время наиболее полно развита теория идентификации в «узком» смысле. Достижения в области идентификации в «широком» смысле значительно более скромные.

Вот что пишет Н. С. Райбман в предисловии к русскому изданию книги П. Эйкхоффа: «Априорная информация об объекте при идентификации в „широком“ смысле отсутствует или очень бедная, поэтому приходится предварительно решать большое число дополнительных задач. К этим задачам относятся выбор структуры системы и задание класса моделей, оценивание степени стационарности и линейности объекта и действующих переменных, оценивание степени и формы влияния входных переменны на выходные, выбор информативных переменных и др. К настоящему времени накоплен большой опыт решения задач идентификации в „узком“ смысле. Методы же решения задач идентификации в „широком“ смысле начали разрабатываться только в последние годы, и здесь результаты значительно скромнее, что в первую очередь можно объяснить чрезвычайной трудностью задачи» [1].

Как было отмечено выше, при моделировании разнообразных дискретно-непрерывных процессов в настоящее время доминирует теория идентификации в «узком» смысле. Ее содержание состоит в том, что на первом этапе, на основании имеющейся априорной информации, определяется параметрический класс оператора объекта A^{α}, например:

$$\tilde{x}_{\alpha}(t) = A^{\alpha}(u(t), \alpha), \qquad (2)$$

где A^{α} – параметрическая структура модели; α – вектор параметров.

На втором этапе осуществляется оценка параметров α на основе имеющейся выборки $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$, s – объем выборки. Успех решения задачи идентификации в этом случае существенно зависит от того, насколько «удачно» определен оператор (2).

Идентификация в «широком» смысле предполагает отсутствие этапа выбора параметрического класса оператора. Часто оказывается значительно проще определить класс операторов на основе сведений качественного характера, например линейности процесса или типа нелинейности, однозначности либо неоднозначности и др. В этом случае задача идентификации состоит в оценивании этого оператора на основе выборки $\{x_i, u_i, i = \overline{1,s}\}$ в форме

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

где $\vec{x}_s = (x_1, x_2, ..., x_s), \vec{u}_s = (u_1, u_2, ..., u_s)$ – временные векторы. Оценка оператора A_s может быть осуществлена средствами непараметрической статистики. Примечательным здесь является то, что при этом исключается этап выбора параметрической структуры. Тем самым можно утверждать, что идентификация в этом случае, а это вариант идентификации в «широком» смысле, является более адекватной реальным задачам.

Идентификация статической системы. Пусть $u = (u_1, \ldots, u_k) \in \Omega(u) \subset R^k$, $x \in \Omega(x) \subset R^1$. Вообще говоря, каждая компонента вектора $u_i \in [a_i; b_i]$, $i = \overline{1,k}$, а $x \in [c; d]$. При исследовании реальных процессов значения коэффициентов $\{a_i, b_i, c, d\}$, $i = \overline{1,k}$ всегда известны. В технологических процессах значения этих коэффициентов регламентируются технологическим регламентом (картой). В дальнейшем, без нарушения общности, эти интервалы примем единичными, тогда $\Omega(u)$ – единичный гиперкуб, $\Omega_k(u) = [0;1]$, т. е. $u \in [0;1]$, $\Omega_{k+1}(u, x) = [0;1]$, $(u, x) \in \Omega_{k+1}$.

Задачу идентификации часто сводят к параметрической, состоящей из двух основных этапов. Первый этап – выбор (определение) параметрической модели (1) в виде $\hat{x} = \hat{f}(u, \alpha)$, где α – вектор параметров. Второй этап – последующая оценка параметров α на основании поступающих элементов выборки $(u_1, x_1), (u_2, x_2), \ldots, (u_s, x_s)$, т. е. получение оценки α_s. Адаптивная модель в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{x}_s(u) = \hat{f}(u, \alpha_s). \qquad (3)$$

Если в качестве функции $\hat{f}(u, \alpha_s)$ принять ряд

$$\hat{x}(u) = \hat{f}(u, \alpha) = \sum_{j=1}^{N} \alpha_j \varphi_j(u), \qquad (4)$$

где $\varphi_j(u)$, $j = \overline{1,N}$ – система линейно независимых функций векторного аргумента $u = (u_1, \ldots, u_k) \in \Omega(u)$, то, следуя методу стохастических аппроксимаций [2],

$$\alpha_s^l = \alpha_{s-1}^l + \gamma_s^l (x_s - \sum_{j=1}^{N} \alpha_{s-1}^j \varphi_l(u_s))\varphi_l(u_s), l = 1, \ldots, N,$$

где γ_s^j, $j = \overline{1, N}$ – коэффициенты Роббинса–Монро.

Такова общая схема решения задач параметрической идентификации. Отметим только, что наиболее «слабым» местом здесь является выбор параметрической структуры модели. Если на первом этапе допущена достаточно грубая ошибка, то полученная модель вряд ли будет удовлетворительной. Эта проблема достаточно подробно обсуждалась в [3]. Там же предложен новый класс К-моделей, учитывающий в комплексе знание фундаментальных законов, другую априорную информацию об объекте, в том числе разнотипную. Обратим внимание на то, что модели класса (3) представляют собой гиперповерхности в пространстве «входных-выходных» переменных объекта, т. е. $(u, x) \in \Omega(u, x) \subset R^{k+1}$.

Проанализируем два важных обстоятельства, возникающих при моделировании реальных процессов. Первое из них состоит в том, что объем выборки s, $\{x_i, u_i, i = \overline{1, s}\}$ катастрофически мал по отношению к размерности вектора $u = (u_1, \ldots, u_k) \in \Omega(u)$, как того «требует» математическая статистика. Например, в практических задачах часто возникает ситуация, когда $k = 20...30$, а $s = 900...1\,000$. Иными словами, в этом случае нельзя получить удовлетворительного решения задачи идентификации. Второе обстоятельство состоит в том, что если построена модель типа (3), по имеющимся данным, то при $u \in \Omega(u) \subset R^k$ можно получить оценку $x_s \notin \Omega(x)$, т. е. вне технологического регламента и даже физически не реализуемые значения $x(u)$. Оба эти факта могут быть объяснены исходя из следующих соображений.

Итак, исследуемый процесс, без нарушения общности, протекает в единичном кубе $\Omega(u, x) = \Omega(u_1, u_2, x) \subset R^3$. Если опустить влияние случайных возмущений $\xi(t)$ и погрешностей измерений u_1, u_2, x, т. е. помех h^u, h^x и ξ (см. рис. 1) из соображений простоты иллюстрации, то можно сказать, что процесс протекает по поверхности $\Omega^H(u, x) \subset \Omega(u, x)$, как это следует из модели класса (3), представляющей собой поверхность $\Omega(u, x)$. Реальный же процесс проходит по линии J (рис. 2, *слева*), лежащей на поверхности $S(u, x) \subset \Omega(u, x)$, т. е. $J \in S(u, x)$. Здесь точка $C \notin S(u, x)$, $B \in S(u, x)$, но $B \notin J$, и точка $A \in J \subset S(u, x) \subset \Omega(u, x)$. Случай, учитывающий влияние помех h и ξ, представлен на рис. 2, *справа*. Важно заметить, что априори не известно, имеет ли исследуемый процесс «трубчатую» структуру. На этот факт было обращено внимание в [4]. Для того чтобы установить это, необходимо, как это обычно делается, построить модель класса (3) или (4) и проанализировать поведение оценок $\hat{x}(u_j)$ при произвольных значениях компонент вектора $u_j = (u_i^j, \ldots, u_k^j) \in \Omega(u)$.

Если исследуемый процесс имеет «трубчатую» структуру, то модели (3) и (4) необходимо подкорректировать следующим образом:

$$\hat{x}_s(u) = \hat{f}(u, \alpha_s) I_s(u) \quad (5)$$

либо

$$\hat{x}_s(u) = I_s(u) \sum_{j=1}^{N} \alpha_j \varphi_j(u), \quad (6)$$

где индикатор $I_s(u)$ имеет вид

$$I_s(u) = \begin{cases} 1, & \text{если } u \in \Omega^H(u); \\ 0, & \text{если } u \overline{\in} \Omega^H(u). \end{cases} \quad (7)$$

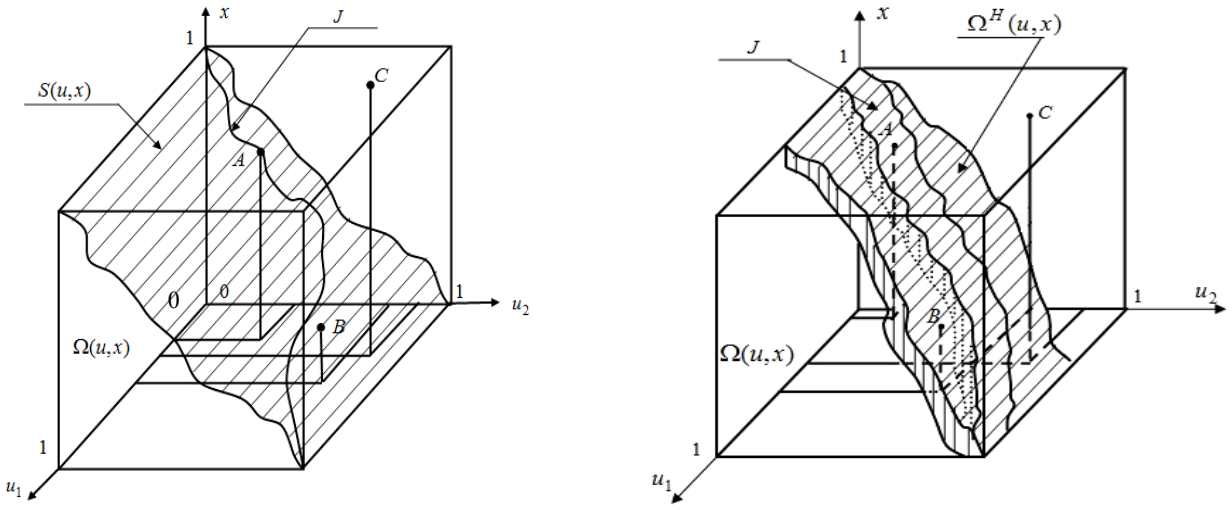


Рис. 2

Заметим лишь, что, вообще говоря, область $\Omega^H(u)$ нам неизвестна, а известна лишь выборка $\left\{x_i, u_i, i=\overline{1,s}\right\}$. Если индикатор равен нулю, то оценка $\hat{x}(u)$, $\hat{x}_s(u)$ не может быть вычислена, т. е. при таких значениях компонент вектора $u \in \Omega(u)$ процесс протекать не может. Если индикатор $I_s(u)$ при любом значении $u \in \Omega(u)$ равен единице, то модель (5) совпадает с (3), а модель (6) с (4). В качестве оценки индикатора можно принять следующее приближение:

$$I_s(u) = \operatorname{sgn}(sc_s)^{-1} \sum_{i=1}^{s} \Phi(c_s^{-1}(x_s(u) - x_i)) \times$$

$$\times \prod_{j=1}^{k} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)),$$

где

$$x_s(u) = \frac{\sum_{i=1}^{s} x_i \prod_{j=1}^{k} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))}{\sum_{i=1}^{s} \prod_{j=1}^{k} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))}, \qquad (8)$$

а параметр размытости c_s и колоколообразная функция $\Phi(\cdot)$ удовлетворяют условиям сходимости [5]:

$$\Phi(z) \ge 0; \qquad \int_{\Omega(z)} \Phi(z)dz < \infty; \qquad \lim_{s\to\infty} c_s^{-1}\Phi(z) = \delta(z);$$

$$c_s > 0; \qquad \lim_{s\to\infty} c_s = 0; \qquad \lim_{s\to\infty} sc_s^k = \infty.$$

Таким образом, при известном значении $u = u' \in \Omega(u)$ сначала строится оценка $x_s(u = u')$ по формуле (8), затем вычисляется индикатор $I_s(u)$ и только на следующем этапе используются модели (5) или (6), если индикатор оказался равным единице. Если же индикатор равен нулю, то это означает, что хотя $u' \in \Omega(u)$, но $u' \overline{\in} \Omega^H(u)$, т. е. компоненты вектора $u = u' = (u_1', \ldots, u_k')$ определены неверно, иными словами, реально протекающий «трубчатый» процесс не соответствует совокупности заданных значений компонент вектора $u = u'$ (рис. 3).

Причины этого могут состоять в том, что компоненты вектора $u = u' = (u_1', \ldots, u_k')$ выбраны неверно либо измерены со значительной погрешностью типа «выброс». Конечно же, это справедливо только при условии, что мы располагаем представительной выборкой $\left\{x_i, u_i, i=\overline{1,s}\right\}$.

Следует заметить, что использование традиционных моделей типа (3), (4) позволит получить оценку $\hat{x}(u = u')$, которая, естественно, будет далека от реальности.

Естественно считать, что процесс идентификации объекта в параметрической постановке также следует осуществлять с учетом «трубчатой» структуры объекта. Примем модель «трубчатого» процесса в виде

$$\hat{x}(u) = \sum_{j=1}^{N} \alpha_j \varphi_j(u) I(u),$$

где $\varphi_j(u)$, $j=\overline{1,N}$ – система выбранных линейно независимых функций; $I_s(u)$ – индикаторная функция (7).

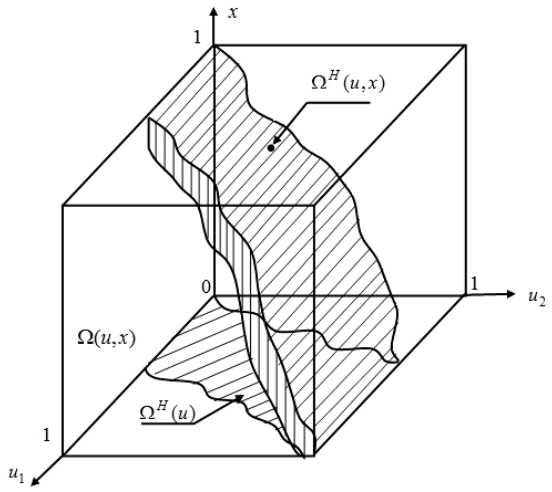


Рис. 3

Сформируем критерий оптимальности:

$$R(\alpha) = M\left\{(x(u) - \sum_{j=1}^{N} \alpha_j \phi_j(u) I(u))^2\right\}.$$

Наша цель состоит в отыскании таких $\alpha^* = (\alpha_1^*, \ldots, \alpha_N^*)$, что

$$R(\alpha^*) = \min_{\alpha} R(\alpha). \qquad (9)$$

Решение задачи (9) дается системой рекуррентных соотношений [2]:

$$\alpha_s^l = \alpha_s^{l-1} + \gamma_s^l (x_s - \sum_{j=1}^{N} \alpha_{s-1}^j \varphi_j(u_s) I_{s-1}(u_s)) \times$$

$$\times \varphi_j(u_s) I_{s-1}(u_s), l = 1, \ldots, N.$$

В качестве оценки $I(u_s)$ примем приближения

$$I_{s-1}(u_s) = \operatorname{sgn}((s-1)c_{s-1})^{-1} \sum_{i=1}^{s-1} \prod_{j=1}^{k} \Phi\left(\frac{u_s - u_i^j}{c_{s-1}}\right).$$

Ясно, что сходимость α_s к α_s^* следует при $s \to \infty$ [2].

Об одной особенности моделирования «трубчатых» процессов. Приведем следующий пример, имеющий отношение к идентификации безынерционной системы. Пусть объект описывается уравнением

$$x(u) = f(u_1, u_2, u_3), \qquad (10)$$

где трехмерный вектор $u = (u_1, u_2, u_3) \in R^3$ является входной переменной, а $x \in R^1$ – выходная перемен-

ная. Традиционный путь построения модели процесса, описываемого (10), состоит в определении класса параметрических зависимостей $\hat{x}(u) = \hat{f}(u_1, u_2, u_3, \alpha)$ и последующей оценки параметров α тем или иным способом по выборке наблюдений $(u_i, x_i), i = \overline{1, s}$, где s – объем выборки. Проанализируем этот пример с разных точек зрения. Пусть компоненты вектора входных переменных $u = (u_1, u_2, u_3)$ стохастически никак не связаны, т. е. независимы. В этом случае естественно использовать традиционный прием, описанный выше. Теперь предположим, что объективно компоненты вектора входных переменных функционально связаны, например,

$$u_2 = \varphi_1(u_1),\ u_3 = \varphi_2(u_2) = \varphi_2(\varphi_1(u_1)). \qquad (11)$$

Естественно, исследователь не знает о существовании зависимостей (11). В противном случае можно было бы сделать подстановку (11) в (10) и получить следующую зависимость x уже от одной переменной u_1:

$$x(u) = f(u_1, \varphi_1(u_1), \varphi_2(\varphi_1(u_1))).$$

Таким образом, зависимость (10) в приведенных выше условиях может быть сведена к одномерной зависимости x от u_1.

В случае если зависимость u_3 от u_2 объективно отсутствует, то (10) легко приводится к виду

$$x(u) = f(u_1, \varphi_1(u_1), u_3),$$

т. е. к двумерной зависимости x от u_1, u_3. Отсюда можно заключить, что при наличии функциональной зависимости между компонентами вектора u мы получаем зависимости x от u, в данном случае, одно-, двух-, трехмерные. Подчеркнем еще раз, что о наличии функциональных зависимостей между компонентами вектора входных переменных исследователю не известно. Просто мы проанализировали случай: «Если бы…». А теперь проанализируем наиболее интересный случай, имеющий непосредственное отношение к Н-процессам.

Пусть u_3 и u_2, хотя и неизвестным образом, но стохастически связаны. Подчеркнем – стохастически, а не функционально. Вернемся еще раз к анализу того, что произошло.

Во-первых, если компоненты вектора u независимы, то исследуемый процесс описывается функцией трех переменных. Если две компоненты вектора входных переменных u связаны функциональной зависимостью, то процесс описывается функцией двух переменных. Наконец, если две переменные связаны стохастически, то процесс описывается функцией более чем двух переменных и менее чем трех?! Можно считать, что мы приходим к зависимости от дробного числа переменных и, следовательно, к пространству дробной размерности. Такой факт в математике был уже известен, правда, истоки его лежали в области геометрических исследований природных объектов и описаны в книге Б. Мондельброта «Фрактальная геометрия природы» [6]. Приведем небольшой фрагмент: «Жидкость, газ, твердое тело – три привычных физических состояниях вещества, существующего в трехмерном мире. Но какова размерность клуба дыма, облака, точнее, их границ, непрерывно размываемых турбулентным движением воздуха? Оказалась, что она больше двух, но меньше трех. Дробная величина! Аналогичным образом можно посчитать и размерность других реальных природных объектов – например, береговой линии, размываемой прибоем, или кроны дерева, шелестящей под ветром. Кровеносная система человека – пульсирующая, живая – имеет размерность 2.7». Ранее этот факт был известен как размерность пространства Хаусдорфа–Безиковича. В русле проблематики моделирования, идентификации, управления этот вопрос, конечно же, требует осмысления и исследования.

Моделирование динамических процессов. В общем виде модель линейной динамической системы может быть описана уравнением

$$x_t = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i x_{t-i} + \sum_{i=1}^{k} b_i u_{t-i+1}, \qquad (12)$$

где x и u – соответственно выходная и входная переменные объекта. Аналог объекта (12) при $k = 1$ представлен на рис. 4.

Рис. 4

Введем векторные обозначения:

$$z_t = (x_{t-1}, ..., x_{t-m}, u_{t-1}, ..., u_{t-k}),$$
$$\alpha = (a_1, ..., a_m, b_1, ..., b_k),$$

тогда уравнение (12) перепишется в виде

$$x_t = \sum_{i=1}^{\theta} \alpha_i z_{it}, \qquad (13)$$

где $\theta = k + m$. Следует обратить внимание на тот факт, что мы, по существу, свели задачу идентификации линейной динамической системы к задаче идентификации многомерного линейного объекта без памяти. К сожалению, это не приводит к каким-либо упрощениям решения исходной задачи, а разве лишь к алгоритмической простоте.

Действуя по уже знакомой нам схеме, получим

$$\alpha_{jt} = \alpha_{j(t-1)} + H_{jt}(x_t - \sum_{i=1}^{\theta} \alpha_{i(t-1)} z_{it}) z_{jt}, \quad j = \overline{1, \theta}. \qquad (14)$$

Таким образом, для оценивания параметров в моделях (12), (13) следует использовать алгоритмы сто-

хастических аппроксимаций (14), подробно изложенных в [3].

Основной итог статьи состоит в моделировании процессов «трубчатой» структуры, которая имеет место всегда, если компоненты вектора входных переменных исследуемого процесса стохастически зависимы. В этом случае традиционно используемые модели статических систем с запаздыванием неприменимы или, в лучшем случае, могут приводить к значительным ошибкам. Наиболее интересным является тот факт, что мы приходим к необходимости введения пространства дробной размерности. Интересен вопрос: будет ли это пространство Хаусдорфа–Безиковича? Проведенные численные исследования подтверждают эффективность использования H-моделей вместо общепринятых.

Библиографические ссылки

1. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975.

2. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М. : Наука, 1984.

3. Медведев А. В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. 4. С. 4–9.

4. Медведев А. В. Анализ данных в задаче идентификации // Компьютер. анализ данных моделирования : сб. науч. ст. Т. 2. Минск : Изд-во БГУ, 1995. С. 201–206.

5. Медведев А. В. Непараметрические системы адаптации. Новосибирск : Наука, 1983.

6. Мондельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М. : Ижевск : Ижев. ин-т компьютер. исслед. ; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010.

A. V. Medvedev

H-MODELS FOR NON-INERTIA SYSTEMS WITH A DELAY

The author considers a problem of the new class of processes with a «tubular» structure in the space of "input-output" variables. Modeling of these class processes differs highly from the generally accepted parametric models being a surface of the same space. A question of multidimensional systems modeling having small volume of learning samples is analyzed specially. To develop the trainable parametric models of «tubular» processes, the corresponding non- parametric indicator is introduced. A new class of trainable parametric models, and some results of the numerical investigation are presented.

Keywords: identification, non parametric algorithms, parametric model, a priori information, stochastic processes, H-models.

© Медведев А. В. , 2012

УДК 669:51-7

Т. В. Пискажова, П. В. Поляков, Н. А. Шарыпов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

Выполнен обзор применения методов многомерной статистической обработки базы данных алюминиевого производства для оценки эффективности работы аппаратов и качества получаемой продукции. Рассмотрено применение метода главных компонент для анализа расхода электроэнергии двух корпусов алюминиевого завода.

Ключевые слова: многомерный статистический анализ, метод главных компонент, алюминиевый электролизер, расход электроэнергии.

Аппарат для получения алюминия электролизом – алюминиевый электролизер – сложная диссипативная система. Работа аппарата оценивается технико-экономическими показателями (ТЭП). Входными параметрами для электролизера (рис. 1) являются качественные характеристики сырья (пек, кокс, анодная масса, глинозем, фтористые соли).

Возмущающие воздействия на электролизер оказывают колебания тока серии, загрузка анодной массы, перестановка штырей, перетяжка анодной рамы, технологические обработки, выборка металла. Параметры процесса используются для технологического управления. В автоматическом режиме осуществляется управление напряжением электролизера, концентрацией глинозема, криолитовым отношением.

Анализ ТЭП алюминиевого электролизера ведется по факту произведенного металла (удельные расходные коэффициенты).

Прогноз и управление ТЭПами на основании существующих знаний об электролизе и информации, имеющейся в базе данных алюминиевого завода, представляется важной задачей.

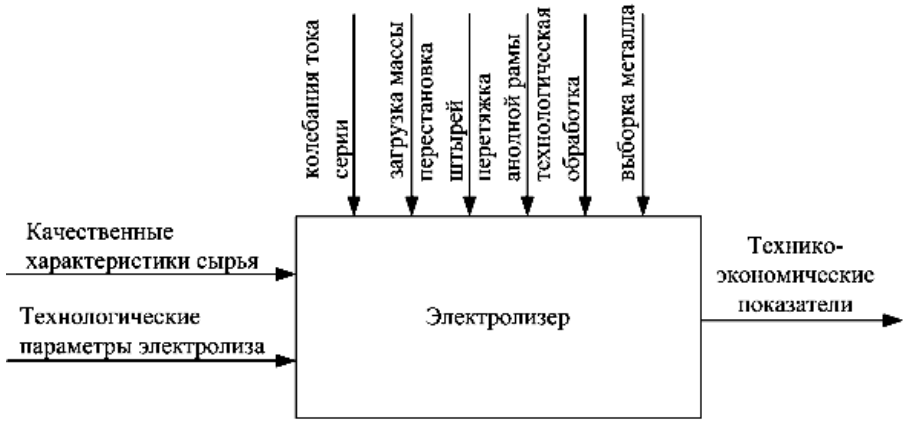


Рис. 1. Электролизер как объект управления

Существенно важным в современных экономических условиях для алюминиевых заводов является расход электроэнергии (до 30 % в себестоимости получаемого первичного алюминия). В литературных источниках [1–3] имеются отдельные сведения о зависимости расхода электроэнергии от некоторых параметров сырья и работы аппарата. Для повышения эффективности работы электролизера и снижения себестоимости металла важно знать одновременное влияние параметров процесса на расход электроэнергии. Наиболее простым методом построения и исследования подобных зависимостей по статистическим выборкам является множественный регрессионный анализ [4; 5]. Но в случае большого количества взаимозависимых (мультиколлинеарных) исходных параметров, что и наблюдается в такой сложной диссипативной системе, как алюминиевый электролизер, проявляется «эффект деградации» (неустойчивости) регрессионных коэффициентов, обнаруженный Фришем [6]. Для исключения мультиколлинеарности переменных при построении множественной регрессии существует несколько различных методов, например исключение взаимозависимых переменных из выборки, использование различных вариаций МНК. На наш взгляд, наиболее верным и математически обоснованным является метод главных компонент (МГК) [4]. МГК широко применяется для решения задач классификации, снижения размерности исходного массива, выделения новых латентных переменных в структуре данных, распознавания образов.

Блок-схема статистического анализа данных с использованием МГК представлена на рис. 2.

В алюминиевой промышленности использовались следующие возможности этого метода:

– выявление нескольких главных переменных из большого количества анализируемых переменных, повлиявших на ход процесса за рассматриваемое время [7];

– определение характера зависимости (прямо пропорциональная или обратно пропорциональная) между ТЭПами и выделенными главными переменными [8];

– диагностика нарушений или изменения ТЭПов [7; 9; 10];

– графический анализ для оценки концентрации веществ в определенной зоне [11];

– оценка производительности аппарата [11];

– онлайн-мониторинг состояния аппарата [11].

В данной работе показано применение МГК в качестве инструмента для многомерного анализа технологических параметров алюминиевых электролизеров.

Выборка данных. Выборка для анализа расхода электроэнергии содержала восемь переменных (табл. 1) и 46 наблюдений (данные с января 2007 г. по октябрь 2010 г.). Анализ проводился для корпусов, работающих с технологией бокового токоподвода, корпус 1 и корпус 2 Надвоицкого алюминиевого завода.

Целесообразность использования среднемесячных параметров в статистическом анализе исходит из технологических соображений и обосновывается подробно в работе Тесье с соавторами [12]. Выбор переменных для анализа осуществлялся на основе работ [1–3].

Анализ. Многомерный статистический анализ проводился с использованием ПП Statistica и MS Excel. Объяснение дисперсии для выборки для расхода энергии представлено в табл. 2. В этом случае для объяснения всей дисперсии требуется всего восемь ГК, тогда как четыре ГК объясняют уже ≈90 % исходных данных.

Вклады параметров в первые пять ГК представлены в табл. 3. Обычно рассматривают вклад в первые несколько ГК, так как они описывают значительную часть изменения в исходных параметрах (для данных выборок две ГК описывают больше половины дисперсии данных).

Первое направление (ГК1) для обоих корпусов характеризуется тем, что в него внесли вклад следующие параметры: сила тока, срок службы, температура электролита и уровень металла (в первом корпусе дополнительно вклад внесли изменения, связанные с выходом по току).

Второе направление (ГК2) характеризуется следующими параметрами, которые внесли большой вклад: удельный выход пены и криолитовое отношение. В первом корпусе дополнительный вклад имеет ЧАЭ, во втором корпусе значительный вклад имеет выход по току. Отметим, что независимо от корпуса, вклад в первые две компоненты внесли одни и те же переменные.

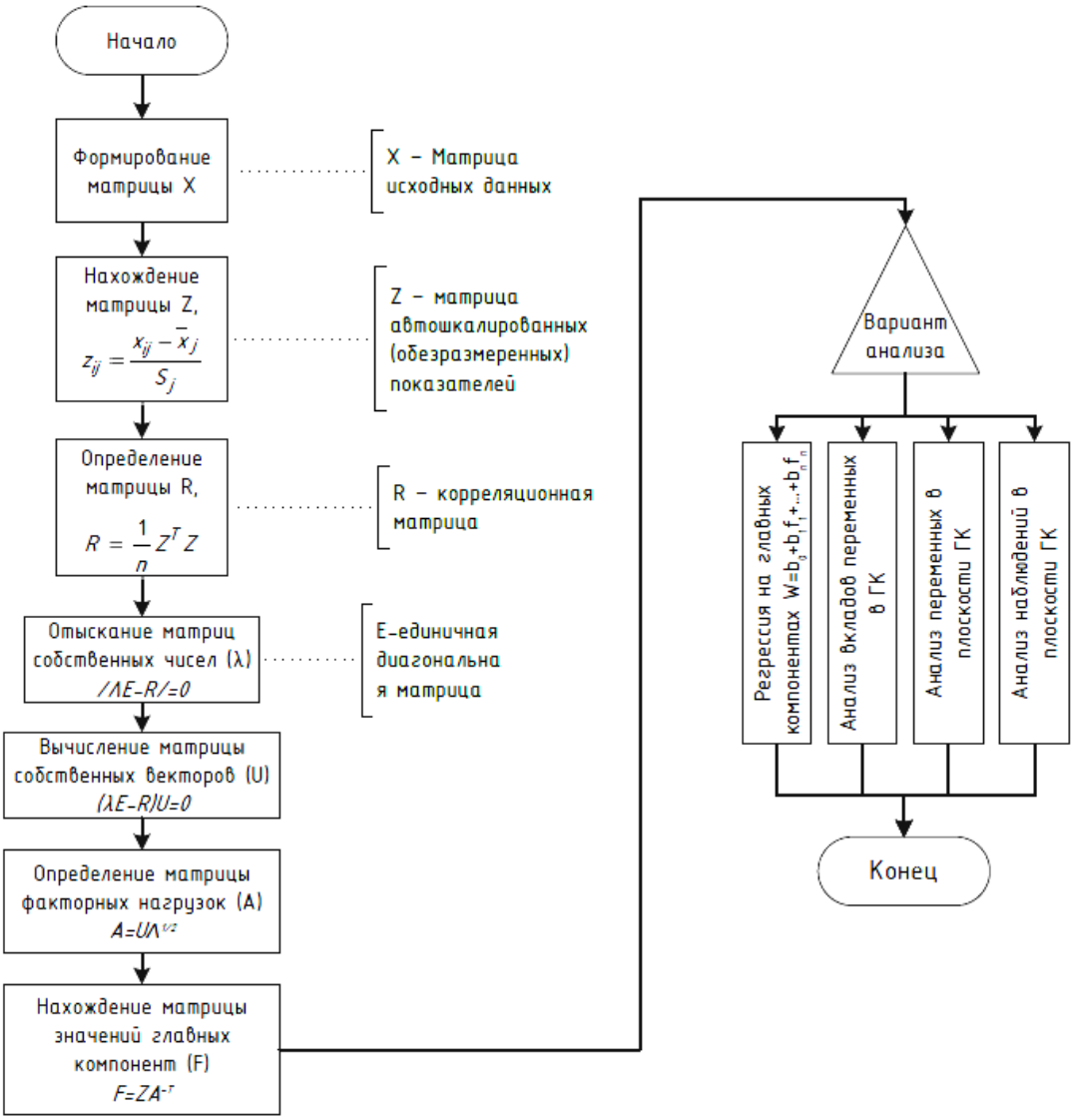


Рис. 2. Алгоритм анализа данных с применением МГК

Таблица 1

Параметры, включенные в выборку для анализа расхода электроэнергии

Параметр	Условное обозначение	Единицы измерения	Корпус 1		Корпус 2	
			Среднее значение	Стандартное отклонение	Среднее значение	Стандартное отклонение
Сила тока	CS	кА	81,38	1,15	81,38	1,15
Выход по току (ВПТ)	CE	%	90,07	1,70	90,07	1,76
Частота анодных эффектов (ЧАЭ)	AEF	шт./сут.	0,68	0,25	0,68	0,26
Срок службы	PL	мес.	41,75	9,67	43,64	10,03
Удельный выход угольной пены	Dust	кг/т Al	10,56	4,44	10,85	4,56
Температура электролита	BT	°C	960,82	3,19	961,34	3,27
Криолитовое отношение (КО)	CR	доли ед.	2,68	0,07	2,69	0,07
Уровень металла	ML	см	34,82	3,38	34,72	3,31
Расход электроэнергии*	EC	кВт·ч/т	15165,10	308,39	15 228,89	349,93

*Вспомогательный параметр не участвует в расчете коэффициентов при переходе к главным компонентам (ГК), но отображается в плоскости ГК для анализа характера зависимостей.

Таблица 2

Объяснение дисперсии исходных данных главными компонентами

Номера ГК	Корпус 1		Корпус 2	
	Объясненный процент общей дисперсии	Накопительный объясненный процент	Объясненный процент общей дисперсии	Накопительный объясненный процент
1	47,499	47,499	48,810	48,810
2	15,662	63,161	18,192	67,002
3	14,856	78,017	14,321	81,323
4	**11,334**	**89,351**	**8,523**	**89,846**
5	**5,084**	**94,435**	**5,074**	**94,920**
6	3,870	98,305	3,076	97,996
7	1,246	99,552	1,620	99,616
8	0,448	100	0,384	100

Таблица 3

Вклад переменных в первые две ГК

Параметр	Корпус 1		Корпус 2	
	ГК1	ГК2	ГК1	ГК2
Сила тока	**0,198**	0,006	**0,184**	0,000
ВПТ	**0,102**	0,011	0,099	**0,138**
ЧАЭ	0,015	**0,330**	0,008	0,001
Срок службы	**0,206**	0,008	**0,210**	0,003
Выход пены	0,002	**0,203**	0,001	**0,529**
Температура электролита	**0,178**	0,023	**0,179**	0,008
КО	0,062	**0,416**	0,076	**0,315**
Уровень металла	**0,237**	0,003	**0,242**	0,005

В ходе анализа получены проекции переменных в плоскостях ГК (рис. 3, 4). Плоскости ГК – это срезы (проекции) многомерного пространства. На основании этих проекций делают вывод о характере зависимости между анализируемыми переменными. По правилам метода [8], прямо пропорциональную зависимость между собой имеют переменные, находящиеся в одном квадранте, обратно пропорциональную зависимость имеют переменные, находящиеся в противоположных квадрантах. Характер зависимости между переменными, находящимися в соседних квадрантах, не указывается (в геометрической интерпретации они независимы, так как в многомерном пространстве угол между ними приближается к прямому).

Анализ проекций переменных в ГК (см. рис. 3, 4) показывает, что для обоих корпусов прямо пропорциональную зависимость между собой имеют следующие переменные: выход пены, срок службы, расход электроэнергии; ЧАЭ, сила тока и уровень металла. Обратно пропорциональную зависимость имеют следующие переменные: срок службы, выход по току; выход пены, выход по току; расход электроэнергии и выход по току. Такой характер зависимости подтверждается в литературе. Например, чем больше пены в электролизере, тем выше температура электролита и, как следствие, больше электроэнергии необходимо затратить на производство алюминия; с увеличением выхода по току снижается расход электроэнергии, оба эти параметра входят в уравнение для расчета выхода по току и имеют обратно пропорциональную зависимость.

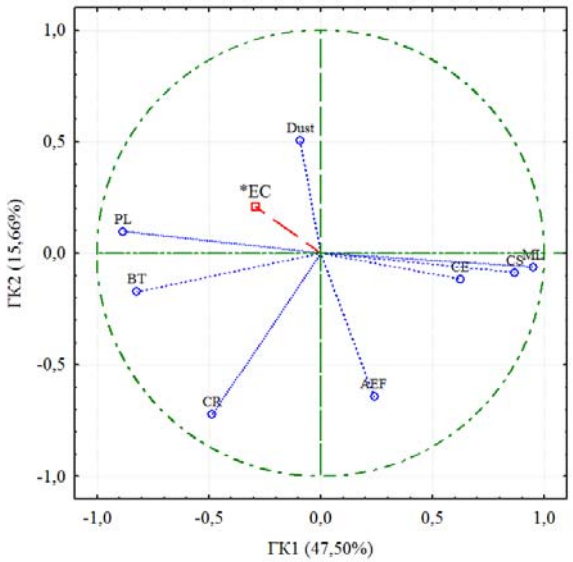


Рис. 3. Проекции переменных в плоскости ГК1 и ГК2 для КЭБТ № 1:
□ – вспомогательные переменные (EC)

Следующим этапом анализа было построение МГК-моделей. МГК-модель – это регрессия на главных компонентах, а откликом выступает интересующий исследователей параметр.

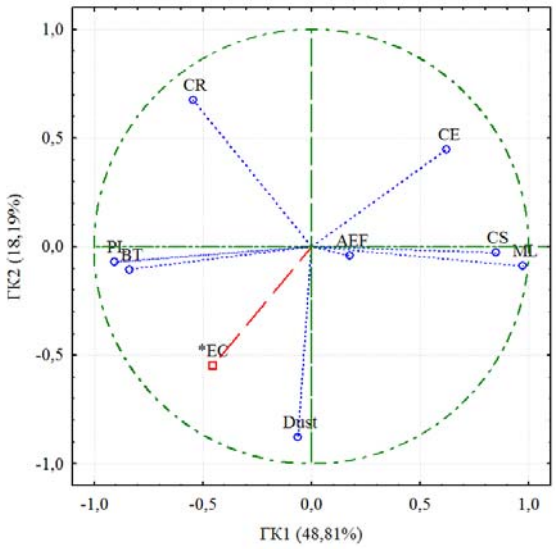


Рис. 4. Проекции переменных в плоскости ГК1 и ГК2 для КЭБТ № 2
□ – вспомогательные переменные (EC)

В нашем случае в качестве такого параметра был выбран расход электроэнергии. Следующие уравнения и представляют собой МГК-модели для анализа расхода электроэнергии корпуса 1 и корпуса 2 соответственно:

$$EC1 = 15\,165{,}1 - 90{,}3 \cdot ГК1 + 64{,}6 \cdot ГК2 - 91{,}4 \cdot ГК3 + 245{,}6 \cdot ГК4 - 31{,}1 \cdot ГК5 - 79{,}5 \cdot ГК6 - 7{,}6 \cdot ГК7 - 0{,}6 \cdot ГК8, \quad R^2 = 0{,}929; \quad (1)$$

$$EC2 = 15\,228{,}9 - 158{,}5 \cdot ГК1 - 191{,}4 \cdot ГК2 + 17{,}2 \cdot ГК3 + 207{,}1 \cdot ГК4 - 62 \cdot ГК5 + 46{,}7 \cdot ГК6 + 13{,}5 \cdot ГК7 + 0{,}7 \cdot ГК8, \quad R^2 = 0{,}907; \quad (2)$$

где EC1 и EC2 – расход электроэнергии для КЭБТ № 1 и КЭБТ № 2 соответственно.

Как видно из значений коэффициентов детерминации, уравнения хорошо описывают исходные выборки. Статистическое качество уравнений (1) и (2) подтверждено по критерию Фишера. Данные МГК-модели можно использовать для предсказания среднемесячных значений на уровне корпуса.

Рассмотрим зависимости остатков (Q) моделей (1)–(2) от расчетных значений результативного признака – расхода электроэнергии (рис. 5, 6).

Анализ рисунков показывает, что остатки представляют собой случайные величины [6]. Расчетные значения результативного признака хорошо аппроксимируют фактические значения.

Следует отметить, что данные уравнения неудобны для использования персоналом предприятия, поэтому был выполнен переход к уравнениям в центрированных технологических переменных:

$$EC1 = 15\,165{,}1 + 130{,}36 \cdot CS - 529{,}29 \cdot CE + 59{,}10 \cdot AEF - 62{,}19 \cdot PL + 29{,}33 \cdot Dust + 29{,}76 \cdot BT - 64{,}68 \cdot CR + 98{,}81 \cdot ML; \quad (3)$$

$$EC2 = 15\,228{,}89 + 31{,}98 \cdot CS - 331{,}93 \cdot CE + 18{,}32 \cdot AEF - 1{,}85 \cdot PL + 8{,}2 \cdot Dust + 27{,}52 \cdot BT - 43{,}89 \cdot CR + 15{,}82 \cdot ML. \quad (4)$$

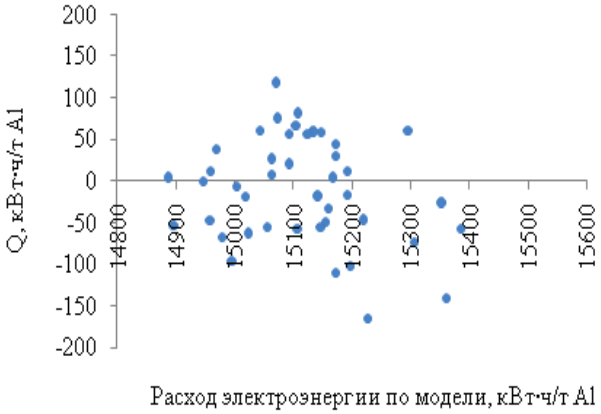


Рис. 5. Исследование остатков модели для КЭБТ № 1

Рис. 6. Исследование остатков модели для КЭБТ № 2

Расшифровка обозначений приведена в табл. 1. Графическое представление моделей и реального расхода электроэнергии приведено на рис. 7, 8.

Преобразовав центрированные параметры в истинные, получим влияние каждого отдельного параметра на расход электроэнергии (табл. 4). В таблице показано, как снижение каждого параметра на три величины его среднеквадратичного отклонения (3σ) влияет на расход электроэнергии в соответствии с уравнениями (3) и (4) для разных корпусов.

Влияние параметра в соответствии с литературными источниками [1–3] приведено в последнем столбце табл. 4. Как видно, характер влияния в полученных моделях для расхода электроэнергии согласуется с литературными источниками.

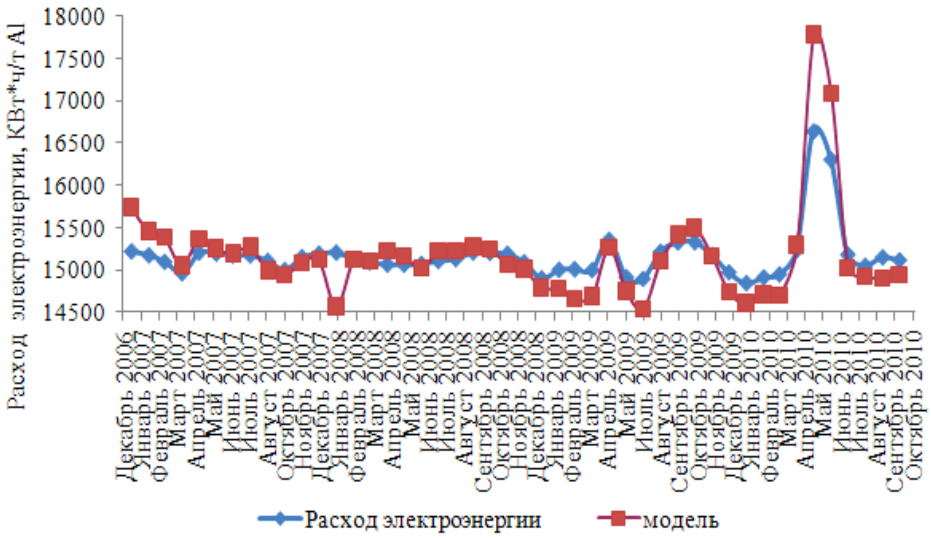


Рис. 7. Сравнение реального расхода электроэнергии
и расхода, полученного по модели, для КЭБТ № 1

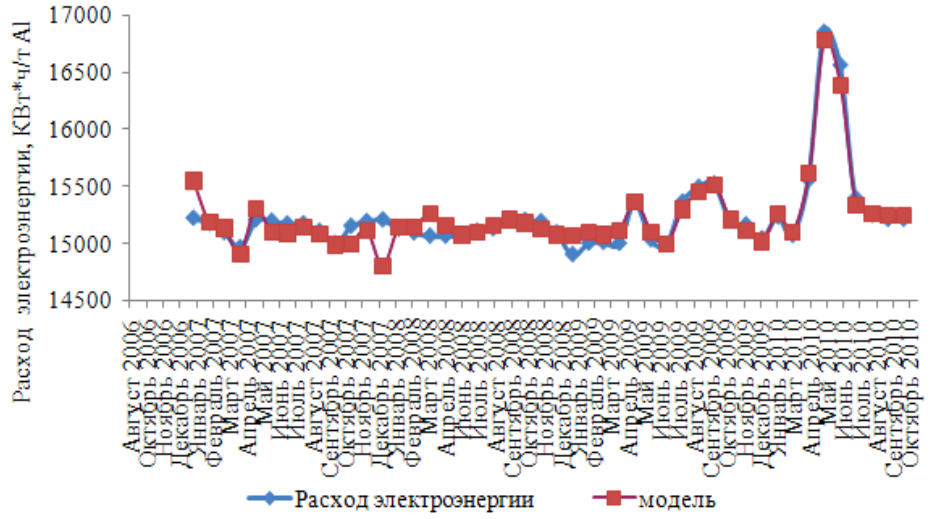


Рис. 8. Сравнение реального расхода электроэнергии
и расхода, полученного по модели, для КЭБТ № 2

Таблица 4

Изменение расхода электроэнергии в зависимости от изменения параметров, взятых в анализ

Параметр	Единицы измерения	Корпус 1		Корпус 2		Характер зависимости по литературным данным
		Снижение параметра на 3 СКО	Изменение расхода электроэнергии, КВт·ч/т Al	Снижение параметра на 3 СКО	Изменение расхода электроэнергии, КВт·ч/т Al	
Сила тока	кА	–3,436	–391,08	–3,436	–95,95	Прямая
Выход по току	%	–5,105	1782,88	–5,288	995,79	Обратная
ЧАЭ	шт./сут.	–0,749	–177,29	–0,778	–54,95	Прямая
Срок службы	мес.	–29,324	186,58	–30,079	5,55	Обратная
Выход пены	кг/т Al	–15,540	–87,99	–13,686	–24,61	Прямая
Температура электролита	°С	–9,572	–89,28	–9,805	–82,55	Прямая
КО	доли ед.	–0,201	194,04	–0,212	131,66	Обратная
Уровень металла	см	–10,145	–296,42	–9,924	–47,46	Прямая

Библиографические ссылки

1. Introduction to aluminium electrolysis Understanding the Hall-Heroult process / K. Grjotheim, H. Kvande (ed.). Dusseldorf : Aluminium-Verlag, 1993.

2. Минцис М. Я., Поляков П. В., Сиразутдинов Г. А. Электрометаллургия алюминия. Новосибирск : Наука, 2001.

3. Grjotheim K., Welch B. J. Aluminium Smelter Technology. Dusseldorf : Aluminium-Verl. GmbH, 1980.

4. Светуньков С. Г., Светуньков И. С. Методы социально-экономического прогнозирования : учебник для вузов : в 2 т. Т. 1. СПб. : Изд-во СПбГУЭФ, 2009.

5. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Введение в математическую статистику : учебник. М. : Изд-во ЛКИ, 2010.

6. Эконометрика : учебник / И. И. Елисеева, С. В. Курышева, Т. В. Костеева и др. ; под ред. И. И. Елисеевой. М. : Финансы и статистика, 2002.

7. Analysis of a potroom performance drift, from a multivariate point of view / J. Tessier, C. Duchesne, G. P. Tarcy et al. // Light Metals. 2008. P. 319–324.

8. Multivariate statistical process monitoring of reduction cell / J. Tessier, T. G. Zwirz, G. P. Tarcy, R. A. Manzini // Light Metals. 2009. P. 305–310.

9. Detecting abnormalities in aluminium reduction cells based on process events using multi-way principal component analysis (MPCA) / N. A. A. Majid, B. R. Young, M. P. Taylor, J. J. J. Chen // Light Metals. 2009. P. 589–593.

10. Multivariate monitoring of the prebaked anode manufacturing process and anode quality / J. Lauzon-Gauthier, C. Duchesne, J. Tessier et al. // Light Metals. 2011. P. 967–972.

11. A Taxonomy for Aluminium Process Fault Detection and Diagnosis / N. A. A. Majid, M. P. Taylor, J. J. J. Chen, B. R. Young // Proc. of the 10th Australasian Aluminium Smelting Technology Conf. Launceston. 2011.

12. Multiblock monitoring of aluminium reduction cells performance / J. Tessier, C. Duchesne, G. P. Tarcy // Light Metals. 2011. P. 407–412.

T. V. Piskazhova, P. V. Polyakov, N. A. Sharypov

USAGE OF METHODS OF MULTI-DIMENTIONAL DATA PROCESSING FOR ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION OF ALUMINUM REDUCTION CELLS

The authors present a review of methods of application of multi-dimentional statistical analysis of database of aluminum industry. Estimation of effectiveness of devices and quality of products output is made. Application of major components for the analysis of energy consumption of two potrooms of an aluminum smelter is considered.

Keywords: multi-dimentional statistical analysis, major components analysis, aluminum reduction cell, energy consumption.

© Пискажова Т. В., Поляков П. В., Шарыпов Н. А., 2012

УДК 519.6

Е. А. Попов, М. Е. Семенкина, Л. В. Липинский

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ КОЛЛЕКТИВОМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ*

Предлагается алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования искусственных нейронных сетей. Предложена процедура принятия решений коллективом нейронных сетей, основанная на оценке компетентности членов коллектива. Подход апробирован на тестовых и реальных практических задачах.

Ключевые слова: интеллектуальные информационные технологии, алгоритм генетического программирования, коллективное принятие решений.

При математическом моделировании сложных систем и процессов часто используются так называемые интеллектуальные информационные технологии (ИИТ) – генетические алгоритмы (ГА) как метод оптимизации [1], искусственные нейронные сети (НС) как метод аппроксимации или классификации [2], генетическое программирование (ГП) как метод автоматического генерирования математических выражений [3].

Проектирование интеллектуальных информационных технологий само по себе является достаточно сложной интеллектуальной процедурой, включающей, кроме всего прочего, выбор их эффективных структур.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российкой Федерации (ГК № 11.519.11.4002 и ГК № 16.740.11.0742).

Так, при проектировании ГА необходимо производить выбор его оптимальных настроек, при создании НС – выбирать структуру нейросети (количество слоев, количество нейронов на слое, типы функций активации, наличие связей между нейронами), для построения математических моделей в ГП – выбирать структуру функциональной зависимости. Сложность проектирования ИИТ препятствует действительно массовому их внедрению в производство и другие сферы деятельности человека. Автоматизация проектирования ИИТ смогла бы решить часть трудностей, возникающих при их разработке. Но для автоматизации проектирования ИИТ должны использоваться оптимизационные процедуры, позволяющие осуществлять комбинаторный поиск на сложных структурах. Так как обычные методы математического программирования здесь не работают, применяют методы эволюционного поиска. Известно, что эволюционные алгоритмы требуют значительных вычислительных ресурсов, особенно при их использовании для решения вычислительно сложных задач, т. е. задач, требующих большого количества ресурсов независимо от алгоритма, используемого для их решения. Однако в большинстве практических случаев эта проблема может быть решена за счет использования параллельных и распределенных вычислительных систем [4; 5]. Имея возможность автоматически генерировать алгоритмическое ядро ИИТ, можно расширить класс используемых подходов, в частности – перейти к автоматическому формированию коллективов, состоящих из различных ИИТ, что позволит повысить эффективность получаемых систем анализа данных.

Повышение эффективности разработки и использования ГП, ИНС и ГА даст возможность решать более сложные практические задачи интеллектуального анализа данных. В этой связи разработка и исследование новых алгоритмических схем для автоматизации проектирования ИИТ является актуальной научной задачей.

Алгоритм генетического программирования для автоматического генерирования искусственных нейросетей. Стандартный алгоритм ГП применяется для задач символьной регрессии, т. е. задач одновременного определения точной функциональной зависимости и соответствующих численных коэффициентов. Такие задачи отличаются от обычных регрессионных задач, в которых форма функциональной зависимости (линейная, квадратичная, колоколообразная, ряд Фурье и т. п.) определяется заранее. Модификация стандартного алгоритма ГП позволяет применить его для проектирования произвольных структур нейронных сетей.

При решении задачи символьной регрессии методом генетического программирования обычно используется набор из элементарных математических функций и логических выражений. Для настройки структуры НС при помощи алгоритма ГП в терминальное множество были включены 16 функций активации, а также входные нейроны. При генерации нейросетей алгоритм ГП имеет дело не с числами, а с нейронами, поэтому и допустимые операции из функционального множества специфические:

– постановка нейронов (блоков нейронов) в один слой, являющаяся ассоциативной (обозначим «+»);

– постановка нейронов (блоков нейронов) в последовательные слои, так что нейрон (блок нейронов), пришедший из левой ветви дерева, предшествует нейрону (блоку нейронов), пришедшему из правой ветви дерева; такая постановка не является ассоциативной (обозначим «<»).

При выполнении первой операции новых связей между нейронами не появляется, при выполнении второй операции выходы нейронов из левой ветви подаются на вход нейронам из правой ветви. Важно учитывать, что входные нейроны не должны принимать на вход результаты вычисления сети или ее части, но хотя бы один из них должен подавать сигнал на вход. Поэтому было принято следующее решение: в левой ветви могут присутствовать только входные нейроны и первая операция, а в вершине дерева должна находиться вторая операция. Сборка дерева начинается справа. Пример преобразования дерева в нейронную сеть см. на рис. 1.

Операции рекомбинации и мутации были модифицированы в соответствии с ограничениями, наложенными на вид дерева.

Для настройки весовых коэффициентов полученной нейронной сети применялся модифицированный генетический алгоритм [6] с последующим локальным спуском.

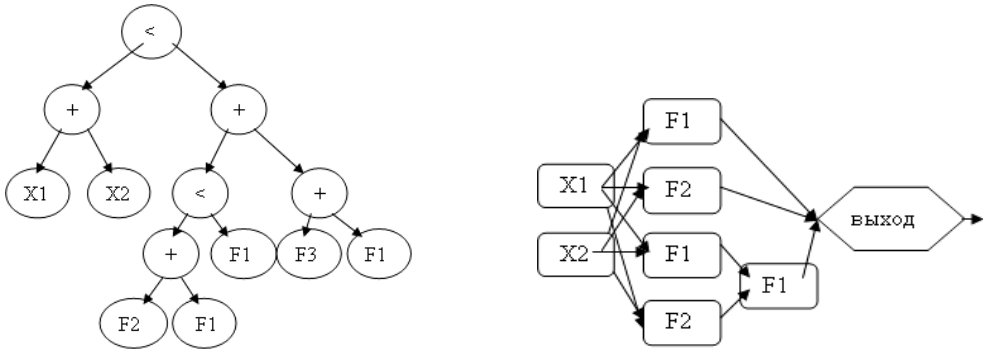


Рис. 1. Пример дерева, сгенерированного представленным алгоритмом генетического программирования, и соответствующей ему нейронной сети

Работоспособность предложенного подхода проверялась на репрезентативном наборе тестовых задач (аппроксимация, прогнозирование временных рядов). Проводилось усреднение стандартной среднеквадратической ошибки нейронной сети по 20 прогонам. Терминальное множество включало в себя 16 функций активации и входные переменные.

Результаты тестирования показали, что нейронные сети, созданные алгоритмом генетического программирования, имеют небольшое количество нейронов по сравнению с нейросетями, получаемыми посредством нейроиммитаторов, и не являются полносвязными (связей между нейронами мало). При этом данные НС обладают достаточно малой среднеквадратической ошибкой.

Процедура принятия решений коллективом интеллектуальных информационных технологий. Для повышения эффективности применения интеллектуальных информационных технологий предлагается при решении задачи формировать коллектив из нескольких ИИТ. Например, из трех нейронных сетей, полученных алгоритмом генетического программирования для автоматического генерирования нейросетевых моделей, и четырех символьных выражений, полученных алгоритмом генетического программирования для решения задач символьной регрессии.

Для формирования решения коллективом ИИТ возможны несколько подходов. Наиболее часто применяемыми являются метод усреднения [7] и его модификация, учитывающая ошибки каждого из членов коллектива [8]. Решения формируются по следующим схемам.

Схема 1. Выходные значения ИИТ складываются и делятся на число членов коллектива.

Схема 2. Метод, основанный на «оценке компетентности» ИИТ. Для каждого члена коллектива на основании его ошибки, полученной на обучающей выборке, назначается весовой коэффициент, обратно пропорциональный ошибке [9]. Выходное значение ИИТ умножается на весовой коэффициент ИИТ, после чего все полученные значения складываются и делятся на их число.

Заметим, что в данных подходах мнение наиболее компетентного члена коллектива «разбавляется» мнением менее компетентных, что дает повод к сомнению в эффективности этих подходов в конкретных задачах.

Предлагается новая схема учета мнений членов коллектива ИИТ, гарантирующая ошибку не больше той, которую имеет лучшая из ИИТ, участвующих в принятии решений.

Схема 3. Полученный коллектив принимает решение относительно каждой точки, в которой запрашивается решение задачи (выходное значение, вычисленное членами коллектива), следующим образом:

– производится поиск точки из обучающей выборки, которая находится ближе остальных к точке, в которой необходимо получить значение;

– в найденной точке обучающей выборки определяется ИИТ с наименьшей среднеквадратической ошибкой;

– выбранной ИИТ предоставляется право принятия решения относительно значения в интересующей нас точке.

Предложенная процедура была реализована в виде программной системы и проверена на репрезентативном множестве тестовых задач. Было также проведено сравнение трех описанных схем. Выбор состава коллектива (количество ИИТ каждого вида) остается на усмотрение пользователя.

Апробация на практических задачах. Для апробации предложенного подхода были использованы следующие практические задачи:

– моделирование прожиточного минимума в регионах Российской Федерации (3 входа, 1 выход, обучающая выборка – 80 единиц, контрольная – 9);

– моделирование вибрационных характеристик гидротурбины (12 входов, 11 выходов, обучающая выборка – 906 единиц, контрольная – 93 точки);

– моделирование системы подавления шума (1 вход, 1 выход, данные сильно зашумлены, обучающая выборка – 250 единиц, контрольная – 250 точек).

При решении задачи моделирования прожиточного минимума регионов Российской Федерации коллективом интеллектуальных информационных технологий, коллектив состоял из двух нейронных сетей со среднеквадратическими ошибками, равными 0,008 725 7 и 0,008 967, и двух символьных выражений со среднеквадратическими ошибками 0,086 и 0,0305. Коллектив, работающий по первой схеме, допустил среднеквадратическую ошибку, равную 0,016 466, работающий по второй схеме – 0,024 143 1, работающий по третьей схеме – 0,007 748. Только третья схема обеспечила ошибку не ниже, чем у лучшей из ИИТ в отдельности. В этом коллективе худшие нейронная сеть и символьное выражение не внесли вклад в решение задачи. Коллектив, составленный из двух нейронных сетей, работающий по третьей схеме, имеет ту же среднеквадратическую ошибку, что и лучшая из них. Коллектив, составленный только из двух символьных выражений, работающий по третьей схеме, имеет ошибку, равную 0,029 9. Можно сказать, что при решении данной задачи имело бы смысл включить в коллектив только лучшую нейронную сеть и лучшее символьное выражение.

Для апробации на задаче моделирования вибрационных характеристик гидротурбины коллектив интеллектуальных информационных технологий состоял из двух нейронных сетей с ошибками 0,012 917 (рис. 2) и 0,013 444 и двух символьных выражений со среднеквадратическими ошибками 0,017 04 и 0,019 84.

Коллектив, работающий по первой схеме, допустил ошибку 0,013 45, работающий по второй схеме – 0,013 643, работающий по третьей схеме – 0,010 034. Коллектив, составленный из двух нейронных сетей, работающий по третьей схеме, имеет среднеквадратическую ошибку 0,011 746. Коллектив, составленный из лучших символьного выражения и нейросети, работающий по третьей схеме, имеет ошибку, равную 0,010 819.

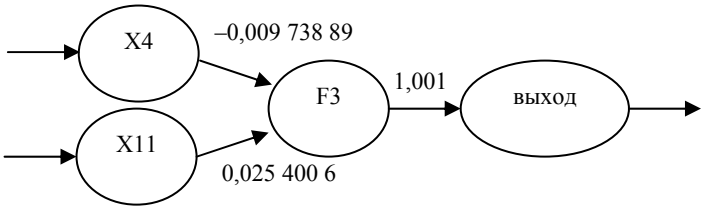


Рис. 2. Нейронная сеть, полученная при решении задачи моделирования вибрационных характеристик гидротурбины

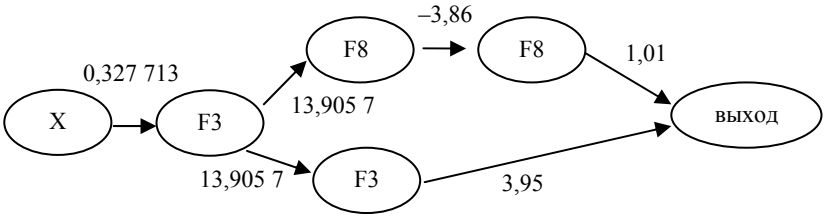


Рис. 3. Нейронная сеть, полученная при решении задачи моделирования системы подавления шума

Коллектив, состоящий из обеих нейросетей и лучшего символьного выражения, имеет ошибку ту же, что и коллектив, состоящий из всех четырех ИИТ. Можно сказать, что при решении данной задачи имело бы смысл включить в коллектив только лучшее символьное выражение и обе нейронные сети.

При решении задачи моделирования системы подавления шума коллективом интеллектуальных информационных технологий, коллектив состоял из двух нейронных сетей с ошибками 0,684 407 (рис. 3) и 0,686 113 соответственно, и двух символьных выражений со среднеквадратическими ошибками 0,493 897 и 0,493 553 соответственно.

Коллектив, работающий по первой схеме, допустил ошибку 0,532 637, работающий по второй схеме – 0,551 447, работающий по третьей схеме – 0,407 085. Коллектив, составленный только из этих двух нейронных сетей, работающий по третьей схеме, имеет среднеквадратическую ошибку 0,662 504. Коллектив, составленный только из лучших символьного выражения и нейросети, работающий по третьей схеме, имеет ошибку, равную 0,420 15.

Коллектив, состоящий из обеих нейросетей и лучшего символьного выражения, имеет ошибку 0,481 581. Можно сказать, что при решении данной задачи имело бы смысл включить в коллектив все четыре ИИТ.

Таким образом, разработанная программная система позволяет формировать коллективы автоматически генерируемых интеллектуальных информационных технологий, т. е. дает возможность решать сложные задачи анализа данных. Создание коллектива увеличивает эффективность и надежность применения ИИТ. Работоспособность данного подхода была проверена не только на тестовых, но и на реальных практических задачах из различных областей человеческой деятельности, что позволяет рекомендовать их конечным пользователям в качестве удобного и эффективного инструмента интеллектуального анализа данных.

Библиографические ссылки

1. Eiben A. E., Smith J. E. Introduction to Evolutionary Computing. Springer Verlag Berlin, 2003.

2. Оссовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с пол. И. Д. Рудинского. М. : Финансы и статистика, 2002.

3. Koza J. R. Genetic Programming: On Programming Computer by Means of Natural Selection and Genetics. Cambridge, MA : The MIT Press, 1992.

4. Ефимов С. Н., Семенкин Е. С., Тынченко В. В. Формирование грид-системы эффективной архитектуры для распределенного решения сложных задач // Системы управления и информ. технологии. 2009. № 2 (36). С. 4–7.

5. Формализация задач выбора эффективного варианта распределенных систем управления / С. Н. Ефимов, И. А. Панфилов, Е. С. Семенкин, В. А. Терсков // Вестник СибГАУ. 2003. Вып. 4. С. 24–31.

6. Семенкин Е. С., Семенкина М. Е. Применение генетического алгоритма с модифицированным оператором равномерной рекомбинации при автоматизированном формировании интеллектуальных информационных технологий // Вестник СибГАУ. 2007. Вып. 3 (16). С. 27–33.

7. Hansen L. K., Salamon P. Neural network ensembles // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. № 12 (10). P. 993–1001.

8. Jimenez D. Dynamically weighted ensemble neural networks for classification // Proc. IJCNN-98. Anchorage, 1998. P. 753–756.

9. Cooper L. N., Perrone M. P. When networks disagree: ensemble method for neural networks // R. J. Mammone (ed.) // Artificial Neural Networks for Speech and Vision. N. Y. : Chapman & Hall, 1993. P. 126–142.

E. A. Popov, M. E. Semenkina, L. V. Lipinskiy

DECISION MAKING WITH INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGY ENSEMBLE

Genetic programming algorithm for neural network automatic design is suggested. Ensemble member competence estimations, based on decision making with intelligent information technologies, is proposed. The approach effectiveness is approved on qualificatory and real-world problems.

Keywords: intelligent information technologies, genetic programming algorithm, group decision making.

© Попов Е. А., Семенкина М. Е., Липинский Л. В., 2012

УДК 517.977.1

А. Н. Рогалев, А. А. Рогалев

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматривается применение метода наименьших квадратов и минимаксного метода для определения положения объекта околоземного пространства при известных ограничениях на ошибки измерений. Исследованы вычислительные схем, используемые для оценки значений траекторий космического объекта при различных условиях, налагаемых на ошибки измерений. Определены характеристики точности данных алгоритмов при различных распределениях ошибок измерений. Приводятся результаты численных расчетов, полученные на модельных примерах.

Ключевые слова: метод наименьших квадратов, минимаксный метод, фильтрация данных.

В задачах оценки параметров объектов астрометрии и космической геодезии необходимо анализировать экспериментальные данные, полученные с помощью измерений [1–4]. Поскольку позиционные наблюдения, как правило, являются косвенными, то результаты (данные) часто представляются алгебраическими моделями с неизвестными коэффициентами, которые являются искомыми параметрами. При оценивании этих параметров в условиях, когда данные наблюдений получены с ошибками, применяются подходы, основанные на методе наименьших квадратов [4–6] и минимаксном методе [4; 7–10].

Для высокоточного определения орбиты по измерениям традиционно используется классический метод наименьших квадратов (МНК), либо какая-то его модификация. Обоснованием для такого решения являются оптимальные свойства оценок параметров, получаемых этим методом. При некоррелированных во времени ошибках измерений, имеющих гауссово распределение, оценка МНК среди всех оценок (как линейных, так и нелинейных) наиболее точна. Однако при коррелированных во времени ошибках измерений, при негауссовых ошибках, а также при неизвестных (частично или полностью) вероятностных характеристиках ошибок измерений традиционные методы могут являться не самыми точными и не давать корректной оценки точности получаемых значений. Для многих задач ошибки единичных измерений объектов в космическом пространстве ограничены сверху определенными константами и имеют неизвестное распределение, которое хорошо аппроксимируется равномерным законом. Эта постановка не соответствует предположениям, при которых доказаны оптимальные свойства оценок МНК.

Проводится сравнительный анализ нескольких вычислительных схем, построенных на основе применения МНК и минимаксного метода (МНМ) в задаче вычисления положения искусственного спутника Земли при ограничениях на ошибки измерений. Следует отметить, что значимость этих результатов определяется тем, что не всегда ясно, когда эффективен тот или иной подход к решению задачи: классический, при котором характеристики случайных ошибок исходных данных основываются на методе максимального правдоподобия, и неклассический (минимаксный), характеризуемый заданием лишь некоторых множеств, которым принадлежат ошибки или их характеристики. Во втором случае интересно также сравнение возможностей минимаксного и гарантированного подходов [11; 12] к оценке решений управляемых систем.

Искусственный спутник Земли (ИСЗ) – космический аппарат (КА), вращающийся вокруг Земли по геоцентрической орбите, т. е. по эллиптической траектории вокруг Земли. Один из двух фокусов эллипса, по которому движется небесное тело, совпадает с Землей.

Предположим, что движение центра масс КА в околоземном пространстве с достаточной степенью точности и адекватности описывается следующей

системой уравнений в относительной геоцентрической системе координат $OAXYZ$:

$$\frac{dx}{dt}=v_x,\ \frac{dv_x}{dt}=\left(\Omega_3^2+\frac{k_1}{r^2}\right)x+2\Omega_3 v_y,$$
$$\frac{dy}{dt}=v_y,\ \frac{dv_y}{dt}=\left(\Omega_3^2+\frac{k_1}{r^2}\right)y-2\Omega_3 v_x, \qquad (1)$$
$$\frac{dz}{dt}=v_z,\ \frac{dv_z}{dt}=\frac{k_2}{r^2}z,$$

где

$$k_1=-\alpha_{00}\frac{R}{r}-\frac{3}{2}\alpha_{20}\left(\frac{R}{r}\right)^3\left(5\frac{z^2}{r^2}-1\right),$$
$$k_2=-\alpha_{00}\frac{R}{r}-\frac{3}{2}\alpha_{20}\left(\frac{R}{r}\right)^3\left(5\frac{z^2}{r^2}-1\right),$$
$$\alpha_{00}=\frac{\pi_0}{R}\alpha_{20}=-\frac{\pi_2}{R^3},\ r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}.$$

Введем обозначения: π_0,π_2 – коэффициенты разложения потенциала ускорения силы притяжения Земли в ряд по сферическим функциям Лежандра; R – средний радиус Земли; Ω_3 – угловая скорость вращения Земли.

Пусть имеются также расчетные значения

$$x_0^p,\ y_0^p,\ z_0^p,\ v_{x_0}^p,\ v_{y_0}^p,\ v_{z_0}^p \qquad (2)$$

параметров движения, которые относятся к моменту времени t_0, соответствующему началу орбитального участка полета.

Расчетные сведения (2) могут быть заданы из априорных сведений или найдены как оценки в результате предварительного определения орбиты КА по достаточному количеству измерений [2; 4; 7].

В качестве измеряемых параметров рассмотрим наклонные дальности, измеряемые с трех радиолокационных станций, расположенных на поверхности Земли в точках $P_1(x_1,y_1,z_1),\ P_2(x_2,y_2,z_2),P_3(x_3,y_3,z_3)$ с известными координатами. Уравнения для определяемых параметров имеют вид

$$\rho_1=\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2};$$
$$\rho_2=\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2};$$
$$\rho_3=\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2}.$$

Предположим, что измерения всеми станциями производятся синхронно в дискретные моменты времени $t_i, i=1,2,...,N,$ с постоянным шагом Δt по времени. Результаты измерений определяются по формулам

$$z_{\rho_1}(t_i)=\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}+\Delta\rho_{1,i};$$
$$z_{\rho_2}(t_i)=\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2}+\Delta\rho_{2,i};$$
$$z_{\rho_3}(t_i)=\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2}+\Delta\rho_{3,i},$$

где $\Delta\rho_{1,i},\Delta\rho_{2,i},\Delta\rho_{3,i}$ – ошибки измерений.

Движение спутника будет определено в пространстве, если известны плоскость, в которой лежит его орбита, размеры и форма этой орбиты, ее ориентация в пространстве и момент времени, в который спутник находится в определенной точке орбиты. Чтобы охарактеризовать ориентацию орбиты в пространстве, нужно прежде всего задать базовую систему координат, начало которой совпадает с фокусом орбиты O (т. е. с центром Земли). За основную плоскость OXY, относительно которой определяется положение орбиты спутника, принимается плоскость экватора. Ось OX пересекает экватор в точке с долготой 0º, соответствующей Гринвичскому меридиану.

Если бы космический аппарат двигался в поле однородного шара, то остальные элементы орбиты не изменялись бы (за исключением, конечно, истинной аномалии). Однако возмущения, вызванные гравитационным полем Солнца и Луны, атмосферой и прочими причинами, изменяют движение спутника. Важнейшим из этих возмущений для орбит, близких к Земле, является возмущение, вызванное несферичностью Земли.

Решение этой задачи важно для предупреждения опасных ситуаций в космическом пространстве [7; 8]. В системе контроля космического пространства рассчитывается вероятность столкновения p_c при сближении двух объектов в будущем, по которой принимаются решения. При этом в подавляющей части случаев на самом деле столкновения не будет («ложная тревога») и поэтому эти меры будут излишними. Зато в тех исключительных случаях, когда столкновение должно было быть, они позволят избежать его. В этой ситуации надо стремиться к тому, чтобы ложных тревог было как можно меньше.

Современные средства обработки косвенных измерений позволяют получать результаты с очень высокой точностью до 10^{-6}. В работе [2] отмечено следующее: чтобы не потерять эту точность, нужно иметь возможность вычислять пространственные положения ИСЗ с методической точностью, по крайней мере в три раза превышающей точность наблюдений.

Следует отметить, что МНК является наиболее изученным среди всех методов оценивания результатов наблюдений. Это объясняется тем, что в ряде случаев механизм возникновения ошибок состоит в суммировании большого числа элементарных ошибок с приблизительно одинаковыми дисперсиями, что позволяет сделать предположение о нормальном законе распределения этих ошибок. Применение метода максимального правдоподобия для отыскания неизвестных параметров в этих условиях приводит к определенной вычислительной схеме – МНК.

Известно, что каждое косвенное измерение накладывает определенную связь (условие) на совокупность интересующих исследователя параметров $\theta_1,\theta_2,...,\theta_N$:

$$d_i=\xi_i(\theta_1,\theta_2,...,\theta_N)+\Delta_i,\ i=1,2,...,n, \qquad (3)$$

где d_i – результат i-го измерения, содержащий случайную ошибку; d_i – вектор размерности N, чаще всего делается несколько косвенных измерений; $\xi_i(\theta_1, ..., \theta_N)$ – некоторая известная векторная функция от неизвестных параметров; разность $\Delta_i = d_i - \xi_i(\theta_{1,\text{calc}}, \theta_{2,\text{calc}}, ..., \theta_{N,\text{calc}})$ – вектор невязки i-измерения. При вычислении невязки вместо разности компонент вектора состояния и вектора измерений подставляется разность между двумя вычисленными значениями вектора измерений. Совокупность всех уравнений типа (3) образует фундаментальную систему уравнений. Поскольку точность отдельных измерений и точность отображения реальных связей с помощью соотношения $\xi_i(\theta_1, ..., \theta_N)$ различны, то каждому уравнению ставят в соответствие некоторое число, определяющее его ценность и называемое весом данного уравнения.

Оценками, получаемыми методом наименьших квадратов (МНК-оценками), называется совокупность значений $\theta_1, \theta_2, ..., \theta_N$, обращающих в минимум взвешенную сумму квадратов невязок

$$\Phi(\theta_1, \theta_2, ..., \theta_N) = \sum_{i=1}^{n} p_i \left[d_i - \xi_i(\theta_1, \theta_2, ..., \theta_N) \right]^2 .$$

Для прямых измерений

$$\Phi(\theta_1, \theta_2, ..., \theta_N) = \sum_{i=1}^{n} p_i \left[d_i - \theta_i \right]^2 .$$

Если функции $\xi_i(\theta_1, \theta_2, ..., \theta_N)$ нелинейны, то производится их разложение в ряд Тейлора и отбрасывание членов второго и более высоких порядков. Тогда уравнения, входящие в фундаментальную систему, можно записать в виде

$$d_i = \xi_i(\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, ..., \theta_N^{(0)}) + \sum_{j=1}^{N} \left. \frac{\partial \xi_i}{\partial \theta_j} \right|_{\theta=\theta^{(0)}} \Delta\theta_j + \Delta_i .$$

Система уравнений для определения значений $\theta_1, \theta_2, ..., \theta_N$, содержащая N уравнений относительно N неизвестных, называется системой нормальных уравнений. Возможны различные варианты решения нормальной системы уравнений при ее линеаризации. Был выбран подход, хорошо изложенный в [13]. Основная линейная задача наименьших квадратов формулируется следующим образом.

Пусть даны действительная $(m \times n)$-матрица A ранга $k \le \min(m, n)$ и действительный m-вектор b. Найти действительный n-вектор x_0, минимизирующий евклидову длину вектора $Ax - b$.

Решение основано на представлении $(m \times n)$-матрицы A в виде произведения $A = HRK^T$, где H, K – ортогональные матрицы, R – блочно-диагональная матрица.

Применение метода МНМ основано на минимизации суммы модулей невязок вектора измерений.

Пусть требуется найти вектор Θ, который бы обращал в минимум выражение

$$H(\Theta) = H(\theta_1, \theta_2, ..., \theta_N) = \sum_{i=1}^{n_1} p_i \left| d_i - \xi_i(\theta_1, \theta_2, ..., \theta_N) \right|, \quad (4)$$

где n_1 – число измерений; d_i – k-мерный вектор измерений, чьи составляющие $d_{i1}, d_{i2}, ..., d_{ik}$ подвержены случайным ошибкам, которые будем считать некоррелированными; p_i – весовая матрица i-го измерения.

Если провести линеаризацию фундаментальной системы уравнений, то вместо (4) следует минимизировать выражение

$$\Phi(z) = \sum_{i=1}^{n_1} p_i \left| \delta d_i - \sum_{j=1}^{N} b_{ij} z_j \right|, \quad (5)$$

где $z_j = \Theta_j - \Theta_j^{(0)}$, $\delta d_i = d_i - \xi_i^{(0)}$, $b_{ij} = \left. \dfrac{\partial \xi_i}{\partial \Theta_j} \right|_{\Theta=\Theta^{(0)}}$.

Для минимизации выражения (5) можно применить два подхода. Первый из них связан с использованием идей линейного программирования, а второй – с использованием вариационно-взвешенных квадратических приближений [10], являющихся обобщением вычислительной схемы метода наименьших квадратов. Алгоритмы минимизации суммы модулей невязок, построенные на базе идей линейного и кусочно-линейного программирования, имеют одну привлекательную черту: они позволяют легко наложить на искомые оценки некоторые ограничения в виде неравенств, если заранее известно, что оценки не должны выходить за определенные пределы. Задача минимизации суммы модулей невязок представляет собой одну из самых простых задач кусочно-линейного программирования, когда отсутствуют какие-либо ограничения типа $g_i(z_1, z_2, ..., z_N) \le d_i$ на переменные z_i. Эта задача эквивалентна следующей задаче линейного программирования:

$$\Phi_i = \sum_{i=1}^{n} p_i (u_i + v_i), \quad (6)$$

$$\delta d_i - \sum b_{ij} z_j + u_i - v_i = 0, \; i = 1, 2, ..., n ,$$

$$z_j = z_j^{(1)} - z_j^{(2)}, \; j = 1, 2, ..., N; \; u_i \ge 0, \; v_i \ge 0, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, ..., n; \; z_j^{(1)} \ge 0, \; z_j^{(2)} \ge 0, \; j = 1, 2, ..., N.$$

Доказательство эквивалентности следует из того, что u_i, v_i одновременно не могут быть положительны, так как иначе выражение (6) могло бы быть уменьшено на величину $\delta_i = 2 p_i \min(u_i, v_i)$ без какого бы то ни было нарушения ограничений, входящих в (7). Поэтому

$$\left| \delta d_i - \sum_{j=1}^{N} b_{ij} z_j \right| = \left| u_i - v_i \right| = u_i + v_i$$

и решение системы неравенств (12), минимизирующее $\Phi_i = \sum_{i=1}^{n} p_i(u_i + v_i)$, одновременно минимизирует интересующую нас сумму модулей невязок.

Но вместе с тем рассматриваемые алгоритмы обладают существенным недостатком: при их использовании необходимо хранить в ходе вычислений помимо коэффициентов фундаментальной системы уравнений еще и объемные симплексные таблицы. Это очень затрудняет встраивание оценок метода наименьших квадратов в большие программы, составленные из нескольких модулей.

В работе [10] представлен способ, с помощью которого можно находить минимум суммы модулей невязок, действуя примерно так же, как при отыскании минимума суммы квадратов невязок. Это позволяет легко маневрировать методами обработки и использовать любой из них, не меняя характера алгоритма. Введем функцию от двух векторных аргументов

$$Q(z,v) = \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i^2 \left|d_i - \xi_i(z)\right|^2}{p_i \left|d_i - \xi_i(v)\right|}. \qquad (8)$$

Очевидно, что

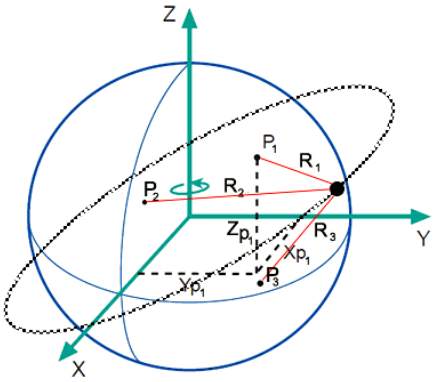
$$H(\Theta) = \sum_{i=1}^{n} p_i \left|d_i - \xi_i(\theta_1, \theta_2, ..., \theta_N)\right| = Q(\Theta, \Theta).$$

Пусть $\Theta^{(0)}$ – некоторое начальное приближение. Подставим в (8) вместо вектора v фиксированный вектор $\Theta^{(0)}$. Тогда $Q(\Theta, \Theta^{(0)})$ будет представлять собой квадратическую форму относительно вектора Θ. Вектор $\Theta^{(1)}$, обращающий в минимум форму $Q(\Theta, \Theta^{(0)})$, можно найти, используя вычислительную схему метода наименьших квадратов. Далее рассмотрим квадратическую форму $Q(\Theta, \Theta^{(1)})$ и найдем вектор $\Theta^{(2)}$, обращающий в минимум эту форму и т. д. Можно показать, что полученная таким образом последовательность векторов $\Theta^{(0)}, \Theta^{(1)}, ..., \Theta^{(s)}, ...$ сходится к вектору Θ^*, минимизирующему сумму модулей. Подстановка в выражение (8) вместо вектора v различных значений $\Theta^{(0)}, \Theta^{(1)}, ..., \Theta^{(s)}, ...$ приводит фактически к тому, что на каждом этапе вычислений векторов производится корректировка (вариация) весов, так что $W_i^{(s)} = \left[p_i \left|d_i - \xi_i(\Theta^{(s)})\right| \right]^{-1}$. Поэтому рассматриваемый метод получил название метода вариационно-взвешенных квадратических приближений.

Известно, что если функции $\xi_i(\Theta)$ нелинейны, то нахождение вектора Θ^* по методу наименьших квадратов связано с итерационной процедурой. Поэтому, если метод вариационно-взвешенных квадратических приближений реализовать в таком виде, как описано, то для нахождения каждого из векторов $\Theta^{(0)}, \Theta^{(1)}, ..., \Theta^{(s)}, ...$ потребовалось бы несколько итераций, т. е. в общей сложности время счета должно было возрасти в несколько раз.

Но оказывается, что вовсе необязательно минимизировать форму $Q(\Theta, \Theta^{(r)})$ по Θ. Достаточно получить хотя бы один вектор $\Theta^{(r+1)}$ такой, что $Q(\Theta^{(r)}, \Theta^{(r)}) > Q(\Theta^{(r+1)}, \Theta^{(r)})$, и процедуру отыскания последовательности векторов $\Theta^{(r+2)}, \Theta^{(r+3)}, ...$, сходящихся к искомому вектору Θ_n, можно продолжить. В результате такого совмещения время счета по схеме вариационно-взвешенных квадратических приближений оказывается примерно таким, как и при реализации метода наименьших квадратов. Если же функции ξ_i являются линейными, то время счета по схеме вариационно-взвешенных квадратических приближений всегда существенно возрастает по сравнению со временем счета по схеме наименьших квадратов.

Для сравнения алгоритмов этих подходов моделируются различные варианты получения радиолокационных измерений в задаче вычисления положения искусственного спутника Земли при ограничениях на ошибки измерений, отличающихся между собой числом проходов космического объекта через зону одного или нескольких радаров (см. рисунок). Модель движения задана системой (1) [3; 14].



Вычисление положения ИЗС

Рассмотрим несколько генеральных совокупностей, подчиняющихся каждая своему распределению, и следующую двухэтапную схему. Сначала мы выбираем совокупность, которой будет принадлежать очередное наблюдение, затем производим наблюдение. Если «потерять» информацию из первого этапа – «забыть» совокупность, к которой принадлежит каждое наблюдение, распределение полученной выборки окажется смесью распределений. Распределение вероятностей совокупностей, а также параметры каждого отдельного распределения вместе называются параметрами смеси. В оценках, построенных по методу наименьших квадратов, уточняются все параметры состояния системы и используется вся имеющаяся априорная и апостериорная информация.

Большая полнота сведений о погрешностях исходных данных, используемых при построении алгоритма

фильтрации по методу наименьших квадратов, обеспечивает преимущество метода наименьших квадратов по сравнению с методом минимакса. Однако в том случае, когда эти сведения оказываются ошибочными, использование метода наименьших квадратов может привести к неоправданно оптимистическим оценкам точности получаемых результатов, а также к ошибкам при выборе оптимальной стратегии. Этот недостаток МНК усиливается по мере возрастания числа оцениваемых параметров и количества используемых измерений.

С другой стороны, метод минимакса требует для своего осуществления значительно меньших сведений об ошибках исходных данных и обеспечивает гарантированную оценку точности получаемых результатов (табл. 1). Однако находимые в результате значения максимальных ошибок оценок параметров системы или их максимальных дисперсий часто оказываются сильно завышенными, так как их определение базируется на допущении о практически невероятном сочетании различных погрешностей исходных данных (табл. 2).

Таблица 1

Улучшение оценок параметров при сложных распределениях ошибок за счет использования МНМ

Параметры	Относительное улучшение точности оценки МНМ по сравнению с МНК для сложного распределения, %
X	6,23
Y	78,15
Z	81,46
V_x	40,96
V_y	76,55
V_z	96,34

Таблица 2

Точность оценок параметров движения при равномерном распределении ошибок измерений в пределах 50 м

Параметры	Итоговая точность оценки, м	
	Метод	
	МНК	МНМ
X	–0,433	–1,42
Y	1,343	3,72
Z	–2,917	–6,1
V_x	–0,009	–0,008
V_y	–0,058	–0,084
V_z	0,05	0,077

Эти результаты позволяют сделать несколько практических рекомендаций. Измерители наклонной дальности должны располагаться в углах треугольника, лежащего на поверхности Земли и близкого к равностороннему. Величины этих сторон должны быть выбраны такими, чтобы линии визирования, исходящие из точек стояния измерителей и направленные в среднюю точку мерного интервала траектории, образовали попарно прямые углы. Для случаев, когда данные получены с ошибками и информация об этом неполна, эффективно использовать алгоритм вариационно-взвешенных квадратических приближений.

Библиографические ссылки

1. Бордовицына Т. В. Современные численные методы в задачах небесной механики. М. : Наука, 1984.

2. Бордовицына Т. В., Авдюшев В. А. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы : учеб. пособие. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2007.

3. Дубошин Г. Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М. : Наука, 1968.

4. Эльяберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. М. : Наука, 1976.

5. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М. : Физматгиз, 1962.

6. Губанов В. С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии. СПб. : Наука, 1997.

7. Самотохин А. С., Хуторовский З. Н. Определение прогнозного положения ИСЗ при ограниченных ошибках измерений // Космич. исслед. 2011. Т. 49. № 6. С. 526–537.

8. Черницов А. М., Тамаров В. А. Определение допустимого уровня систематических ошибок наблюдения при построении областей возможных движений малых тел // Изв. вузов. Физика. Прил. Небесная механика и прикл. астрономия. Томск, 2006. Т. 49, № 2. С. 75–81.

9. Лидов М. Л. Минимаксные методы оценивания [Электронный ресурс] // Препр. ИПМ им. М. В. Келдыша. 2010. № 71. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp (дата обращения: 12.12.2012).

10. Мудров В. И., Кушко В. Л. Методы обработки измерений. Квазиправдоподобные оценки. М. : Радио и связь, 1983.

11. Rogalyov A. N. Computation of reachable sets guaranteed bounds // Proc. of the IASTED Intern. Conf. on Automation, Control, and Information Technology – Control, Diagnostics, and Automation. Calgary, 2010. P. 132–139.

12. Рогалев А. Н. Вопросы реализации гарантированных методов включения выживающих траекторий управляемых систем // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 2(35). С. 54–58.

13. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач наименьших квадратов. М. : Наука, 1986.

14. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М. : Сов. радио, 1978.

A. N. Rogalyov, A. A. Rogalyov

NUMERICAL COMPUTATIONS FOR ARTIFICIAL EARTH SATELLITE POSITION UNDER RESTRICTIONS ON MEASUREMENTS ERRORS

The application of the least squares and minimax methods for near-earth space object position identification under known restrictions on the measurement errors is considered in this article.

The computational schemes being used for a space object trajectories parameters evaluating under different measurement errors are studied.

The given algorithms accuracy characteristics under different measurement errors distributions are determined. The results of the computations are presented.

Keywords: method of the least squares, minimax method, motion trajectory identification, data filtering.

© Рогалев А. Н., Рогалев А. А., 2012

УДК 517.95

С. И. Сенашов

О СИСТЕМАХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С ДВУМЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Показано, что система m (m > 2) квазилинейных дифференциальных уравнений от двух переменных, имеющая две характеристики, сводится к системе двух квазилинейных уравнений и системе m – 2 линейных уравнения.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения в частных производных первого порядка, гиперболические системы, две характеристики.

Рассмотрим систему дифференциальных квазилинейных уравнений первого порядка

$$a_{ij}(\bar{u})\partial_x u^j + b_{ij}(\bar{u})\partial_y u^j = 0, \quad i, j = 1,...,m, \qquad (1)$$

где $\bar{u} = (u^1, ..., u^m)$.

Пусть система (1) имеет только две характеристики

$$\frac{dy}{dx} = A(\bar{u}), \qquad \frac{dy}{dx} = B(\bar{u}),$$

а также m инвариантов Римана $\xi^1, ..., \xi^m$.

В этом случае система (1) может быть записана в виде

$$\frac{\partial \xi^1}{\partial x} + A(\xi^1,...,\xi^m)\ \frac{\partial \xi^1}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \xi^2}{\partial x} + B(\xi^1,...,\xi^m)\ \frac{\partial \xi^2}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \xi^i}{\partial x} + C(\xi^1,...,\xi^m)\ \frac{\partial \xi^i}{\partial y} = 0, \quad i = 3, ..., m,$$

где C равно либо A, либо B.

Для простоты рассмотрим случай $m = 4$, который часто встречается, например, в теории пластичности.

Имеем

$$\frac{\partial \xi^1}{\partial x} + A(\xi^1, ..., \xi^4)\ \frac{\partial \xi^1}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \xi^2}{\partial x} + B(\xi^1, ..., \xi^4)\ \frac{\partial \xi^2}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \xi^3}{\partial x} + A(\xi^1, ..., \xi^4)\ \frac{\partial \xi^3}{\partial y} = 0, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \xi^4}{\partial x} + B(\xi^1, ..., \xi^4)\ \frac{\partial \xi^4}{\partial y} = 0.$$

Умножим первое уравнение системы на $\frac{\partial \xi^3}{\partial y}$, а третье на $-\frac{\partial \xi^1}{\partial y}$ и сложим их. В результате получим

$$\frac{\partial \xi^3}{\partial y}\ \frac{\partial \xi^1}{\partial x} - \frac{\partial \xi^1}{\partial y}\ \frac{\partial \xi^3}{\partial x} = 0.$$

Это означает, что якобиан преобразования $J = \frac{\partial(\xi^1, \xi^3)}{\partial(x, y)} = 0.$

Следовательно, ξ^3 есть некоторая функция от ξ^1.

Аналогично из второго и третьего уравнений получаем, что ξ^4 есть некоторая функция от ξ^2.

Поэтому

$$A(\xi^1,...,\xi^4) = \bar{A}(\xi^1,\xi^2), \qquad B(\xi^1,...,\xi^4) = \bar{B}(\xi^1,\xi^2).$$

Отсюда получаем, что система уравнений

$$2\frac{\partial \xi^1}{\partial y}=0,$$

$$\frac{\partial \xi^2}{\partial x}+\overline{B}(\xi^1,\xi^2)\ \frac{\partial \xi^2}{\partial y}=0,$$

$$\frac{\partial \xi^3}{\partial x}+\overline{A}(\xi^1,\xi^2)\ \frac{\partial \xi^3}{\partial y}=0,$$

$$\frac{\partial \xi^4}{\partial x}+\overline{B}(\xi^1,\xi^2)\ \frac{\partial \xi^4}{\partial y}=0.$$

В результате получаем следующее утверждение: система m уравнений с двумя характеристиками сводится к двум квазилинейным уравнениям и к $m-2$ линейным уравнениям.

Первые два уравнения можно решить, используя законы сохранения, как это описано, например, в [1]. Остальные уравнения решаются традиционными методами.

В качестве примера рассмотрим уравнения идеальной пластичности

$$\begin{gathered}\frac{\partial \sigma}{\partial x}-2k_s\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\cos 2\theta+\frac{\partial \theta}{\partial y}\sin 2\theta\right)=0,\\ \frac{\partial \sigma}{\partial y}-2k_s\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\sin 2\theta-\frac{\partial \theta}{\partial y}\cos 2\theta\right)=0,\\ \frac{\dfrac{\partial u}{\partial x}-\dfrac{\partial v}{\partial y}}{\dfrac{\partial u}{\partial y}+\dfrac{\partial v}{\partial x}}=\operatorname{tg}2\theta,\ \frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0,\end{gathered}\qquad (3)$$

где σ – гидростатическое давление; $\theta=(1,x)-\dfrac{\pi}{4}$, где $(1,x)$ – угол между главным направлением тензора напряжений и осью ox; u, v – компоненты вектора скорости.

Система уравнений (3) имеет две характеристики и четыре соотношения на них:

$$\frac{dy}{dx}=\operatorname{tg}\theta,\quad \frac{dy}{dx}=-\operatorname{ctg}\theta,\quad d\sigma\mp 2kd\theta=0,$$

$$\frac{du}{dv}=-\operatorname{tg}\theta,\qquad \frac{du}{dv}=\operatorname{ctg}\theta.$$

В результате преобразований система приводится к известному виду. Здесь мы использовали тот факт, что инварианты Римана ξ^3,ξ^4 зависят от ξ,η, а, следовательно, от них зависят и компоненты вектора скорости. Так получены два последних уравнения

$$\frac{\partial \xi}{\partial x}+\frac{\partial \xi}{\partial y}\operatorname{tg}\theta=0,\quad \frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{\partial \eta}{\partial y}\operatorname{ctg}\theta=0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial \xi}+\frac{\partial v}{\partial \xi}\operatorname{tg}\theta=0,\quad \frac{\partial u}{\partial \eta}-\frac{\partial v}{\partial \eta}\operatorname{ctg}\theta=0,$$

где

$$\xi=\sigma+2k_s\theta,\quad \eta=\sigma-2k_s\theta.$$

Рассмотренный пример показывает, что можно выписать линейную систему уравнений, даже если не удается проинтегрировать два последних соотношений на характеристиках.

Библиографическая ссылка

1. Киряков П. П., Сенашов С. И., Яхно А. Н. Приложение симметрий и законов сохранения к решению дифференциальных уравнений. Новосибирск : Наука, 2001.

S. I. Senashov

ABOUT SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH TWO CHARACTERISTICS

The author shows that the system m (m> 2) of quasi-linear differential equations, derived from two variables and having two characteristics, is reduced to a system of two quasilinear equations and m-2 linear equation system.

Keywords: partial differential equations of the first order, hyperbolic systems, two characteristics.

© Сенашов С. И., 2012

УДК 681.34

Р. Ю. Царев, Д. В. Капулин, Д. В. Машурова, Я. А. Тынченко, Д. Н. Ковтанюк

МНОГОАТРИБУТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ГАРАНТОСПОСОБНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ*

Представлена модель формирования гарантоспособной системы управления и обработки информации. Предложена соответствующая итерационная процедура. Описана программная система многоатрибутивного выбора компонентов гарантоспособной системы управления и обработки информации.

Ключевые слова: система управления и обработки информации, оптимизация, гарантоспособность.

Создание новых и совершенствование существующих систем управления и обработки информации требует решения ряда задач, связанных с формированием структуры систем, а также перечнем функций, которые должны выполнять системы в соответствии с выбранным принципом построения [1; 2].

На сегодняшний день актуальна проблема обеспечения заданного уровня надежности при формировании структуры систем управления и обработки информации с учетом ряда технико-экономических требований [3].

Для обеспечения гарантированной работоспособности систем управления и обработки информации требуется высоконадежное отказоустойчивое функционирование как программных, так и аппаратных средств системы [4]. Реализация механизмов аппаратной и программной отказоустойчивости возможна благодаря использованию программной избыточности и аппаратного резервирования элементов подсистем.

Внедрение дополнительных избыточных элементов в структуру систем управления и обработки информации требует разработки программно-алгоритмических средств формирования оптимального состава систем и планирования оптимального развития структуры систем на различных этапах их жизненного цикла и с учетом динамики функционирования.

Постановка задачи. Рассмотрим систему управления и обработки информации, которая состоит из ряда подсистем. Отказ любой из подсистем приводит к отказу всей системы в целом. Каждая из подсистем может быть реализована несколькими способами, характеризующимися различными значениями параметров надежности, стоимости, ресурсоемкости и т. п. Требуется определить вариант реализации системы управления и обработки информации, т. е. выбрать конфигурацию элементов каждой подсистемы, которая доставляет экстремум некой целевой функции и обеспечивает успешное решение всех задач, поставленных перед системой управления и обработки информации, с вероятностями не ниже заданных ограничений. При этом затраты также не должны превосходить заданных границ.

Метод решения. Математическая модель задачи формирования системы управления и обработки информации имеет следующий вид: определить вариант v_0, доставляющий максимум целевой функции

$$P(v) = \prod_{j=1}^{n} P_j(u_{j(lj)}) \qquad (1)$$

при наличии ограничений

$$g_p(v) = \sum_{j=1}^{n} g_p(u_{j(lj)}) \le g_p^*,\ p = 1, \ldots, q; \qquad (2)$$

$$g_p(v) = \sum_{j=1}^{n} g_p(u_{j(lj)}) \ge g_p^*,\ p = q+1, \ldots, Q;$$

$$v \in V,\ u_j(l_j) \in U_j,\ j = 1, \ldots, n, \qquad (3)$$

где $u_j(l_j)$ – способ реализации j-й подсистемы; $U_j = \{u_j(1), \ldots, u_j(l_j), \ldots, u_j(l_j),\ j = 1, \ldots, n$ – совокупность всех элементов, которые могут быть использованы в j-й подсистеме, количество элементов во множестве U_j равно ξj; v – текущий вариант системы управления и обработки информации; $V = \prod_{j=1}^{n} U_j$; $P_j(u_j(l_j))$ – надежность (вероятность безотказной работы на заданном интервале времени) элемента l_j-го типа j-й подсистемы; $g_p(u_j(l_j))$ – значение p-го ограничивающего фактора для элемента l_j-го типа j-й подсистемы; $g_p(v)$ – количество p-го ограничивающего фактора, израсходованного на всю систему; g_p* – максимально возможное количество p-го ограничивающего фактора для всей системы в целом.

Задачи (1)–(3) эквивалентны следующей задаче: найти максимум

$$f(v) = \sum_{j=1}^{n} f_j(u_{j(lj)}) \qquad (4)$$

при наличии ограничений (2) и (3), где $f_j(u_j(l_j)) = \lg P_j(u_j(l_j))$.

Таким образом, задача оптимального формирования системы управления и обработки информации по критерию надежности сводится к задаче вида (2)–(4).

Если результат решения задачи оптимального формирования неудовлетворителен (т. е. полученная надежность системы управления и обработки информации мала), но используемые ресурсы исчерпаны не полностью, то необходимо прибегнуть к резервированию элементов подсистемы, понимая под этим следующее.

* Исследования выполнены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Если произведено резервирование в j-й подсистеме, и она содержит $\lambda_j + 1$ элементов (λ_j резервных и один основной), то выход из строя подсистемы происходит при выходе из строя всех $\lambda_j + 1$ элементов (так называемое «параллельное резервирование»).

Рассмотрим задачу повышения надежности формируемой системы управления и обработки информации путем резервирования. При этом по мере рассмотрения допустимых значений технико-экономических параметров элементов подсистем будут отсеяны типы элементов, которые учитывать в дальнейшем нет необходимости. В частности, это делается при построении вариантов системы управления и обработки информации с резервированием [5]. Перенумеруем оставшиеся элементы во множествах U_j ($j = 1, ..., n$) после отсева их по ограничениям (2) и (3), так что $U'_j = \{u_j(1), \ldots, u_j(l_j), \ldots, u_j(\xi_j)\}$, где $\xi'_j \le \xi_j$ ($j = 1, ..., n$).

Для построения вариантов подсистем с резервированием определим максимальный $\lambda^*_j(l_j)$ и минимальный $\lambda^{**}_j(l_j)$ объем избыточности (соответственно, максимальное и минимально возможное число резервных элементов) для l_j-го типа j-й подсистемы. При этом будем использовать постоянные для каждой подсистемы величины:

$$\Delta g_p^j = g_p^* - g_p(v^p_{v(l)} / U_j), \quad p = 1, ..., Q, j = 1, \ldots, n.$$

При этом максимальный объем избыточности $\lambda^*_j(l_j)$ для каждого элемента, вошедшего во множество U'_j, определим следующим образом:

$$\lambda^*_{j(lj)} = \min_{p=1,\ldots,q} \left[\frac{\Delta g_p^j}{g_p(u_{j(lj)})} - 1 \right], \qquad (5)$$

где через $[a]$ обозначена целая часть a.

Минимальный объем избыточности $\lambda^{**}_j(l_j)$ для каждого элемента, вошедшего во множество U'_j, определяется по формуле

$$\lambda^{**}_{j(lj)} = \max_{p=q+1,\ldots,Q} \left[\frac{\Delta g_p^j}{g_p(u_{j(lj)})} - 1 \right]. \qquad (6)$$

Несмотря на то что можно положить $\lambda^{**}_j(l_j) = 0$, для уменьшения множества возможных вариантов реализации системы управления и обработки информации с резервированием желательно получить число различных объемов избыточности $|\lambda_j(l_j)| = \lambda^*_j(l_j) - \lambda^{**}_j(l_j) + 1$ как можно меньшим.

В случае когда ограничения на минимально допустимые значения вероятности отсутствуют, минимальный объем избыточности можно определить следующим способом. Будем прибавлять в j-й подсистеме по одному элементу того типа, который имеет максимальную надежность, до тех пор пока при добавлении очередного элемента не произойдет нарушения хотя бы одного из ограничений. Если же ограничения нарушаются сразу, то рассматривается следующий по надежности тип элементов.

Вычислим значение надежности для построенной таким образом системы:

$$P^* = \prod_{k=1}^{n} (1 - (1 - P_j(u_{k(lk)})))^{\lambda_{k(lk)}+1},$$

где $P_j(u_k(l_k))$, $k \ne j$ – максимально возможная надежность, которой обладает один из типов элементов, использующийся в k-й подсистеме; $P_j(u_j(l_j))$ – надежность элемента l_j-го типа, использующегося в j-й подсистеме; $\lambda_j(l_j)$ – количество резервных элементов l_j-го типа j-й подсистемы.

Из выражения $P^* \le 1 - (1 - P_j(u_j(l_j)))\lambda^{**j(lj)+1}$ можно определить $\lambda^{**}_{j(lj)}$ – минимально возможное количество резервных элементов, необходимых для достижения надежности, равной P^* или более. Ясно, что максимум надежности будет достигаться для величин $\lambda_{j(lj)}$, которые, по крайней мере, не меньше полученных величин $\lambda^{**}_{j(lj)}$.

Если определенная таким образом или по формуле (6) минимальная глубина объема избыточности равна $\lambda^{**}_{j(lj)}$ хотя бы для одного $j = 1, ..., n$, то максимальный объем избыточности $\lambda^*_{j(lj)}$, определяемый по формуле (5), может быть уточнен выражением

$$\bar{\lambda}^*_{j(lj)} = \min_{p=1,\ldots,q} \left[\frac{g_p^* - \sum_{k=1, k\ne j}^{n} (\lambda^{**}_{k(lk)} + 1) g_p(u_{k(lk)})}{g_p(u_{k(lk)})} - 1 \right].$$

Видно, что $\bar{\lambda}^*_{j(lj)} < \lambda^*_{j(lj)}$. Аналогично можно уточнить минимальный объем избыточности, определяемый формулой (6), при помощи известного максимального объема избыточности $\lambda^*_{j(lj)}$.

Запишем математическую модель задачи оптимального «параллельного» резервирования:

$$P(v) = \prod_{j=1}^{n} P_j(u^{\lambda j(lj)}_{j(lj)}) \to \max \qquad (7)$$

при наличии ограничений

$$g_p(v) = \sum_{j=1}^{n} g_p(u^{\lambda j(lj)}_{j(lj)}) \le g_p^*, \; p = 1, \ldots, q, \qquad (8)$$

$$g_p(v) = \sum_{j=1}^{n} g_p(u^{\lambda j(lj)}_{j(lj)}) \ge g_p^*, \; p = q+1, \ldots, Q, \qquad (9)$$

$$v \in V'' = \prod_{j=1}^{n} U''_j, u^{\lambda j(lj)}_{j(lj)} \in U''_j, \; j = 1, \ldots, n, \qquad (10)$$

где наличие в варианте системы управления и обработки информации $v = (u^{\lambda 1(l1)}_{1(l1)}, ..., u^{\lambda j(lj)}_{j(lj)}, ..., u^{\lambda n(\ln)}_{n(\ln)})$ переменной $u^{\lambda j(lj)}_{j(lj)} \in U''_j$ означает, что в выбранном варианте в j-й подсистеме в качестве основного и резервных элементов выбраны элементы l_j-го типа, и выбранный объем избыточности равен $\lambda_{j(lj)} (\lambda^{**}_{j(lj)} \le \lambda_{j(lj)} \le \lambda^*_{j(lj)})$.

В ограничениях (8) и (10) слагаемые в левых частях, определяющие значение p-го ограничивающего фактора для j-й подсистемы для основного и резервных элементов, примут вид

$$g_p(u^{\lambda j(lj)}_{j(lj)}) = (\lambda_{j(lj)} + 1) g_p(u_{j(lj)}).$$

Вероятность безотказной работы j-й подсистемы в выражении (7) определяется в виде

$$P_j(u_{j(lj)}^{\lambda j(lj)}) = 1-(1-P_j(u_{j(lj)}))^{\lambda j(lj)+1}.$$

Множество возможных вариантов реализации j-й подсистемы с резервированием имеет вид

$$U_j'' = \{u_{j(lj)}^{\lambda j(lj)} \mid l_j = 1, ..., \xi_j';\ \lambda_{j(lj)} = \lambda_{j(lj)}^{**}, ..., \lambda_{j(lj)}^{*}\},$$
$$j = 1,\ldots, n,$$

число элементов в этом множестве

$$|U_j''| = \prod_{j=1}^{n}\sum_{l_j=1}^{\xi_j}(\lambda_{j(lj)}^{*} - \lambda_{j(lj)}^{**} + 2).$$

Представим задачу формирования системы управления и обработки информации следующим образом: максимизировать $f(\bar{v}) = \sum_{j=1}^{n} f_j(\bar{u}_{j(tj)})$ при условиях

$$g_p(\bar{v}) = \sum_{j=1}^{n} g_p(\bar{u}_{j(lj)}^{\lambda j(lj)}) \le g_p^{*},\ p = 1, \ldots, q;$$

$$g_p(\bar{v}) = \sum_{j=1}^{n} g_p(\bar{u}_{j(lj)}^{\lambda j(lj)}) \ge g_p^{*},\ p = q+1, \ldots, Q;$$

$$\bar{v} \in \bar{V} = \prod_{j=1}^{n} \bar{U}_j, \bar{u}_{j(lj)}^{\lambda j(lj)} \in \bar{U}_j,\ j = 1, \ldots, n,$$

где $f(v) = lgP(v)$; $\bar{U}_j = \{\bar{u}_{j(tj)} \mid t_j = 1, ..., \sum_{l_j=1}^{\xi_j}(|\lambda_{j(lj)}|+1)\}$ – множество возможных вариантов j-й подсистемы; $|\bar{U}_j| = |U_j''|, |\bar{V}| = |V''|$.

Эта задача эквивалентна задаче (7)–(10), поскольку логарифм является монотонным преобразованием. Введение множеств $\bar{U}_j$ является просто результатом замены переменной $u_{j(lj)}^{\lambda j(lj)}$ на $\bar{u}_{j(tj)}$ с соответствующим изменением множества значений.

Таким образом, имея целевую функцию и ограничения, можно перейти к формированию оптимальной системы управления и обработки информации. Оптимизация происходит по критерию надежности, тогда как на все оставшиеся технико-экономические параметры накладываются ограничения. Ограничение на систему в целом: $g_p(v) \le g_p^{*}(v)$, где p – критерий, на который накладываются ограничения.

Одним из подходов к решению проблемы выбора является следующая итерационная процедура.

Поочередно производится отсев по каждому из критериев. Для этого, рассматривая каждый критерий, для каждой из n подсистем упорядочим все ξ_j типы элементов по возрастанию, согласно значениям рассматриваемого критерия.

Сумма первых значений упорядоченных типов элементов представляет необходимый минимум ресурсов для формирования системы управления и обработки информации. Очевидно, что эта сумма должна быть меньше ограничения на текущий критерий как необходимое условие существования допустимых решений.

Следующим шагом является определение «допуска» для каждой подсистемы, он вычисляется по формуле $\Delta g_p^{\,j} = g_p^{\,*} - g_p^{\,s}$, где $g_p^{\,s}$ – сумма элементов первого столбца. Все элементы j-й подсистемы, превосходящие значение «допуска», отбрасываются и в дальнейшем уже не рассматриваются. Рассмотрев все критерии, выполняем следующую итерацию.

Процедура заканчивается, когда отсева элементов больше не происходит.

Однако может случиться и так, что все элементы будут отброшены. В этом случае необходимо расширить наложенные на систему ограничения или использовать менее ресурсоемкие элементы в подсистемах.

Резервирование элементов происходит с учетом объема избыточности, что приведет к повышению надежности создаваемой системы управления и обработки информации. Максимизируемая целевая функция будет иметь вид

$$f(v) = \sum_{j=1}^{n}(c_0 \lg P_j + c_1),$$

где P_j – надежность j-й подсистемы; c_0, c_1 – константы ($c_0 > 0$), значения которых можно выбрать из соображений удобства вычисления.

Завершающий этап предлагаемого метода – поиск оптимального решения. При нахождении решения используются элементы подсистем с учетом объема избыточности и целевой функции.

Применяется итерационная процедура, предложенная выше. Однако прежде рассмотрения допустимости по критериям рассматривается ограничение на целевую функцию. Это ограничение не задано жестким образом, а находится на каждой итерации по формуле

$$f(v) \ge f_i^{*} = \frac{f_{\max} + f_{i-1}^{*}}{2},$$

для первой итерации $f_{i-1}^{*} = f_{\min}$, где $f_{\max}, f_{\min}$ – соответственно сумма максимальных и минимальных для каждой подсистемы значений целевой функции.

Вычисления заканчиваются, когда прекращается отсев, т. е. найдено оптимальное решение, или же когда все элементы какой-либо подсистемы отброшены. Во втором случае приходится расширить ограничение на целевую функцию. Решением будет являться результат, полученный на последней итерации.

Экспериментальная часть. С использованием предложенных подходов и моделей разработана программная система многоатрибутивного выбора компонентов гарантоспособной системы управления и обработки информации. Гарантоспособность системы обеспечивается применением мультиверсионной методологии при реализации отдельных элементов подсистем [6]. Благодаря использованию данной программной системы автоматизируется процесс выбора лучшего варианта реализации гарантоспособной системы из множества предложенных вариантов (рис. 1).

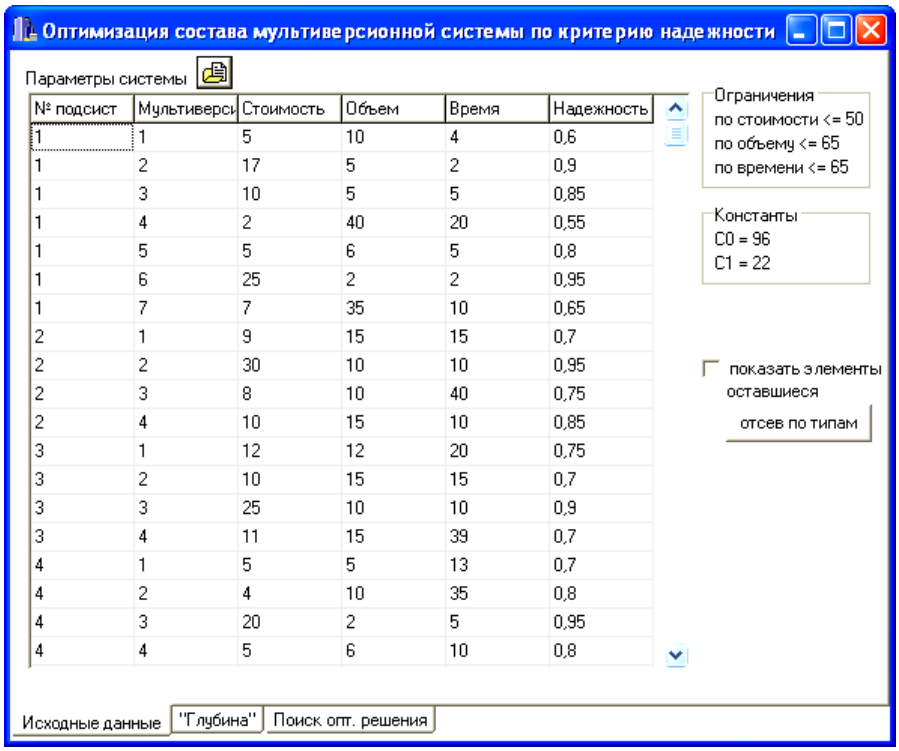


Рис. 1. Главное окно программной системы многоатрибутивного выбора компонентов гарантоспособной системы управления и обработки информации

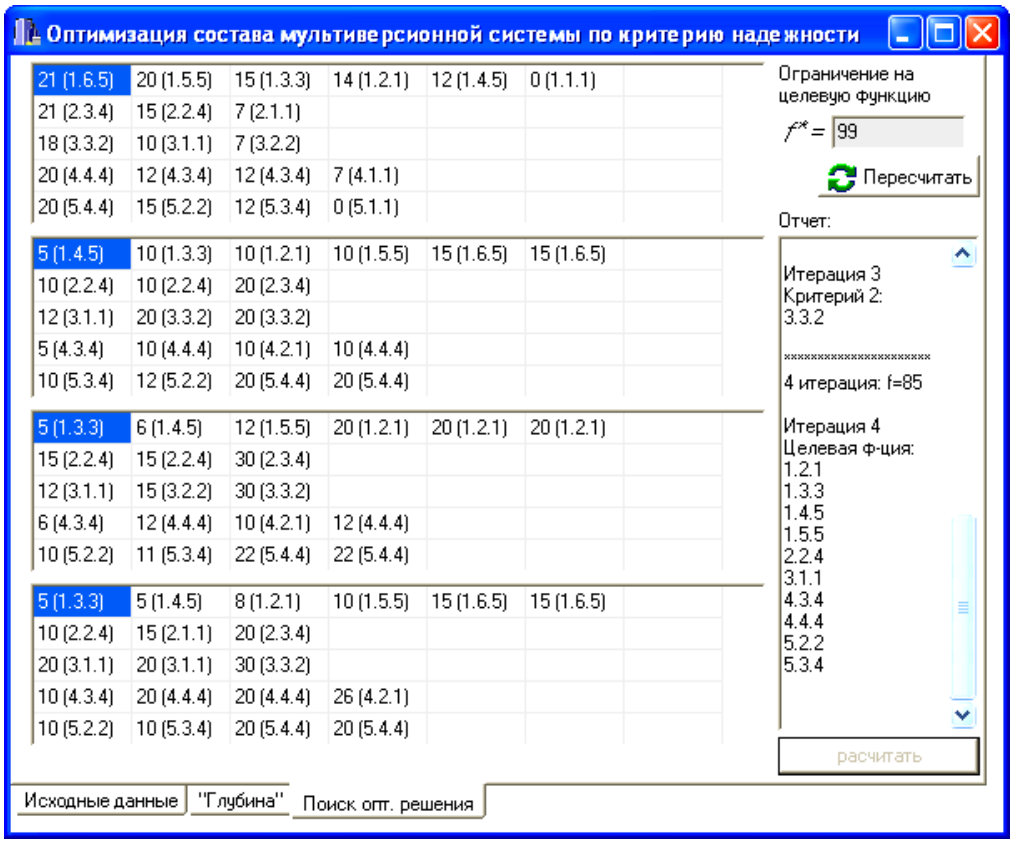


Рис. 2. Выбор компонентов гарантоспособной системы управления и обработки информации с оптимальной избыточностью

Протокол выбора компонентов программной системы многоатрибутивного выбора компонентов гарантоспособной системы управления и обработки информации представлен на рис. 2 в части окна с заголовком «Отчет».

В верхней правой части окна (см. рис. 2) приведено значение надежности формируемой системы управления и обработки информации, которая выступает ограничением при выборе компонентов.

Таким образом, в данной статье выполнена формализация постановки задачи формирования оптимальной структуры системы управления и обработки информации. Согласно данной формализации, при развитии системы управления и обработки информации обеспечивается повышение уровня ее надежности за счет резервирования элементов отдельных подсистем при условии, что ресурсы использованы не полностью.

В результате теоретических исследований, проведенных при тестировании программного комплекса, подтверждена высокая эффективность мультиверсионной методологии при разработке гарантоспособных систем управления и обработки информации и целесообразность ее применения в таких критичных областях, как космические системы, распределенные вычисления, а также управление и обработка информации.

Результаты работы позволят решать задачи по формированию и развитию структуры систем управления и обработки информации, обеспечивающей гарантоспособность функционирования систем данного класса.

Библиографические ссылки

1. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В. В. Кульба, Е. А. Микрин, Б. В. Павлов, В. Н. Платонов. М. : Наука, 2006.

2. Синтез и управление развитием кластерных структур АСУ космических систем / Р. Ю. Царев, Д. В. Капулин, А. В. Штарик, Е. Н. Штарик // Вестник СибГАУ. 2012. № 2 (42). С. 80–84.

3. Оценка транзакционной надежности современных систем управления и обработки информации / Р. Ю. Царев, А. В. Штарик, Е. Н. Штарик, О. И. Завьялова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 6. С. 29–32.

4. Антамошкин А. Н., Колташев А. А. Технологические аспекты создания бортового программного обеспечения спутников связи // Вестник СибГАУ. 2005. Вып. 3. С. 93–95.

5. Практическая реализация надежностного анализа архитектуры программной системы / Е. В. Гражданцев, М. А. Русаков, О. И. Завьялова, Р. Ю. Царев // Вестник СибГАУ. 2008. Вып. 1 (18). С. 37–40.

6. Оценка времени выполнения мультиверсионных программ на кластере с последовательной и параллельной архитектурой обмена данными / И. В. Ковалев, П. В. Ковалев, В. С. Скориков, С. Н. Гриценко // Вестник СибГАУ. 2009. Вып. 2 (23). С. 79–83.

R. Yu. Tsarev, D. V. Kapulin, D. V. Mashurova, Ya. A. Tynchenko, D. N. Kovtanyuk

MULTIPLE ATTRIBUTE COMPOSITION OF DEPENDABLE CONTROL AND DATA PROCESSING SYSTEMS

The article presents a model of composition of dependable control and data processing system. An iterative procedure of dependable system composition is proposed. Software system of multiple attribute of choice of components of dependable control and data processing system is presented.

Keywords: control and data processing system, optimization, dependability.

© Царев Р. Ю., Капулин Д. В., Машурова Д. В., Тынченко Я. А., Ковтанюк Д. Н., 2012

УДК 519. 95

Т. К. Юлдашев

О СЛАБОЙ РАЗРЕШИМОСТИ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ С ПСЕВДОПАРАБОЛИЧЕСКИМ ОПЕРАТОРОМ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ

Изучаются вопросы слабой разрешимости смешанной задачи для нелинейного дифференциального уравнения с псевдопараболическим оператором произвольной натуральной степени.

Ключевые слова: слабая разрешимость, интегральное тождество, счетная система нелинейных интегральных уравнений, метод последовательных приближений.

В области D рассматривается уравнение

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}+(-1)^m \nu \frac{\partial^{2m+1}}{\partial t\,\partial x^{2m}}+\nu\mu\,\frac{\partial^{4m+1}}{\partial t\,\partial x^{4m}}+\frac{\partial^{4m}}{\partial x^{4m}}\right)^n \times u(t,x)=f\left(t,x,u(t,x)\right) \quad (1)$$

с начальными

$$u(t,x)_{|t=0}=\varphi_1(x),$$
$$\frac{\partial^{j-1}}{\partial t^{j-1}}u(t,x)_{|t=0}=\varphi_j(x),\ \ j=\overline{2,n} \quad (2)$$

и граничными условиями

$$\begin{aligned} & u(t,x)_{|x=0} = u_{xx}(t,x)_{|x=0} = \ldots \\ & = \frac{\partial^{2(2nm-1)}}{\partial x^{2(2nm-1)}} u(t,x)_{|x=0} = \\ & = u(t,x)_{|x=l} = u_{xx}(t,x)_{|x=l} = \ldots \\ & = \frac{\partial^{2(2nm-1)}}{\partial x^{2(2nm-1)}} u(t,x)_{|x=l} = 0, \end{aligned} \qquad (3)$$

где $f(t,x,u) \in C(D \times R)$, $\varphi_j(x) \in C^{2nm+1}(D_l)$, $= \ldots = \varphi_j^{(4nm-2)}(x)_{|x=0} =$ $\varphi_j(x)_{|x=0} = \varphi''_j(x)_{|x=0} =$ $= \varphi_j(x)_{|x=l} = \varphi''_j(x)_{|x=l} = \ldots = \varphi_j^{(4nm-2)}(x)_{|x=l} = 0$, $j = \overline{1,n}$, $D \equiv D_T \times D_l$, $D_T \equiv [0,T]$, $D_l \equiv [0,l]$, $0 < l < \infty$, $0 < T < \infty$, $0 < \nu$, μ – малые параметры, n, m – натуральные числа.

Следует отметить, что изучению разного типа линейных и нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных и их систем посвящено много работ и при этом применены разные методы [1–3]. В данной работе, в отличие от работ [4; 5], используется метод разделения переменных, основанный на поиске решения смешанной задачи (1)–(3) в виде

$$u(t,x) = \lim_{N\to\infty} \sum_{i=1}^{N} \left(1 - \frac{i-1}{N}\right) a_i(t) \cdot b_i(x), \qquad (4)$$

где $b_i(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \lambda_i x$, $\lambda_i = \frac{i\pi}{l}$.

Обозначается через $W_2^{(k)}(D)$ множество функций $\Phi(t,x)$ таких, что $\Phi(t,x)$, $\frac{\partial^2}{\partial x^2}\Phi(t,x), \ldots, \frac{\partial^{2(2nm-1)}}{\partial x^{2(2nm-1)}}\Phi(t,x)$ при фиксированном $t \in D_T$ принадлежат области определения оператора $-\frac{\partial^{4nm-2}}{\partial x^{4nm-2}}$, имеют производные порядка k по t, принадлежащие $L_2(D)$, и обращаются в нуль при $t \ge T - \delta$ ($0 < \delta$ – зависит от $\Phi(t,x)$).

Определение. Если функция $u(t,x) \in C(D)$ удовлетворяет интегральному тождеству

$$\int_0^T \int_0^l \left\{ u(t,y) \left[\frac{\partial^n}{\partial t^n}\Phi + n\frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-1}\partial y^{4m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{n+4m}}{\partial t^{n-2}\partial y^{4m+2}}\Phi + \right.\right.$$

$$+ \ldots + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4nm-2}}{\partial t^2 \partial y^{4nm-4}}\Phi + n\frac{\partial^{4nm-1}}{\partial t\,\partial y^{4nm-2}}\Phi + \frac{\partial^{4nm}}{\partial y^{4nm}}\Phi +$$

$$+\nu\left(\frac{\partial^{n+2m}}{\partial t^n \partial y^{2m}}\Phi + n\frac{\partial^{n+6m-1}}{\partial t^{n-1}\partial y^{6m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{n+6m}}{\partial t^{n-2}\partial y^{6m+2}}\Phi + \right.$$

$$+ \ldots + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4nm+2m-2}}{\partial t^2 \partial y^{4nm+2m-4}}\Phi + n\frac{\partial^{4nm+2m-1}}{\partial t\,\partial y^{4nm+2m-2}}\Phi \Big) +$$

$$+\nu\mu\left(\frac{\partial^{n+4m}}{\partial t^n \partial y^{4m}}\Phi + n\frac{\partial^{n+8m-1}}{\partial t^{n-1}\partial y^{8m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{n+8m}}{\partial t^{n-2}\partial y^{8m+2}}\Phi + \right.$$

$$\left.\left.\left. + \ldots + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4nm+4m-2}}{\partial t^2 \partial y^{4nm+4m-4}}\Phi + n\frac{\partial^{4nm+4m-1}}{\partial t\,\partial y^{4nm+4m-2}}\Phi \Big) \right] - f\Phi \right\} \times$$

$$\times dy\,dt = \int_0^l \varphi_1(y) \left[\frac{\partial^{n-1}}{\partial t^{n-1}}\Phi + n\frac{\partial^{n+4m-2}}{\partial t^{n-2}\partial y^{4m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2} \times \right.$$

$$\frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-3}\partial y^{4m+2}}\Phi + \ldots + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4nm-3}}{\partial t\,\partial y^{4nm-4}}\Phi + n\frac{\partial^{4nm-2}}{\partial y^{4nm-2}}\Phi +$$

$$+\nu\left(\frac{\partial^{n+2m-1}}{\partial t^{n-1}\partial y^{2m}}\Phi + n\frac{\partial^{n+6m-2}}{\partial t^{n-2}\partial y^{6m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{n+6m-1}}{\partial t^{n-3}\partial y^{6m+2}}\Phi + \right.$$

$$\left. + \ldots + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4nm+2m-3}}{\partial t\,\partial y^{4nm+2m-4}}\Phi + n\frac{\partial^{4nm+2m-2}}{\partial y^{4nm+2m-2}}\Phi \right) +$$

$$+\nu\mu\left(\frac{\partial^{n+4m-1}}{\partial t^{n-1}\partial y^{4m}}\Phi + n\frac{\partial^{n+8m-2}}{\partial t^{n-2}\partial y^{8m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{n+8m-1}}{\partial t^{n-3}\partial y^{8m+2}}\Phi + \right.$$

$$\left. \left. + \ldots + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4nm+4m-3}}{\partial t\,\partial y^{4nm+4m-4}}\Phi + n\frac{\partial^{4nm+4m-2}}{\partial y^{4nm+4m-2}}\Phi \right) \right]_{t=0} dy -$$

$$-\int_0^l \varphi_2(y) \left[\frac{\partial^{n-2}}{\partial t^{n-2}}\Phi + n\frac{\partial^{n+4m-3}}{\partial t^{n-3}\partial y^{4m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{n+4m-2}}{\partial t^{n-4}\partial y^{4m+2}}\Phi + \right.$$

$$+ \ldots + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}\frac{\partial^{4nm-5}}{\partial t\,\partial x^{4nm-6}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4nm-4}}{\partial x^{4nm-4}}\Phi +$$

$$+\nu\left(\frac{\partial^{n+2m-2}}{\partial t^{n-2}\partial y^{2m}}\Phi + n\frac{\partial^{n+6m-3}}{\partial t^{n-3}\partial y^{6m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{n+6m-2}}{\partial t^{n-4}\partial y^{6m+2}}\Phi + \right.$$

$$\left. \ldots + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}\frac{\partial^{4nm+2m-5}}{\partial t\,\partial y^{4nm+2m-6}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4nm+2m-4}}{\partial y^{4nm+2m-4}}\Phi \right) +$$

$$+\nu\mu\left(\frac{\partial^{n+4m-2}}{\partial t^{n-2}\partial y^{4m}}\Phi + n\frac{\partial^{n+8m-3}}{\partial t^{n-3}\partial y^{8m}}\Phi + \right.$$

$$\frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{n+8m-2}}{\partial t^{n-4}\partial y^{8m+2}}\Phi + \ldots + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} \times$$

$$\left. \times \frac{\partial^{4nm+4m-5}}{\partial t\,\partial y^{4nm+4m-6}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4nm+4m-4}}{\partial y^{4nm+4m-4}}\Phi \right)\Big]_{t=0} dy + \ldots -$$

$$-\int_0^l \varphi_{n-2}(y) \left[\frac{\partial^2}{\partial t^2}\Phi + n\frac{\partial^{4m+1}}{\partial t\,\partial y^{4m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{4m+2}}{\partial y^{4m+2}}\Phi + \right.$$

$$+\nu\left(\frac{\partial^{2m+2}}{\partial t^2 \partial y^{2m}}\Phi + n\frac{\partial^{6m+1}}{\partial t\,\partial y^{6m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{6m+2}}{\partial y^{6m+2}}\Phi \right) +$$

$$\left. +\nu\mu\left(\frac{\partial^{4m+2}}{\partial t^2 \partial y^{4m}}\Phi + n\frac{\partial^{8m+1}}{\partial t\,\partial y^{8m}}\Phi + \frac{n(n-1)}{2}\frac{\partial^{8m+2}}{\partial y^{8m+2}}\Phi \right) \right]_{t=0} dy +$$

$$+\int_0^l \varphi_{n-1}(y)\left[\frac{\partial}{\partial t}\Phi+n\frac{\partial^{4m}}{\partial y^{4m}}\Phi+\nu\left(\frac{\partial^{2m+1}}{\partial t\,\partial y^{2m}}\Phi+n\frac{\partial^{6m}}{\partial y^{6m}}\Phi\right)+\right.$$

$$\left.+\nu\mu\left(\frac{\partial^{4m+1}}{\partial t\,\partial y^{4m}}\Phi+n\frac{\partial^{8m}}{\partial y^{8m}}\Phi\right)\right]_{t=0}dy-$$

$$-\int_0^l \varphi_n(y)\left[\Phi+\nu\frac{\partial^{2m}}{\partial y^{2m}}\Phi+\nu\mu\frac{\partial^{4m}}{\partial y^{4m}}\Phi\right]_{t=0}dy$$

для любого $\Phi(t,x)\in W_2^{(n)}(D)$, то она называется слабым решением смешанной задачи (1)–(3).

В силу (4) из определения смешанной задачи (1)–(3) следует:

$$a_i(t)=w_i(t)+$$

$$+\int_0^t\int_0^l f\left(s,y,\lim_{N\to\infty}\sum_{j=1}^{N}\left(1-\frac{j-1}{N}\right)a_j(s)b_j(y)\right)\times$$

$$\times P_i(t,s)\,b_i(y)\,dy\,ds;$$

т. е.

$$u(t,x)=\lim_{N\to\infty}\sum_{i=1}^{N}\left(1-\frac{i-1}{N}\right)a_i(t)\cdot b_i(x)=$$

$$=\lim_{N\to\infty}\sum_{i=1}^{N}\left(1-\frac{i-1}{N}\right)b_i(x)\Big[w_i(t)+$$

$$+\int_0^t\int_0^l f\left(s,y,\lim_{N\to\infty}\sum_{j=1}^{N}\left(1-\frac{j-1}{N}\right)a_j(s)b_j(y)\right)P_i(t,s)b_i(y)\,dy\,ds\Big];$$

$$w_i(t)=\sum_{k=1}^{n}\phi_{ki}\frac{t^{k-1}}{(k-1)!}\sum_{j=k}^{n}\theta_{1i}^{j-k}(\nu,\mu)\frac{t^{j-k}}{(j-k)!}\cdot\exp\left\{-\theta_{1i}(\nu,\mu)t\right\};$$

$$P_i(t,s)=\frac{(n-1)!(t-s)^{n-1}}{\theta_{0i}^{n}(\nu,\mu)}\cdot\exp\left\{-\theta_{1i}(\nu,\mu)(t-s)\right\};$$

$$\theta_{1i}^{n}(\nu,\mu)=\frac{\lambda_i^{4nm}}{\theta_{0i}^{n}(\nu,\mu)},$$

$$\theta_{0i}^{n}(\nu,\mu)=\left(1+\nu\lambda_i^{2m}+\nu\mu\,\lambda_i^{4m}\right)^n.$$

Теорема. Пусть выполняются следующие условия.

1. Функция $f(t,x,u)$ при фиксированном $t\in D_T$ непрерывна по $(x,u)\in D_l\times R$ и удовлетворяет условию Гельдера по x.

2. $f(t,x,u)\in \mathrm{Lip}\left\{g(t)_{|u}\right\}$, где $0<\int_0^t g(s)\,ds<\infty$;

3. $\left\|f\left(t,x,u_0(t,x)\right)\right\|_C\le g(t)$.

4. $u_0(t,x)\in C^1(D)$,

где

$$u_0(t,x)=\lim_{N\to\infty}\sum_{i=1}^{N}\left(1-\frac{i-1}{N}\right)w_i(t)\cdot b_i(x).$$

Тогда уравнение

$$u(t,x)=u_0(t,x)+$$

$$+\int_0^t\lim_{N\to\infty}\sum_{i=1}^{N}\left(1-\frac{i-1}{N}\right)f_i(u)\cdot b_i(x)P_i(t,s)\,ds,\qquad(5)$$

где $f_i(u)=\int_0^l f\left(s,y,u(t,y)\right)b_i(y)\,dy$ имеет единственное решение в классе $C^1(D)$.

Доказательство. Если $u(t,x)\in C(D)$, то

$$\left|\sum_{i=1}^{N}\left[\int_0^l\left(1-\frac{i-1}{N}\right)f\left(t,y,u_0(t,y)\right)b_i(y)\,dy\right]b_i(x)\right|$$

$$\left|\le\max_x\left|f\left(t,x,u_0(t,x)\right)\right|\le g(t)\right.$$

и

$$\lim_{N\to\infty}\sum_{i=1}^{N}\left[\int_0^l\left(1-\frac{i-1}{N}\right)f\left(t,y,u_0(t,y)\right)b_i(y)\,dy\right]\cdot b_i(x)=$$

$$=f\left(t,x,u_0(t,x)\right),$$

причем сходимость равномерна по x для любого $t\in D_T$.

Так как функция $f\left(t,x,u(t,x)\right)$ удовлетворяет условию Гельдера, ее частичные суммы равномерно ограничены:

$$\left|\sum_{i=1}^{N}f_i(u)b_i(x)\right|\le\delta_1\cdot\|f(u)\|_C,\quad 0<\delta_1=\mathrm{const}.$$

Рассмотрим следующий итерационный процесс:

$$u_{k+1}(t,x)=u_0(t,x)+$$

$$+\int_0^t\lim_{N\to\infty}\sum_{i=1}^{N}\left(1-\frac{i-1}{N}\right)f_i(u_k)\cdot b_i(x)\,P_i(t,s)\,ds,\qquad(6)$$

где

$$f_i(u_k)=\int_0^l f\left(s,y,u_k(t,y)\right)b_i(y)\,dy,\quad k=0,\,1,\,2,\,\ldots.$$

Тогда из (6) следуют оценки

$$\|u_1(t,x)-u_0(t,x)\|_{C(D)}\le$$

$$\le\int_0^t\left|\left[\int_0^l\lim_{N\to\infty}\sum_{i=1}^{N}\left(1-\frac{i-1}{N}\right)f_i(u)\,b_i(y)\,dy\right]b_i(x)P_i(t,s)\right|ds\le$$

$$\le\int_0^t\|f_i(u)\|_{C(D)}\cdot P_i(t,s)\,ds\le\int_0^t g(s)\,ds,\qquad(7)$$

$$\|u_{k+1}(t,x)-u_k(t,x)\|_{C(D)}\le\frac{1}{(k+1)!}\left[\int_0^t g(s)\,ds\right]^{k+1}.\qquad(8)$$

Из (7) и (8) следует равномерная сходимость при $k\to\infty$ последовательности функций $\left\{u_k(t,x)\right\}_{k=1}^{\infty}$ к

функции $u(t,x)$, которая является решением уравнения (5). Единственность решения уравнения (5) следует из оценки

$$\left\| u(t,x) - \vartheta(t,x) \right\|_{C(D)} \leq \leq \int_0^t g(s) \left\| u(s,x) - \vartheta(s,x) \right\|_{C(D)} ds, \quad (9)$$

если предположим, что уравнение (5) имеет два решения $u(t,x)$ и $\vartheta(t,x)$ в области D и применимj к (9) неравенства Гронуолла–Беллмана.

Библиографические ссылки

1. Ладыженская О. А., Солонников В. А., Уральцева Н. Н. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. М. : Наука, 1967.

2. Нахушев А. М. Об одном приближенном методе решения краевых задач для дифференциальных уравнений и его приложения к динамике почвенной влаги и грунтовых вод // Дифференц. уравнения. 1982. Т. 18, № 1. С. 72–81.

3. Похожаев С. И. Об априорных оценках и градиентных катастрофах гладких решений гиперболических систем законов сохранения // Тр. МИ РАН. 2003. Т. 243. С. 257–288.

4. Юлдашев Т. К. Смешанная задача для нелинейного интегро-дифференциального уравнения, содержащего куб параболического оператора // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. 2 (35). С. 96–100.

5. Юлдашев Т. К. Смешанная задача для нелинейного дифференциального уравнения четвертого порядка с малым параметром при параболическом операторе // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2011. Т. 51, № 9. С. 1703–1711.

T. K. Yuldashev

ON FEEBLE SOLUBILITY OF MIXED PROBLEM FOR NONLINEAR EQUATION WITH PSEUDO-PARABOLIC OPERATOR OF HIGH DEGREE

The author studies problems of feeble solubility of mixed value problem for nonlinear partial differential equations with pseudo-parabolic operator of arbitrary natural power.

Keywords: weak solubility, integral identity, countable system of nonlinear equations, method of successive approximations.

© Юлдашев Т. К., 2012

Раздел
2

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 629.78.048.7

А. Ю. Вшивков, Ф. В. Танасиенко, Е. Н. Головенкин, Е. В. Юртаев

РАЗРАБОТКА И ТЕРМОВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭКРАНОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЧЕСКОГО БЛОКА ОТ ЭФФЕКТА «СОЛНЕЧНАЯ ЛОВУШКА»*

Проведены исследования автономной подсистемы терморегулирования (СТР) блока механического системы наведения антенн (БМ СНА). Проведена обработка телеметрической информации за виток КА «Луч-5А», исследованы критические режимы функционирования подсистемы. Проведены экспериментальные исследования по имитации функционирования подсистемы наведения антенн на орбите с тепловым экраном и без него. Проведена верификация данных с расчетными значениями, полученными в результате математического моделирования на конец каждого из режимов.

Ключевые слова: космический аппарат, система терморегулирования, тепловой экран, тепловая модель, термовакуумные испытания, имитатор солнечного излучения.

Бортовое обеспечение, элементы конструкции, служебные системы и научная аппаратура космического аппарата могут успешно функционировать только в определенных температурных условиях, определяемых массой, габаритами и энергетическими характеристиками элементов системы обеспечения теплового режима и конструкции КА.

Расширение эксплуатационных температурных диапазонов, как правило, приводит к ухудшению основных характеристик объектов, а при выходе температур из допустимого диапазона снижается надежность, растет погрешность и увеличивается вероятность отказов в работе агрегатов и систем КА. Поэтому поддержание в заданных пределах температур его бортового оборудования, элементов конструкции является одним из основных условий успешного выполнения аппаратом заданной программы.

Компоновочная сложность, многоэлементность, разобщенность и разнохарактерность тепловых требований, наличие развитых пространственных, особенно раскрываемых и развертываемых конструкций характерны для современных космических аппаратов. В этих условиях проблема теплового обеспечения является едва ли не определяющей ввиду зависимости качественных и количественных показателей проектирования от того, насколько оптимально обеспечены условия, в которых происходит функционирование аппаратуры [1].

Одним из решений повышения эффективности функционирования СТР является ее локализация, т. е. работа подсистемы в подсистеме. Технически тепловая система должна быть устроена так, чтобы процесс обеспечения температурных условий ряда элементов бортовой аппаратуры не оказывал значимого теплового влияния на соседние элементы КА и наоборот. Таким образом, в условиях плотной компоновки элементов на сотовой панели каждый прибор находится в своих, гарантированных температурных диапазонах, а компактность размещения позволяет поместить большее количество оборудования на корпус спутника и избавляет от необходимости проводить достаточно крупный по массе жидкостный тракт.

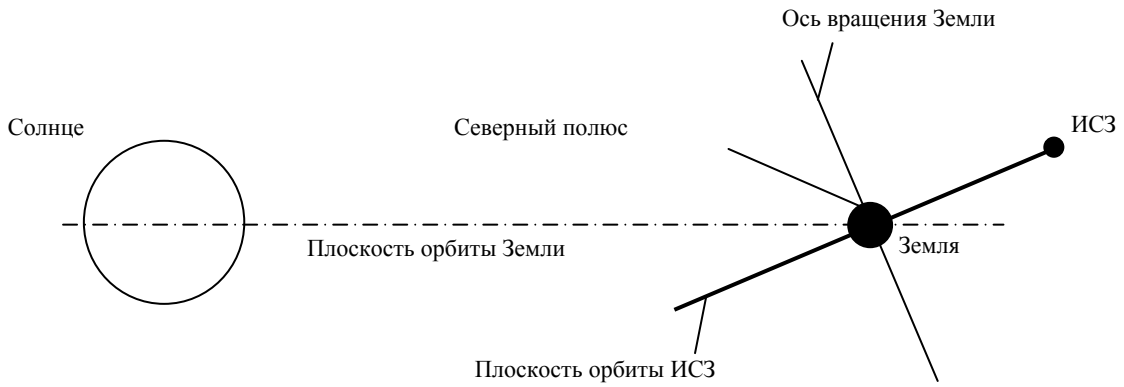
Это решение было с успехом применено в аппаратах серии «Луч», спроектированных на базе негерметичной легкой платформы «Экспресс-1000», где элементами активной системы терморегулирования являются локальные секции электрообогревателей, расположенные в зоне приборов и отвечающие за их тепловой режим. Элементы, относящиеся к пассивным на аппаратах данной серии, включают в себя тепловые трубы (свои для каждой группы оборудования), вшитые в сотопанели, различные терморегулирующие покрытия (пасты, краски, клеи, пленки и т. д.), радиаторы, тепловые экраны и экранно-вакуумную теплоизоляцию (ЭВТИ).

Запущенный в декабре 2011 г. на геостационарную орбиту «Луч-5А» подтвердил достаточно высокую эффективность примененного типа системы терморегулирования, но не избавил от принятия новых конструктивных решений в улучшении работы подсистемы на внешних элементах КА.

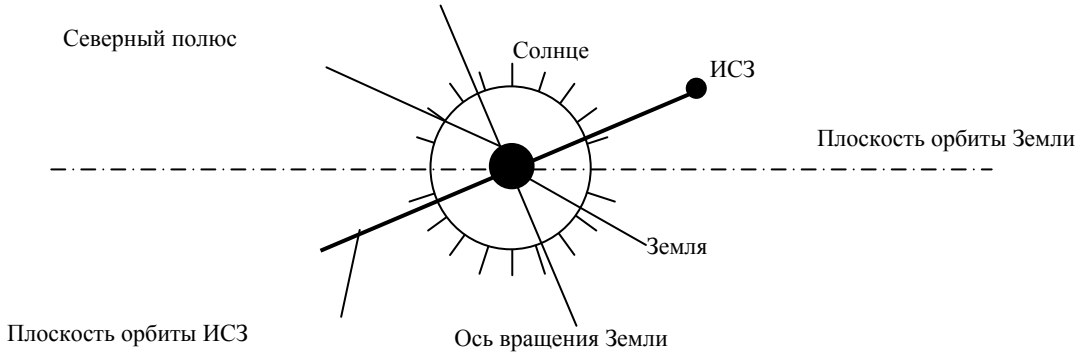
При движении по геостационарной орбите спутник может большую часть года подвергаться воздействию солнечного потока, а в остальное время периодически оказываться в тени Земли. Эти два случая функционирования аппарата на геостационарной орбите имеют условные названия – «горячий» и «холодный». БМ СНА является внешним элементом, поэтому такие экстремальные перепады температур вызывают резкое изменение его теплового режима. Рассмотрим эти случаи более детально [2].

Поскольку плоскость геостационарной орбиты (плоскость экватора) и плоскость орбиты Земли при ее движении вокруг Солнца не совпадают (из-за известного наклона земной оси), большую часть года геостационарный (высота орбиты около 36 000 км) искусственный спутник Земли (ИСЗ) вообще не попадает в тень планеты.

*Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».



а



б

Рис. 1. Взаимное положение геостационарного КА, Земли и Солнца:
а – зимнее солнцестояние; *б* – весеннее равноденствие

При нахождении «за Землей» спутник расположен выше (или ниже) линии Солнце – Земля (точка зимнего солнцестояния) (рис. 1, *а*). Лишь в периоды, близкие к осеннему или весеннему равноденствию, затенение становится возможным, поскольку спутник, пересекая плоскость орбиты Земли, находится на прямой Солнце – Земля (рис. 1, *б*).

Затенение может наступить один раз за период обращения Земли, то есть один раз за сутки. Время затенения связано с местным временем для той долготы, на которой расположен геостационарный ИСЗ. Затенение геостационарного ИСЗ возникает только в периоды длительностью менее 1,5 месяца, близкие к осеннему и весеннему равноденствию, и по времени не превышает 1 ч 12 мин в сутки.

Радиационные поверхности геостационарного КА, при его штатной эксплуатации, обычно расположены параллельно плоскости экватора для обеспечения минимального поглощенного солнечного теплового потока. Поэтому во время орбитального функционирования максимальный угол между плоскостью радиатора и направлением на Солнце составляет $23{,}5^{o}$ (в периоды летнего и зимнего солнцестояния). Вышесказанное является справедливым для теплового режима БМ СНА. Исходя из этого при его расчете принимались следующие тепловые случаи.

Горячий случай характеризуется следующими основными параметрами:

– зимнее солнцестояние (солнечная постоянная S0 = 1 440 Вт/м2);

– тепловыделение электродвигателей механического привода – по 1,8 Вт каждый;

– тепловыделение трансформаторов датчиков угла – по 0,15 Вт каждый;

– значения оптических коэффициентов теплоизоляции, терморегулирующих покрытий и поверхности металлических элементов прибора на конец срока активного существования.

Холодный случай характеризуется следующими основными параметрами:

– весеннее, осеннее равноденствие (солнечная постоянная 1 340 Вт/м2);

– теневой участок – 1 ч и 10 мин;

– тепловыделение электродвигателей механического привода – 0 Вт;

– тепловыделение трансформаторов датчиков угла – 0 Вт;

– значения оптических коэффициентов теплоизоляции, терморегулирующих покрытий и поверхности металлических элементов прибора на начало срока активного существования.

Тепловой расчет БМ СНА был проведен в решателе Thermisol, входящем в состав программного пакета Thermica. Результаты зачетных элементов конструкции, полученные для горячего и холодного случая (табл. 1), не выходят из гарантированных диапазонов температуры, что позволяет аппаратуре функционировать в комфортных для нее условиях.

Результаты летных испытаний показали, что эксплуатация БМ СНА на отдельных участках орбиты в период максимальной освещенности прибора приводит к локальному перегреву корпуса датчика угла (рис. 2). Параметры работы привода при наземной экспериментальной отработки были квалифицированы от минус 50 °С до плюс 50 °С К тому же анализ эксплуатации аналогов данного прибора в космических условиях показывает, что БМ СНА, функционируя при температуре плюс 55 °С дает лишь незначительную погрешность при измерении угла наведения антенны.

Проведенные исследования теплового режима привода с алгоритмом работы нагревателей на пониженных уставках регулирования температуры не дали существенного снижения температуры на датчиках угла БМ СНА (порядка 1–2°С), следовательно, алгоритм работы электрообогревателей был заложен верно. Математическая тепловая модель была составлена правильно, что подтверждается данными проведенных ранее тепловых испытаний теплофизической модели 07ТВИ [3]. С другой стороны, окончательная геометрия внешнего окружения БМ СНА формируется в процессе монтажа кабелей и ЭВТИ по месту, что может привести к существенным отличиям от исходной принятой математической модели.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований ЭВТИ [4] в эксплуатационных условиях, в зонах, имеющих вогнутости, сгибы и наслоения изоляции, происходят концентрации тепловых потоков, которые могут привести к локальным перегревам ЭВТИ и даже местным разрушениям пленки. В случае с конструкцией БМ СНА такое переотражение потоков привело к многократному увеличению тепловой нагрузки на зону с кабельными разъемами привода, образовав эффект «солнечная ловушка» и, соответственно, увеличив температуры на датчиках угла механического блока.

В целях оптимизации температурных значений на БМ СНА было принято решение о введении жесткостных ограждающих конструкций – каркасов, предназначенных для крепления теплового экрана из пленки с высоким коэффициентом отражения. Такая конструкция была призвана обеспечивать стабильность формы и геометрии тепловым экранам, защищающим БМ СНА от внешнего солнечного потока (рис. 3).

Таблица 1

Результаты расчета БМ СНА для горячего и холодного случаев

Узлы	Температура узлов, °С					
	Горячий случай	Максимальная гарантированная	Расчетный запас	Холодный случай	Минимальная гарантированная	Расчетный запас
Корпус БМ СНА	30,3	40	**9,7**	–31	–40	**9,0**
Корпус датчика угла	31,3	40	**8,7**	10	0	**10,0**

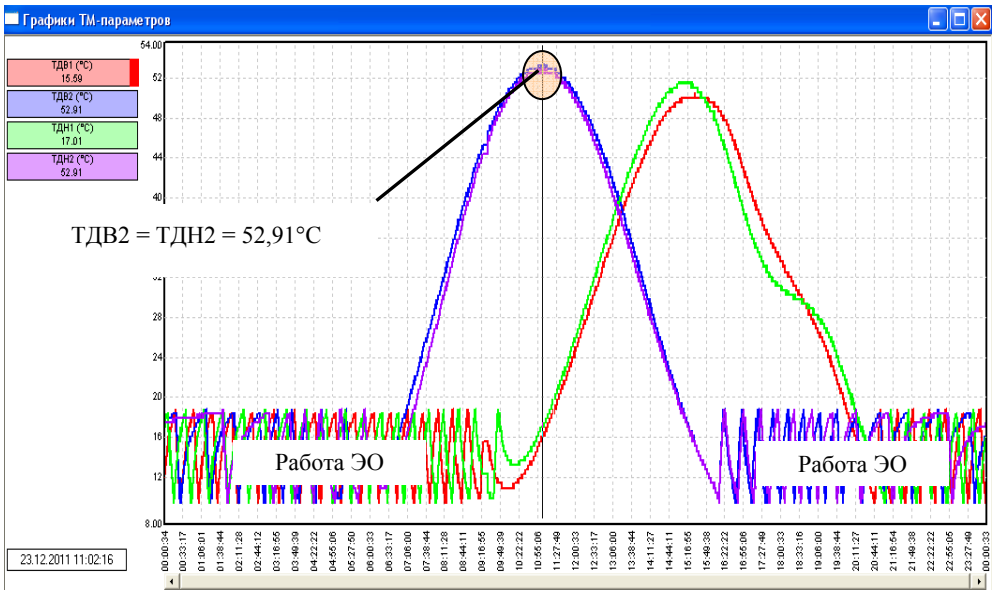


Рис. 2. Данные летных испытаний БМ СНА в точке зимнего солнцестояния

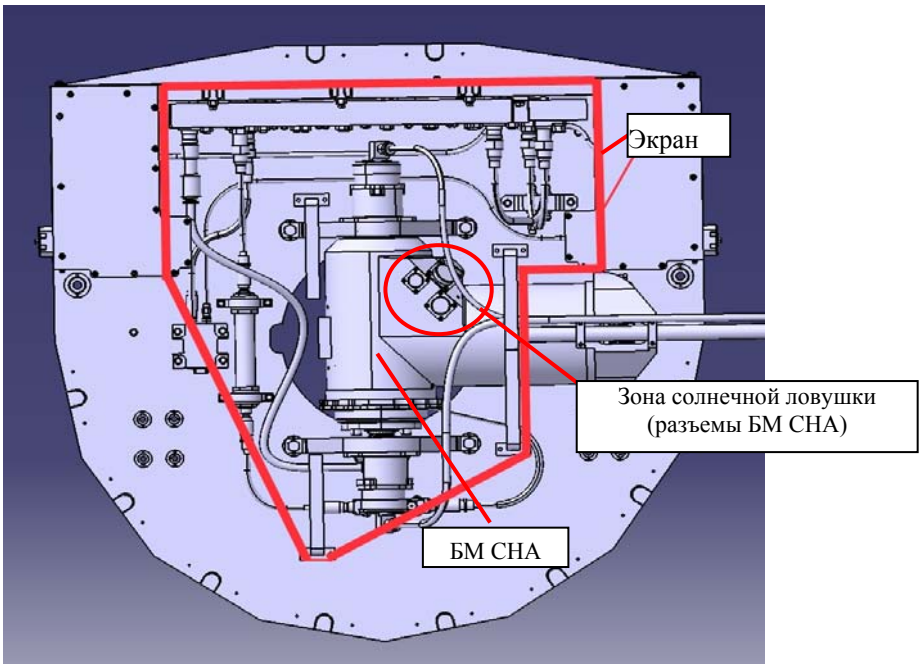


Рис. 3. Схема теплового экрана для защиты БМ СНА от солнечной ловушки

Таблица 2

Расчетные случаи функционирования БМ СНА на орбите

№	Расчетный случай	Значение солнечной постоянной S_0, Вт/м^2	Тепловыделение двигателей БМ СНА, Вт	Значение оптических коэффициентов
1	Горячий случай ОФ (зимнее солнцестояние)	1 440	1,8	На начало САС
2	Холодный случай ОФ (весеннее равноденствие)	1 340	0	На начало САС
3	Горячий случай ОФ (зимнее солнцестояние)	1 440	1,8	На конец САС

С целью верификации данной конструкции был выполнен тепловой расчет сборки БМ СНА с доработанной тепловой схемой для орбитального функционирования. Расчет был реализован в программном комплексе Femap TMG Thermal and Flow и произведен для трех критичных случаев функционирования привода (табл. 2).

Результаты теплового прогноза для расчетных случаев 1–3 за два витка приведены на рис. 4–6.

С учетом расчетной неопределенности максимальная температура в горячем случае орбитального функционирования составила 37,5 °С. В холодном случае (рис. 5) видно стабильную работу секций ЭО, о чем свидетельствуют частые пики и провалы температур, характеризующие включение и выключение обогревателей. Так как характер изменений за первый виток полностью повторяет изменение за второй, то двухвитковый прогноз позволяет нам говорить о добротности тепловой схемы отвечать на внешние воздействия и обеспечивать работу оборудования в комфортных для нее условиях.

С целью верификации расчета модернизированной схемы БМ СНА были проведены термовакуумные испытания (ТВИ) на испытательном комплексе ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева. Объектом испытаний являлась конструкция сотовой панели с тепловыми имитаторами ряда приборов и штатным БМ СНА.

Имитация космического пространства осуществлялась криогенными экранами камеры, охлаждаемыми в процессе испытаний до температуры минус (180 ± 10) °С. Для обеспечения заданной температуры криогенных экранов камеры была задействована криогенная система камеры.

В качестве хладагента использовался азот. Контроль температур криогенных экранов осуществлялся термометрами сопротивления, установленными на их поверхностях с регистрацией показаний на приборе «УИТ-400».

Для имитации внешних тепловых потоков на конструкцию с БМ СНА использовался имитатор солнечного излучения [5]. Для контроля внешних условий и управления ИСИ в камеру был установлен калориметрический датчик.

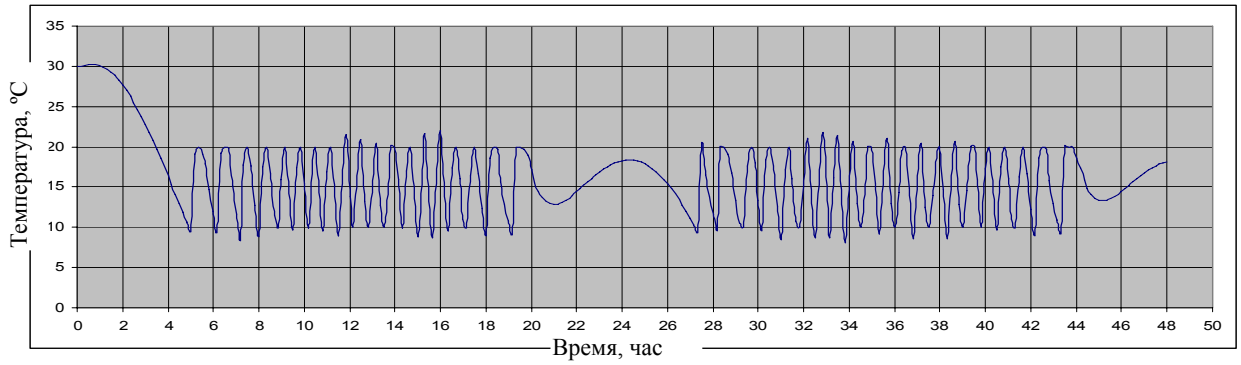


Рис. 4. Расчетный случай № 1, изменение температуры за два витка датчика угла БМ СНА

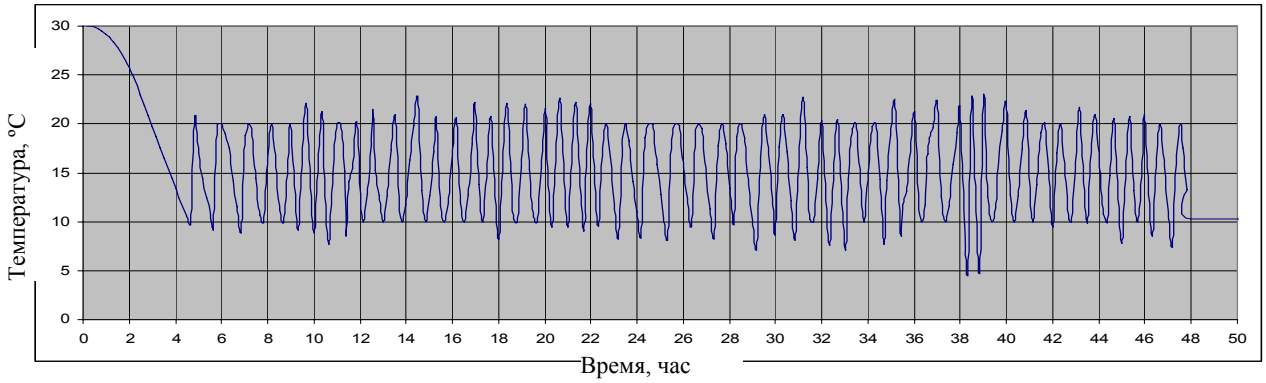


Рис. 5. Расчетный случай № 2, изменение температуры за два витка датчика угла БМ СНА

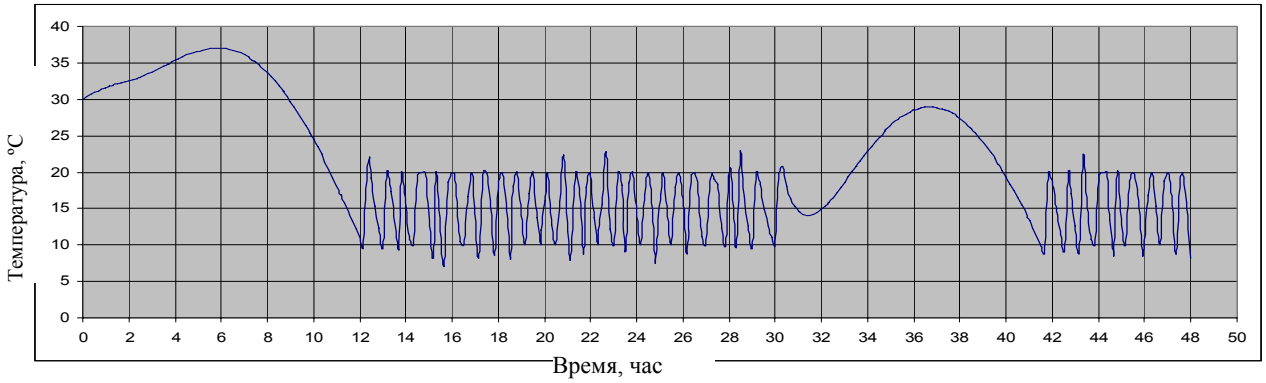


Рис. 6. Расчетный случай № 3, изменение температуры за два витка датчика угла БМ СНА

Для снятия температурной информации в процессе проведения ТВИ использовались штатные телеметрические датчики температуры, установленные внутри прибора БМ СНА и технологические термометры сопротивления, установленные на ЭВТИ, корпус БМ СНА, тепловой экран и другие элементы конструкции. Общие подходы к средствам имитации внешних факторов и методологии термовакуумной отработке подробно описаны в [6; 7]. Таким образом, было проведено три режима (в соответствии с табл. 2) проверки теплового состояния БМ СНА с доработанной тепловой схемой в части введения теплового экрана при имитации условий штатной эксплуатации КА «Луч».

В ходе режима 1 (расчетный случай № 1) проверялся тепловой режим БМ СНА с постоянно включенными приводами. При проведении режима 2 (расчетный случай № 2) проверялся тепловой режим БМ СНА при имитации минимальных тепловых воздействий с теневым участком от Земли без включения приводов. Проверялась достаточность работы секций электрообогрева. В ходе режима 3 (расчетный случай № 3) проверялся тепловой режим БМ СНА на конец срока активного существования КА с увеличенной мощностью светового излучения имитатора солнечного излучения (имитация деградации оптических коэффициентов) и постоянно включенными приводами.

Графики изменения температуры штатных датчиков угла в БМ СНА в процессе проведения режимов 1–3 термовакуумной отработки приведены на рис. 7–8.

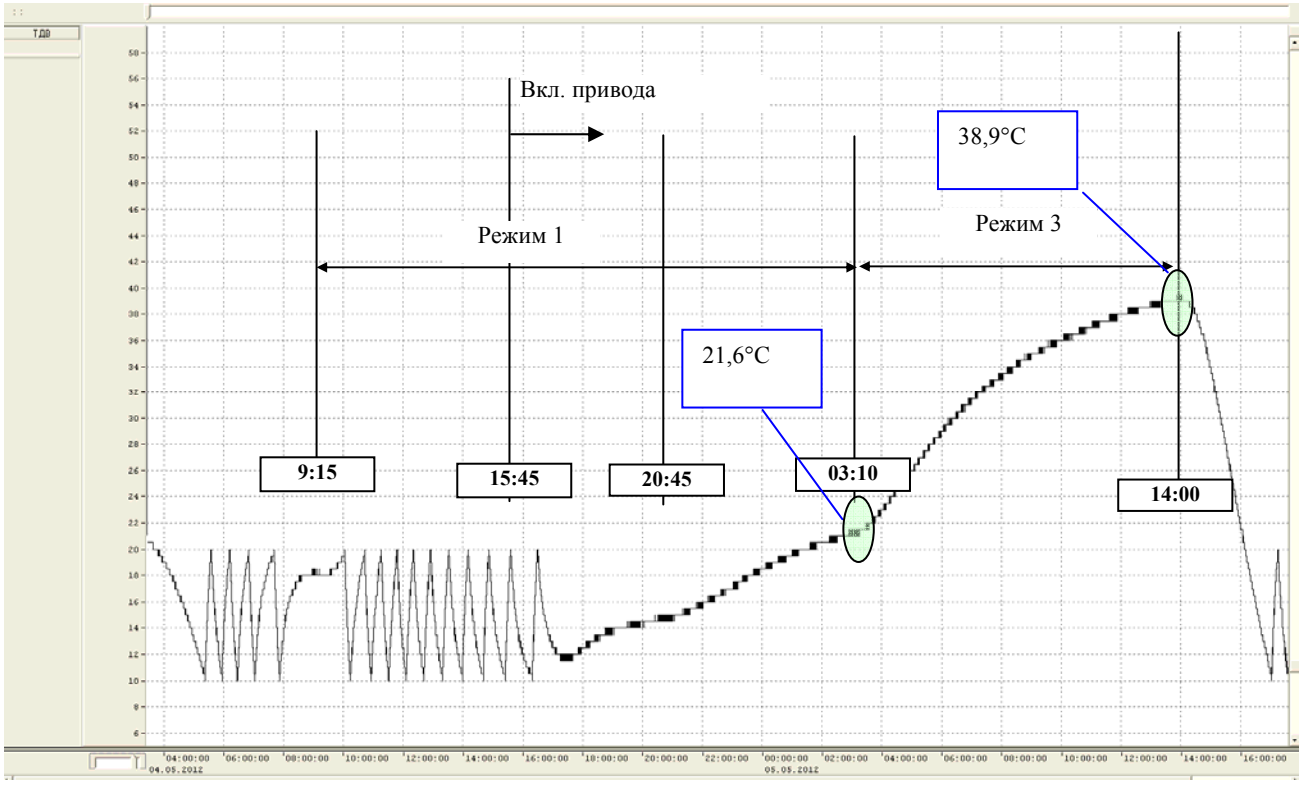


Рис. 7. График изменения температуры датчика угла ТДВ БМ СНА (режим 1, режим 3)

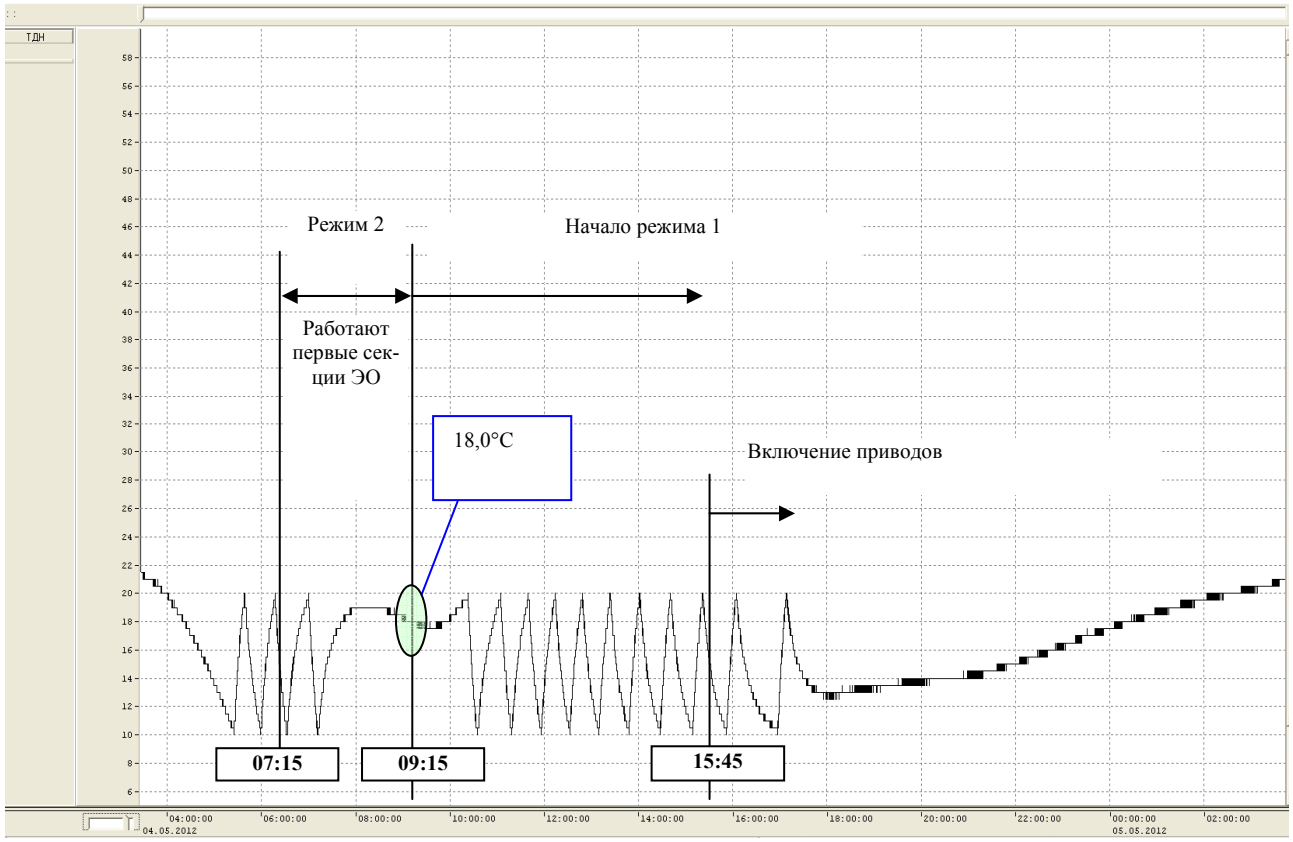


Рис. 8. График изменения температуры датчика угла ТДН БМ СНА (режим 2)

Таблица 3

Результаты теплового моделирования и ТВИ доработанной схемы БМ СНА

№ расчетного случая	Расчетный параметр	Математическая модель, °С	ТВИ, °С
Расчетный случай № 1, 2 (начало режима 1, конец режима 2)	ТДН1	5÷23,5	10–20 (на конец режима 18,0)
	ТДВ1	5÷23,5	10-20 (на конец режима 18,1)
Расчетный случай № 1 (конец режима 1)	ТДН1	22,5	21,3
	ТДВ1	21,9	21,6
Расчетный случай № 3 (конец режима 3)	ТДН1	37,5	38,9
	ТДВ1	37,5	39,0

Сведем данные, полученные в результате термовакуумной отработки и теплового расчета математической модели БМ СНА (табл. 3).

Таким образом, по результатам термовакуумной отработки можно сделать вывод, что введенная вновь тепловая схема позволяет значительно снизить температуру датчиков угла блока механического системы наведения антенн в горячих случаях.

Мощность, логика и достаточность работы обогревателей также успешно подтверждены по результатам отработки БМ СНА в холодных случаях.

Разработанная тепловая математическая модель БМ СНА в составе сборки соответствовала результатам, полученным в ходе термовакуумных испытаний, и была применена для прогноза температур привода в составе КА «Луч-5Б» при эксплуатации на геостационарной орбите.

Библиографические ссылки

1. Нестационарные тепловые режимы космических аппаратов спутниковых систем : монография / М. В. Краев [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2004.

2. Кантор Л. Я., Тимофеев В. В. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. М. : Радио и связь, 1988.

3. Вшивков А. Ю., Легостай И. В. Теплофизическая модель 07ТВИ. Методология проектирования аппарата для НЭО // АПАК-2011 : материалы Всеросс. конф. (11–14 апреля, Красноярск) ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск. 2011. С. 53–54.

4. ОСТ 92-1380–83. Изоляция тепловая экранно-вакуумная. Марки и технические требования. М., 1983. С. 35.

5. Тепловакуумные испытания современных космических аппаратов / А. Ю. Вшивков [и др.] // Вакуумная техника и технология. Т. 21. Вакуумная технология. 2011. № 3. С. 171–177.

6. Андреянов В. В. Автоматические межпланетные станции. М. : Наука, 1973. 280 с.

7. Методология имитации внешних воздействий при проведении комплекса термовакуумных испытаний на примере непилотируемого навигационного космического летательного аппарата / А. Ю. Вшивков [и др.] // Новые материалы и технологии в ракетно-космической технике : материалы Всеросс. конф. (22–24 июня, Москва) ; / НИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина. М., 2011. С. 52–58.

A. Yu. Vshivkov, F. V. Tanasienko, E. N. Golovenkin, E. V. Yurtaev

DEVELOPMENT AND THERMAL VACUUM TESTS OF HEAT SHIELDS FOR PROTECTION OF MECHANICAL ELECTRIC DRIVE UNIT FROM EFFECT OF “SOLAR TRAP”

The authors present the results of investigations of autonomous thermal control subsystem of the unit of antennas mechanical guidance system. Processing of telemetry data for a revolution of the spacecraft, named «Luch-5A», is done. Critical modes of operation of the subsystem are investigated as well. Experimental investigations of simulation of antenna pointing subsystem operation at the orbit with heat shield and without it are conducted. Verification of the data with the calculated values, obtained by mathematical modeling on the end of each mode, is done.

Keywords: spacecraft, system of thermal regulation, heat shield, thermal model, thermal vacuum testing, simulator of solar fluxes.

© Вшивков А. Ю., Танасиенко Ф. В., Головенкин Е. Н., Юртаев Е. В., 2012

УДК 62-251-762.89:532.5.013.12

Д. А. Жуйков, В. О. Фальков, А. А. Кишкин, А. А. Зуев, В. П. Назаров

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТОРЦЕВОЙ ЩЕЛИ МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМСЯ ДИСКОМ И НЕПОДВИЖНОЙ СТЕНКОЙ*

Проведены экспериментальные исследования течения вязкой жидкости в торцевой щели между вращающимся диском и неподвижной стенкой, разработана методика расчета для определения параметров рабочего тела в торцевой щели, проведен сравнительный анализ с методиками расчета других авторов.

Ключевые слова: вращательное течение, экспериментальные исследования, напряжения трения, момент сопротивления трения, осевая сила.

В теории проектирования лопаточных машин важное место занимает задача о течении в торцевой щели. Достоверное определение параметров рабочего тела по длине и радиусу в торцевой щели позволяет понять физическую картину течения вязкой жидкости, а также корректно определить момент сопротивления трения и величину утечек рабочего тела.

Большинство существующих в настоящее время методик расчета основаны на полуэмпирических зависимостях, полученных в результате обобщения экспериментальных исследований. Данные методики имеют узкую область применения, что не позволяет их включать в математические модели с широким интервалом изменения режимных и конструктивных параметров. Другие теоретические методики не учитывают влияния вторичных течений в пространственном пограничном слое, вследствие чего имеют низкую точность расчета.

Авторами разработана математическая модель для расчета вязкого течения в полости вращения потока между ротором и статором турбонасосного агрегата [1; 2]. Преимущества разработанной математической модели заключаются в том, что используемые теоретические зависимости получены в ходе интегрирования дифференциальных уравнений движения вязкой жидкости с учетом особенностей течения в пространственном пограничном слое на неподвижной стенке и на вращающемся диске.

Для верификации достоверности математической модели разработан экспериментальный стенд с экспериментальным участком. Основными задачами при проведении экспериментальных исследований являлось определение момента сопротивления трения, определение градиента давления в торцевой щели, определение изменения угловой скорости потока жидкости, а также установление факторов, в значительной степени определяющих характер течения жидкости в исследуемом участке.

Экспериментальные исследования проводились на пневмогидравлическом стенде, который обеспечивает непрерывную подачу рабочей жидкости (вода) с различным расходом (до 800 г/с). Расход рабочей жидкости контролируется турбинным датчиком расхода.

В качестве привода используется электродвигатель (рис. 1) постоянного тока в балансирном подвесе мощностью 600 Вт, числом оборотов до 7 000 об/мин. Число оборотов измеряется датчиком оборотов типа ДО-1М. Датчик оборотов обращен к диску с 60 пазами, что позволяет считывать показания в интервале 60 с.

Корпус привода уравновешен пружинящим элементом и противовесом, при появлении крутящего момента электродвигатель проворачивается до нового положения равновесия. Это перемещение регистрируется предварительно тарированным индуктивным датчиком перемещения, выполненным на основе преобразователя давления МП4, и передается в виде выходного напряжения на цифровой вольтметр.

Контроль величин давлений, измеряемых во время проведения эксперимента, осуществляется манометрами и датчиками давления ИКД, которые обеспечивают определение изменения давления в диапазоне от –10 кПа до +500 кПа. Рабочее напряжение датчика давления ИКД составляет 6,3 В постоянного тока 0,2 А. Выходное напряжение фиксируется вольтметром. Датчики давления тарируются для определения зависимости дифференциала давления от выходного напряжения.

Для определения полного и статического давления в отводящем устройстве насоса в корпусе установлены приемники для измерения давления. В крышке насоса выполнены отверстия диаметром 1 мм, в зоне которых размещены приемники давления.

Для проведения широкого круга экспериментальных исследований в щелевых зазорах различной геометрической формы были специально спроектированы и изготовлены две экспериментальные установки для щелевых зазоров типа торцевая щель и коническая щель (внутренний диск – наружная стенка).

В результате испытаний было получено около 5 000 показаний. Класс точности манометров 1, их максимальная абсолютная погрешность 0,01 МПа. Показания вольтметров считывались с точностью до 0,1 В.

Во время проливов считывались 6 показаний статического давления, приемники которых были установлены на различных радиусах. На радиусе входа потока ($R_{вх}$ = 30,0 мм) в щелевой зазор был установлен приемник полного давления ($P_д$) и диаметрально противоположно приемник статического давления ($P_{ст}$).

*Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».

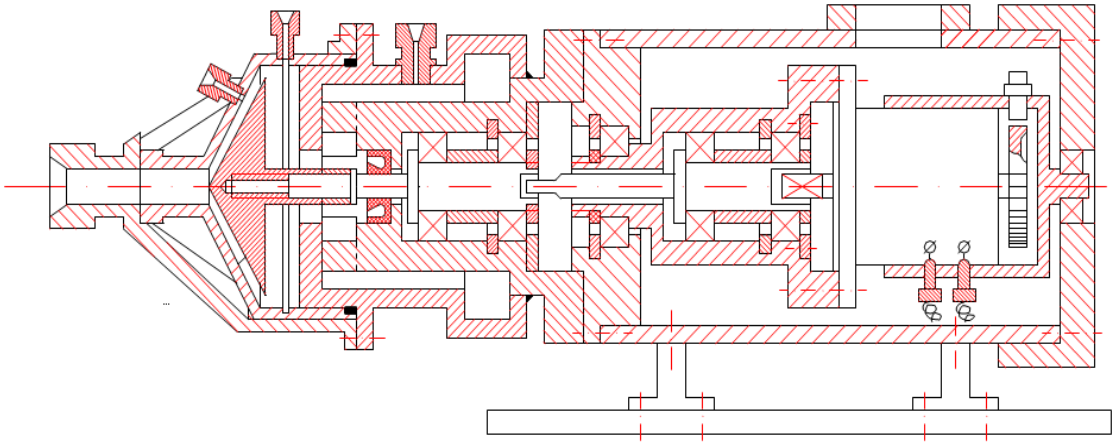


Рис. 1. Сборочный чертеж экспериментальной установки в составе с электроприводом (продольный разрез)

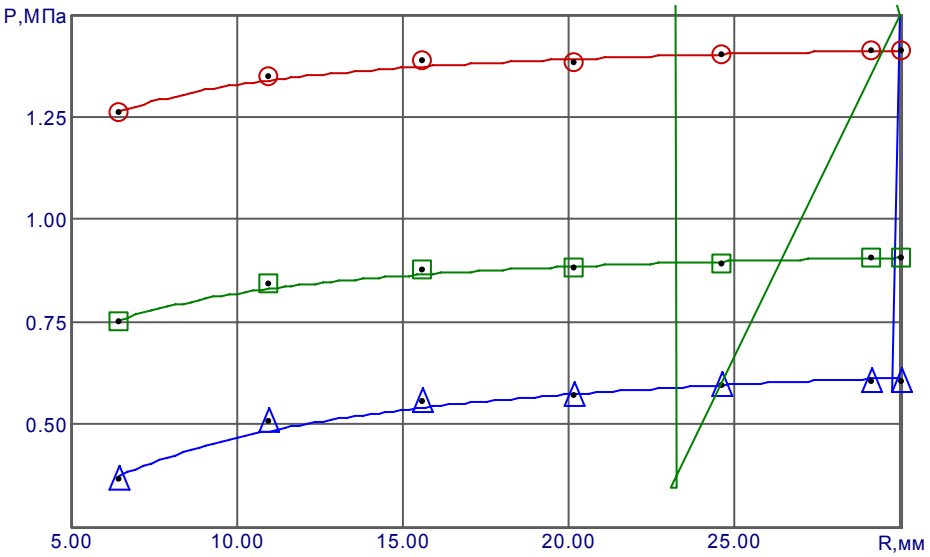


Рис. 2. Распределение статического давления по радиусу конической щели при $\omega_д = 733$ рад/с, $\alpha = 90°$, $n_0 = 0{,}001\ 1$ м, эмпирические точки: – $\dot{V} = 759 \times 10^{-6}$ м^3/с; – $\dot{V} = 509 \times 10^{-6}$ м^3/с; – $\dot{V} = 259 \times 10^{-6}$ м^3/с

Режим течения устанавливался угловой скоростью вращения ротора $\omega_{диск}$ = 733, 534, 314 рад/с и расходом рабочей жидкости $\dot{V}$ = 759, 630, 509, 380, 259, 134 × 10^{-6} м^3/с. Значения нормального зазора n_0 для различных углов α конической щели относительно оси вращения ротора варьировались от 1,1 до 2,5 мм. В ходе проведения эксперимента температура рабочей жидкости равнялась 11 °С, при этом кинематическая вязкость соответствовала 1,3 × 10^{-6} м^2/с, плотность жидкости – 999,8 кг/м^3.

На основе результатов построены графические зависимости изменения статического давления по радиусу конической щели для различных углов наклона щели к оси вращения.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что фактически распределение статического давления по радиусу щели имеет нелинейный характер. При анализе графических зависимостей несложно констатировать стабильный спад статического давления при стремлении жидкости к центру вращения (рис. 2). На графиках кривые представляют собой степенную аппроксимацию, построенную по соответствующим эмпирическим точкам.

Расслоение зависимостей статического давления от расхода утечек определяется в основном схемным решением гидравлической системы, когда расход регулируется изменением давления во входной магистрали.

Экспериментальные исследования являются главным критерием достоверности теории и определяют возможность использования результатов теоретических разработок в практических целях.

Величина нормального зазора оказывает значительное воздействие на характер распределения давления и перепад давления в щели, что может

быть вызвано наличием сил трения (рис. 3). Чем меньше величина зазора, тем больше сила напряжений трения.

Известно, что напряжение трения прямо пропорционально квадрату скорости жидкости [3], а среднерасходная скорость жидкости зависит от проходного сечения щели, т. е. от нормального зазора.

На перепад статического давления в щели оказывает влияние угловая скорость вращения диска (рис. 4).

Несомненно, что вращение диска в результате вязкого трения приводит к закрутке жидкости [4; 5], вследствие чего появляется центробежная сила, величина которой прямо пропорциональна квадрату угловой скорости вращения жидкости.

Сравнение различных методик расчета течения в торцевой щели представлено на рис. 5 [4; 5; 6], где графические зависимости представлены в относительных параметрах:

$\overline{P} = \dfrac{dP}{\rho\omega_д^2 R_д^2}$, dP – перепад статического давления,

$\varphi = \dfrac{C_{2u}}{\omega_д R_д} = \dfrac{\omega_ж}{\omega_д}$ – коэффициент закрутки потока на входе в щель.

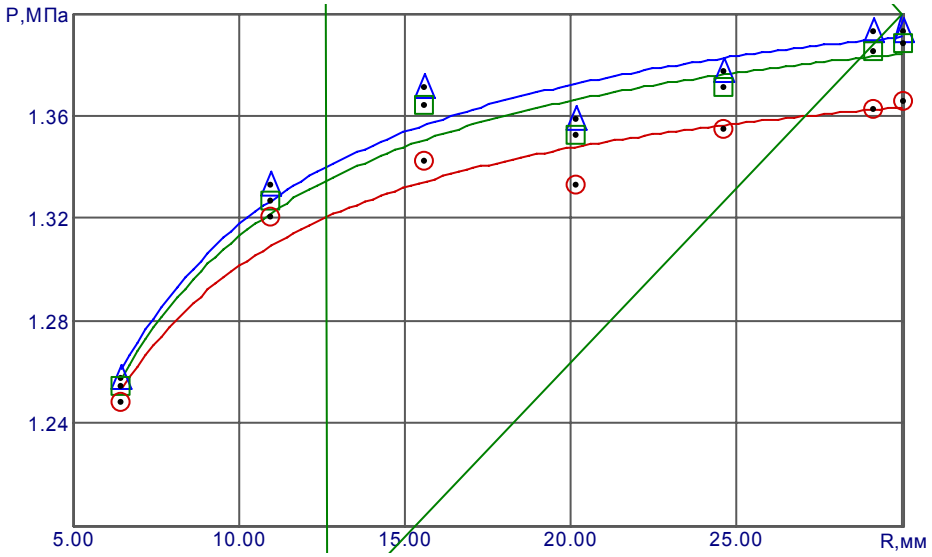


Рис. 3. Распределение статического давления по радиусу конической щели при $\omega_д = 733$ рад/с, $\alpha = 90°$, $\dot{V} = 759 \times 10^{-6}$ м^3/с, эмпирические точки: ◉ – n_0 = 0,00 4 м; ▣ – n_0 = 0,002 м; △ – n_0 = 0,001 5 м

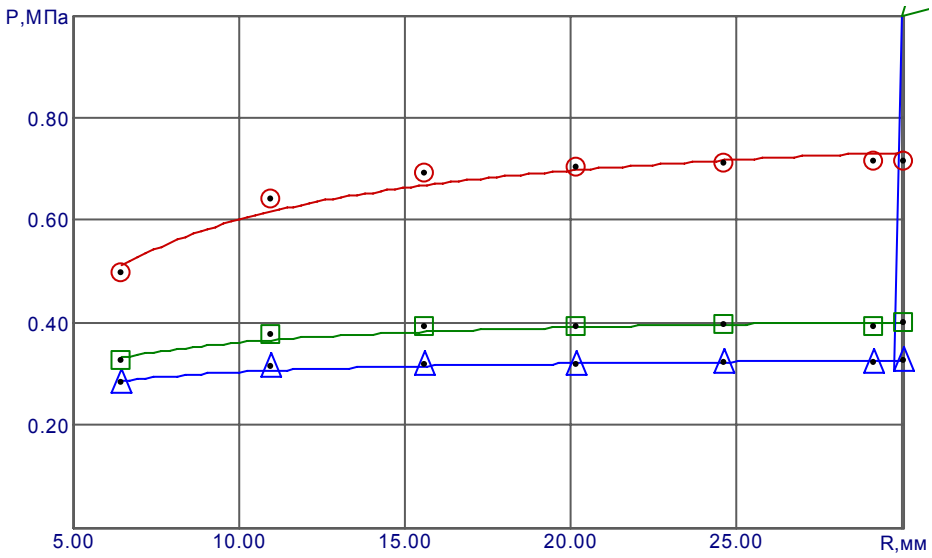


Рис. 4. Распределение статического давления по радиусу конической щели при $n_0 = 0{,}001\ 25$ м, $\alpha = 90°$, $\dot{V} = 384 \times 10^{-6}$ м^3/с, эмпирические точки: ◉ – $\omega_д$ = 733 1/с; ▣ – $\omega_д$ = 534 1/с; △ – $\omega_д$ = 314 1/с

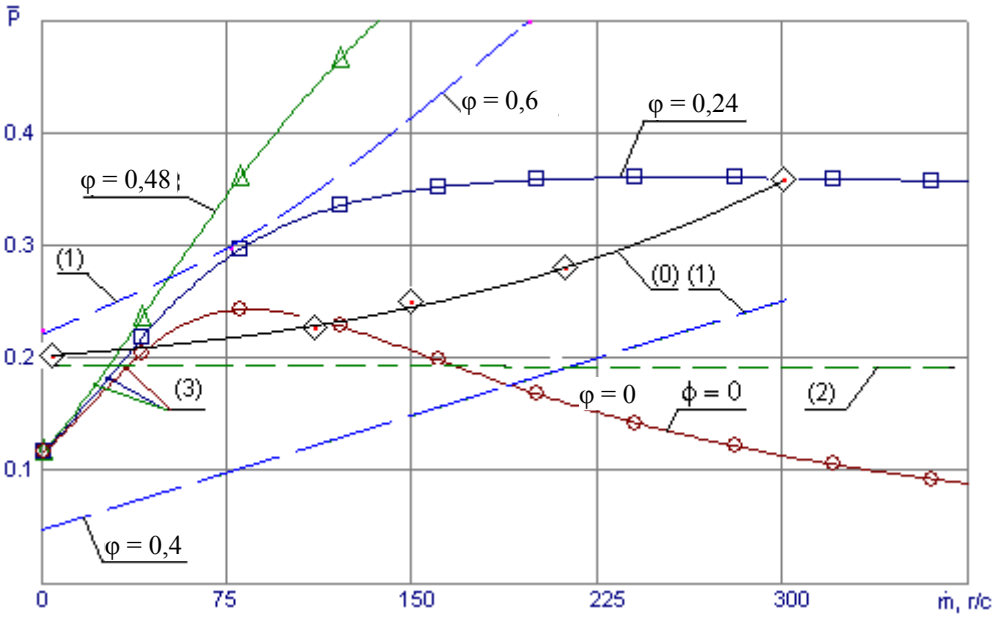


Рис. 5. Сравнение расчетных методик при $\omega_д$ = 4 188 1/с, n_0 = 0,8 мм, $R_{вх}$ = 24,2 мм, $R_{вых}$ = 7,26 мм: (0) – эксперимент, (1) – Вербицкая О. А., (2) – Дью Х. Ф., (3) – авторы

Таким образом, разработанная математическая модель удовлетворительно сходится с экспериментальными исследованиями различных авторов, это позволяет заключить, что данная методика относительно корректно отражает реальную картину течения в боковой полости между вращающимся диском и неподвижной стенкой. Характер распределения давления по радиусу щели имеет большое значение при вычислении интегральной величины осевой силы, которая определяет ресурс работы лопастной машины. А вязкое трение рабочей жидкости о поверхность диска создает момент сопротивления, который снижает коэффициент полезного действия агрегата в целом.

Библиографические ссылки

1. Течение с теплоотдачей в полостях вращения энергетических установок космических и летательных аппаратов / А. А. Зуев [и др.] // Вестник СибГАУ. 2011. Вып. № 7 (40). С. 63–68.

2. Жуйков Д. А., Кишкин А. А., Краев М. В. Течение несжимаемой вязкой жидкости в зазоре конической щели между вращающимся диском и неподвижной стенкой // Известия вузов. Сер. Авиационная техника. 2002. № 3. С. 80.

3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1969. 744 с.

4. Байбиков А. С., Караханьян В. К. Гидродинамика вспомогательных трактов лопастных машин. М. : Машиностроение, 1982. 112 с.

5. Вербицкая О. А. Распределение давления в боковых пазухах центробежных насосов с учетом утечек // Передовой научно-технический и производственный опыт. М. : ВИНИТИ, 1957. 17 с.

6. Дью Х. Ф. Эмпирический метод расчета радиального распределения давления на вращающихся дисках // Энергетические машины и установки : тр. Америк. о-ва инженеров-механиков. 1966. № 2. С. 61–79.

D. A. Zhuykov, V. O. Falkov, A. A. Kishkin, A. A. Zuev, V. P. Nazarov

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF INCOMPRESSIBLE VISCOUS FLUID IN THE FRONT GAP BETWEEN ROTATING DISK AND FIXED BOUNDARY

Experimental studies of viscous fluid in the front gap between rotating disk and fixed boundary are conducted, a design procedure for determination of parameters of the working fluid in the front gap is developed, comparative analysis with the methods of calculation of other authors is presented.

Keywords: rotary flow, experimental studies, viscous stress, moment of friction, axial force.

© Жуйков Д. А., Фальков В. О., Кишкин А. А., Зуев А. А., Назаров В. П., 2012

УДК 662.987

А. А. Зуев, А. А. Кишкин, М. И. Толстопятов, Д. А. Жуйков

ТЕПЛООТДАЧА ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТУРБОМАШИНАХ НА ОСНОВЕ ДВУХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ*

Рассмотрен частный случай течения газового потока, индуцированного вращением диска. Записаны интегральные соотношения уравнения энергии пространственного пограничного слоя для вращательного течения при степенном законе распределения скорости. Получены зависимости для оценки локальных коэффициентов теплоотдачи вращательных течений с различным распределением скорости.

Ключевые слова: теплоотдача, турбулентное течение, уравнение энергии, закон теплообмена.

Течение газового потока для турбонасосных агрегатов (ТНА) носит весьма сложный характер. Поперечный градиент давления оказывает существенное влияние на поверхностное трение и теплообмен. Влияние неучтенных в расчете тепловых нагрузок на узлы и конструкцию может привести к упругим деформациям, а также к нерасчетным параметрам вязкости и плотности рабочего тела, что влечет за собой отклонение от расчетного режима работы агрегата и падение КПД.

Широкое распространение в практике получили методы расчетов по учету теплоотдачи основанные на обобщении экспериментальных данных. Подобные методы показывают удовлетворительные результаты при рассмотрении относительно простых течений. В более сложных условиях, а именно при реализации вращательных течений, зависимости, основанные на обобщении экспериментальных исследований, не применимы, это объясняется достаточно скудными экспериментальными данными в этой области, а также отсутствием точных аналитических решений.

Большие возможности для поиска более точных зависимостей дает теория пограничного слоя. Многочисленными исследованиями установлено, что в большинстве важных для практики тепло- и массообмена между поверхностью тела и жидкостью процессов основная часть изменения температуры и концентрации также происходит в области, прилегающей к поверхности тела [1].

Рассмотрим частный случай турбулентного течения ($\mathrm{Re}_\omega \geq 3\cdot 10^5$) газового потока около вращающегося диска: распределение скорости (u) по толщине пограничного слоя (δ) к скорости в основном потоке (U), апроксимируется степенной функцией

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}. \qquad (1)$$

Учтем, что можно выделить несколько зон турбулентного пограничного слоя. В работе [2] опытные данные по замеру профиля скорости соответствуют линейной зависимости

$$u = \frac{\left(U^*\right)^2 y}{\nu}, \qquad (2)$$

которая получена в предположении, что касательные напряжения полностью определяются как вязкостные, а динамическая скорость в выражении (2), характеризующая собой напряжение трения,

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \qquad (3)$$

может быть сопоставлена с потерей напора Δh прямолинейного равномерного потока в цилиндрической трубе по формуле

$$\tau_0 = \Delta h \rho \frac{d}{4l}, \qquad (4)$$

где Δh – потеря напора по длине l; d – диаметр трубы.

Очевидно, что подход определения характеристик через значения напряжения трения весьма трудоемок с точки зрения аналитических выкладок. Выразим динамическую скорость через параметры пограничного слоя. Потребуем, чтобы на границе вязкого подслоя ($\delta_л$) степенной закон (1) сопрягался с линейным законом (2), т. е. при $y = \delta_л$ будем иметь

$$\frac{\left(U^*\right)^2 y}{\nu} = U\left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}. \qquad (5)$$

Учитывая, что на внешней границе вязкого подслоя

$$\frac{U^*\delta_л}{\nu} = \alpha_л,$$

где $\alpha_л$ – постоянная. Можно записать

$$\delta_л = \frac{\alpha_л \nu}{U^*}. \qquad (6)$$

Тогда с учетом (5), (6)

$$\frac{U^*\alpha_л}{U} = \left(\frac{\alpha_л \nu}{U^*\delta}\right)^{\frac{1}{7}}.$$

После несложных преобразований выражение для квадрата динамической скорости будет иметь вид

$$\left(U^*\right)^2 = \frac{U^2}{\alpha_л^2}\left(\frac{\alpha_л^2 \nu}{\delta U}\right)^{\frac{1}{4}}. \qquad (7)$$

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.1835.

Рассмотрим случай, при котором толщины температурного и динамического пограничных слоев будут одинаковы, т. е. при Pr = 1

$$\frac{T-T_0}{T_\delta-T_0}=\frac{u}{U}=\left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}} \tag{8}$$

С учетом (8) выражение для определения толщины потери энергии в пограничном слое запишется в виде

$$\begin{aligned}\delta_{t\varphi}^{**}&=\int_0^{\delta}\frac{u}{U}\cdot\left(1-\frac{T-T_0}{T_\delta-T_0}\right)dy=\\&=\int_0^{\delta}\left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}\cdot\left(1-\left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}\right)dy=0,097\cdot\delta.\end{aligned} \tag{9}$$

Учитывая закон теплообмена

$$\begin{aligned}\mathrm{St}&=\frac{q_0}{\rho C_pU(T_\delta-T_0)}=\frac{\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0}}{\rho C_pU\left(T_\delta-T_0\right)}=\\&=\frac{\lambda}{\rho C_pU}\left[\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{T-T_0}{T_\delta-T_0}\right)\right]_{y=0},\end{aligned}$$

определим производную температурного пограничного слоя на стенке:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{T-T_0}{T_\delta-T_0}\right)\Big|_{y=0}&=\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u}{U}\right)\Big|_{y=0}=\\&=\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}\Big|_{y=0}=\frac{1}{7\cdot\delta^{1/7}\cdot y^{6/7}}\Big|_{y=0}.\end{aligned} \tag{10}$$

Рассмотрим двухслойную модель пограничного слоя, с учетом (1) и (2) в ламинарном подслое имеем

$$\frac{u}{U}=\frac{\left(U^*\right)^2y}{\nu U},$$

тогда

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u}{U}\right)\Big|_{y=0}&=\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\left(U^*\right)^2y}{\nu U}\right)\Big|_{y=0}=\\&=\frac{\left(U^*\right)^2}{\nu U}\Big|_{y=0}=\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{T-T_0}{T_\delta-T_0}\right)=\text{const}.\end{aligned} \tag{11}$$

Примем во внимание выражение для динамической скорости (7) и толщины потери энергии температурного пограничного слоя (9), окончательно запишем

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{T-T_0}{T_\delta-T_0}\right)=\frac{0,558\cdot U\cdot\left(\frac{\alpha_л^{\,2}\cdot\nu}{U\cdot\delta_{t\varphi}^{**}}\right)^{1/4}}{\alpha_л^{\,2}\cdot\nu}. \tag{12}$$

Закон теплообмена в виде критерия Стантона для степенного профиля распределения скорости имеет вид

$$\begin{aligned}\mathrm{St}&=\frac{\lambda}{\rho C_pU}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{T-T_0}{T_\delta-T_0}\right)=\\&=\frac{0,558\cdot\lambda\cdot\left(\frac{1}{\alpha_л^{\,6}\cdot\nu^3\cdot\delta_{t\varphi}^{**}}\right)^{\frac{1}{4}}}{Cp\cdot U^{1/4}\cdot\rho}.\end{aligned} \tag{13}$$

После упрощения закон теплообмена для турбулентного течения газа имеет вид

$$\mathrm{St}=\frac{\lambda}{\rho C_pU^{0,25}}\frac{0,558}{\alpha_л^{1,5}\nu^{0,75}}\frac{1}{\delta_{t\varphi}^{**0,25}}. \tag{14}$$

Следует отметить, что для практического применения закона теплообмена (14) необходимо определить значение $\alpha_л$. Воспользуемся выражением (3):

$$\rho\left(U^*\right)^2=\tau_0$$

и выражением для закона трения на плоской пластине при турбулентном обтекании для степенного профиля распределения скорости:

$$\frac{\tau_0}{\rho U^2}=0,012\,56\left(\frac{U\delta_\phi^{**}}{\nu}\right)^{-0,25},$$

тогда выражение (3) примет вид

$$\left(U^*\right)^2=\frac{\tau_0}{\rho}=0,012\,56U^2\left(\frac{U\delta_\phi^{**}}{\nu}\right)^{-0,25}. \tag{15}$$

Из условия подобия динамического и температурного пограничных слоев получаем значение производной

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{T-T_0}{T_\delta-T_0}\right)=\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u}{U}\right)=\frac{\left(U^*\right)^2}{\nu U},$$

окончательно имеем

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{T-T_0}{T_\delta-T_0}\right)=\frac{0,012\,56\cdot U^{0,75}}{\nu^{0,75}\delta_{t\varphi}^{**0,25}}. \tag{16}$$

Видно, что выражение (12), полученное из условия смыкания ламинарного подслоя с турбулентным профилем при $y=\delta_л$, и (16), полученное из закона трения степенного турбулентного профиля, имеют сходную форму и отличаются лишь численным коэффициентом. Потребовав равенства производных, определим коэффициент $\alpha_л$:

$$\frac{0,012\,56\cdot U^{0,75}}{\nu^{0,75}\cdot\delta_{t\varphi}^{**0,25}}=\frac{0,558\cdot U\cdot\left(\frac{\alpha_л^{\,2}\cdot\nu}{U\cdot\delta_{t\varphi}^{**}}\right)^{1/4}}{\alpha_л^{\,2}\cdot\nu}. \tag{17}$$

Лучшее совпадение с полученным значением $\alpha_л = 12,559$ дает значение, полученное в работе [3], расхождение составляет 10 %; при $\alpha_л = 5$, полученном в [4], расхождение в 3 раза.

При подстановке (14) в интегральное соотношение уравнения энергии, полученное в [5], учтем что, для вращательного движения (линия тока – кольцевая линия) удобнее выполнить запись в цилиндрических координатах: $\varphi = \alpha;$; $\psi = R$; $H_\varphi = R$; $\frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi} = \frac{\partial R}{\partial R} = 1$; $H_\psi = 1$; $\frac{\partial H_\psi}{\partial \varphi} = 0$; $\frac{\partial}{\partial \phi} = 0,$ тогда будем иметь

$$J\varepsilon \frac{\partial}{\partial R}\delta^{**}_{t\varphi} + \frac{J\varepsilon}{R}\delta^{**}_{t\varphi} = \\ = \frac{\lambda}{\rho C_p U^{0,25}} \frac{0,558}{\alpha_л^{1,5}\nu^{0,75}} \frac{1}{\delta^{**0,25}_{t\varphi}} - \frac{\tau_{\varphi_0}\left(1+\varepsilon^2\right)}{\rho C_p \left(T_\delta - T_0\right)}. \quad (18)$$

Выражение для определения коэффициента теплоотдачи имеет вид

$$\alpha = \rho \cdot Cp \cdot U \cdot \mathrm{St}. \quad (19)$$

После преобразования (18) с учетом (19) можно записать выражения для определения коэффициента локальной теплоотдачи для вращательных течений газового потока с различным распределением скоростей. Для вращательного течения по закону свободного вихря, с распределением скорости $UR = C = \mathrm{const}$ имеем:

$$\alpha = \frac{2,18 \cdot \rho \cdot Cp \cdot U}{\mathrm{Pr}^{\frac{4}{5}}} \left(\frac{2J\varepsilon}{\alpha_л^6 \cdot \mathrm{Re}_\omega} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (20)$$

Для вращательного течения, индуцированного вращением диска (закон твердого тела), с распределением скорости $\frac{U}{R} = \omega = \mathrm{const}$

$$\alpha = \frac{0,528 \cdot \rho \cdot Cp \cdot U}{\mathrm{Pr}^{\frac{4}{5}}} \left(\frac{2J\varepsilon}{\alpha_л^6 \cdot \mathrm{Re}_\omega} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (21)$$

В (23) и (24) J – относительная характерная толщина, полученная в работе [6], ε – тангенс угла скоса донной линии тока.

Таким образом, получены зависимости для оценки локального коэффициента теплоотдачи вращательных течений газового потока при различном распределении скоростей; выражения позволяют учитывать локальную температуру движущегося потока, распределение температуры в теплопроводящей стенке, элементарное количество тепла, переданного через единицу поверхности; вывод выражений осуществлялся с учетом подобия температурного и динамического пограничных слоев, что характерно для частного случая Pr = 1.

Библиографические ссылки

1. Кейс В. М. Конвективный тепло- и массообмен : пер. с англ. М. : Энергия, 1972. 448 с.

2. Войткунский Я. И., Фаддеев Ю. И., Федяевский К. К. Гидромеханика : учебник. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Судостроение, 1982. 456 с.

3. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика : учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1987. 440 с.

4. Романенко П. Н. Тепломассообмен и трение при градиентном течении жидкостей. М. : Энергия, 1971.

5. Интегральное соотношение уравнения энергии температурного пространственного пограничного слоя / А. А. Зуев [и др.] // Вестник Рыбинской гос. авиац. технол. акад. имени П. А. Соловьева. 2010. № 2 (17). С. 37–42.

6. Относительные характерные толщины динамического пограничного слоя при различных законах распределения скорости / А. А. Кишкин [и др.] // Вестник СибГАУ. 2009. № 3 (24). С. 129–133.

A. A. Zuev, A. A. Kishkin, M. I. Tolstopyatov, D. A. Zhuykov

ROTATIONAL FLOWS HEAT TRANSFER IN TURBOMACHINES BASED ON TWO-LAYER MODEL OF TURBULENT BOUNDARY LAYER

Individual case of flow of gas flow induced by rotation of disk is considered in the article. Integral relations of energy equation of dimensional boundary layer for flow with rotary power law velocity distribution is presented. Dependencies for estimation of local heat transfer coefficients of rotational flows with different velocity distribution are obtained.

Keywords: convective heat transfer, turbulent flow, energy equation, heat transfer law.

© Зуев А. А., Кишкин А. А., Толстопятов М. И., Жуйков Д. А., 2012

УДК 629.78

М. И. Кислицкий

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНИВАНИЯ СИСТЕМНОГО ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассмотрено системное влияние дополнительной полезной нагрузки на функционирование космического аппарата (КА). Определен состав математической модели для оценки этого влияния. Приведены показатели стойкости КА и используемые допущения.

Ключевые слова: дополнительная полезная нагрузка, влияние, космический аппарат, двойное использование.

Значение космических средств в решении социально-экономических, научных и оборонных задач в настоящее время велико и постоянно возрастает. Растут требования к объему и качеству решения в космосе целевых задач. В то же время ракетно-космическая техника является весьма сложной и дорогостоящей. Объем средств, выделяемых государством на космическую деятельность, ограничен. Таким образом, объективно существует противоречие между потребностями в результатах космической деятельности и требованиями к космическим средствам с одной стороны, и возможностями их удовлетворения при реально доступном объеме финансирования космической деятельности, с другой стороны. Для решения данного противоречия необходимо реализовать способы повышения эффективности использования космических средств.

К числу таких способов относится двойное использование космических комплексов (КК). При двойном использовании на штатном космическом аппарате (КА) размещается дополнительная целевая аппаратура (ДЦА) иного, по сравнению со штатной целевой аппаратурой КА, назначения с обеспечением функционирования ДЦА за счет использования имеющихся технических резервов КА. При этом КА продолжает выполнять свою основную целевую задачу. Для ДЦА, создаваемых в рамках государственных программ, не требуется оплата использования ресурсов КК, созданных на госбюджетные средства, и выведения ДЦА на орбиту. Это дает существенную экономию средств. В результате при двойном использовании космических средств обеспечивается получение дополнительного выходного эффекта при минимальных дополнительных затратах. В связи с этим направление двойного использования (ДИ) космических средств с размещением ДЦА актуально и перспективно.

Практика космической деятельности свидетельствует о том, что в силу целого ряда причин космические средства, как правило, имеют неиспользуемые технические резервы, поэтому сфера применимости ДИ весьма широка.

В данной работе рассматривается двойное использование КК с КА серии «Космос». Исходя из сущности и статуса решаемых КК с КА серии «Космос» задач, их важности для государства, были сформированы следующие основные принципы ДИ КК [1]:

– принцип приоритетности: двойное использование КК не должно приводить к снижению качества решения этими КК целевых задач, ради которых они создавалис;

– принцип конфиденциальности: двойное использование КК не должно приводить к утечке информации ограниченного доступа;

– принцип экономичности: объем доработок штатных КК при реализации их двойного использования должен быть минимизирован.

Необходимо учитывать, что для обеспечения функционирования ДЦА с заданными параметрами в составе КА помимо собственно ДЦА размещаются дополнительные технические средства (ДТС). Задача ДТС – адаптация ДЦА к КА с учетом располагаемых его возможностей и интеграция ДЦА с КА. Совокупность ДЦА и ДТС будем называть дополнительной полезной нагрузкой (ДПН).

Размещение ДПН на КА и обеспечение ее функционирования неизбежно оказывают сложное системное влияние на технические характеристики и функционирование КА. Как указано выше, при двойном использовании не допускается снижение качества решения основной целевой задачи. Следовательно, степень изменения параметров КА за счет влияния ДПН должна укладываться в диапазоны значений параметров, в пределах которых обеспечиваются заданные условия работы основной целевой аппаратуры КА. Чтобы выполнить вышеуказанное условие, необходимо выявить виды влияния ДПН на характеристики бортовых систем КА. На основе анализа этого влияния может быть создана математическая модель (ММ) КА с ДПН. Такая ММ станет инструментом оценки реализуемости проектов ДИ космических комплексов (КК) на ранней проектной стадии работ и будет служить аппаратом поддержки принятия решения в ходе разработки проектов таких КК.

Тематика двойного использования космических средств до настоящего времени мало отражена в научно-технической литературе. Ряд вопросов, связанных с решением проблем, возникающих при двойном использовании КА, рассмотрен в [2–6]. В этих работах исследовались отдельные аспекты реализации ДИ КА и влияния ДПН на функционирование КА. При этом анализ опубликованных работ показал, что они рассматривают отдельные частные аспекты данной проблематики; материалы системного оценивания

всей совокупности видов влияния ДПН на КА отсутствуют.

Дополнительная полезная нагрузка размещается, как правило, на внешней поверхности КА. При этом между КА и ДПН существует механическая связь, а также обмен энергетическими и информационными потоками.

На стадии разработки проекта ДИ КК необходимо провести анализ и выполнить количественную оценку степени изменения характеристик КА и ДПН с помощью математических моделей.

КА представляется совокупностью целевой системы и бортовых обеспечивающих систем. По результатам проведенного анализа типовой структуры КА выделен состав бортовых систем и их элементов, чувствительных к воздействию со стороны ДПН, изменение характеристик которых способно повлечь за собой нарушение нормального функционирования КА.

Состав этих элементов представлен на рис. 1.

При проведении анализа КА как объекта воздействия со стороны ДПН в первую очередь выделяются элементы КА, в основе функционирования которых лежит взаимодействие с электромагнитным излучением (ЭМИ).

Целевая система (ЦС) – это технические средства, непосредственно реализующие решение задачи, стоящей перед КА.

В основу их функционирования, как правило, заложены физические принципы поглощения и/или излучения ЭМИ с той или иной длиной волны. Множество ЦС можно разделить на две большие группы. ЦС оптического и радиоэлектронного типов (рис. 2).

Пути негативного воздействия на ЦС со стороны ДПН:

1) непосредственное воздействие на наружные элементы ЦС (затенение, воздействие собственным ЭМИ);

2) опосредованное воздействие на ЦС, заключающееся в воздействии на элементы КА, не входящие в состав ЦС, но изменение характеристик которых способно привести к нарушению нормального функционирования ЦС путем выхода из строя элементов ЦС или такому изменению условий на борту КА, при котором нормальное функционирование ЦС станет невозможным.

В случае применения ОС ДПН следует стремиться размещать таким образом, чтобы не оказаться в зоне видимости объектива ЦС. Для радиоэлектронных ЦС воздействие ДПН будет иметь место, если ДПН попадет в диаграмму направленности АФУ.

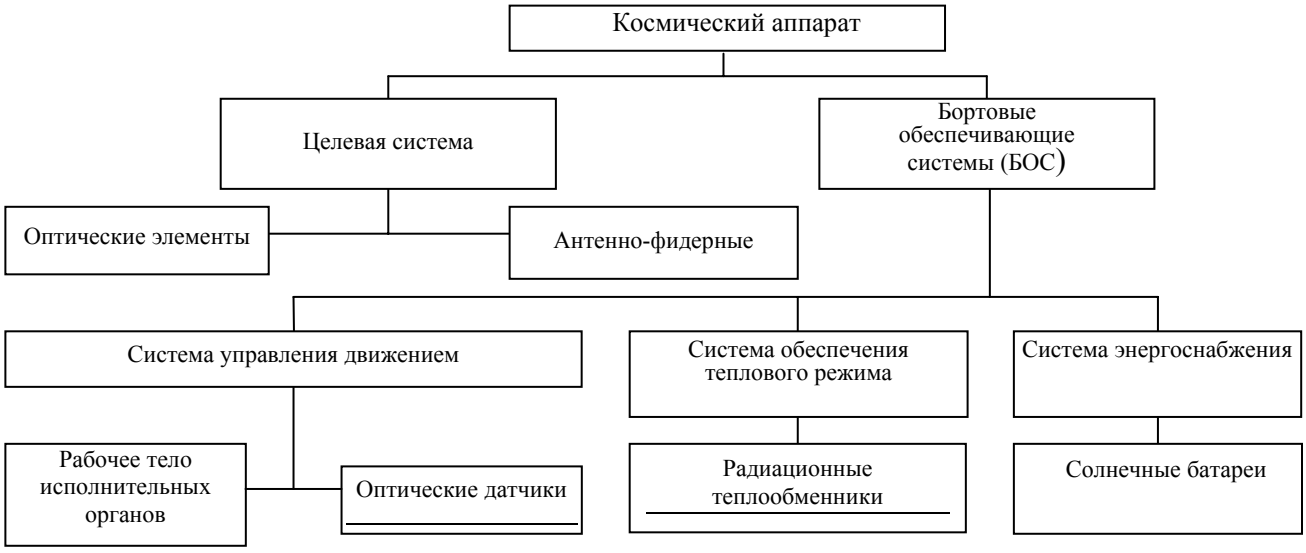


Рис. 1. Состав элементов бортовых систем КА, подверженных влиянию ДПН

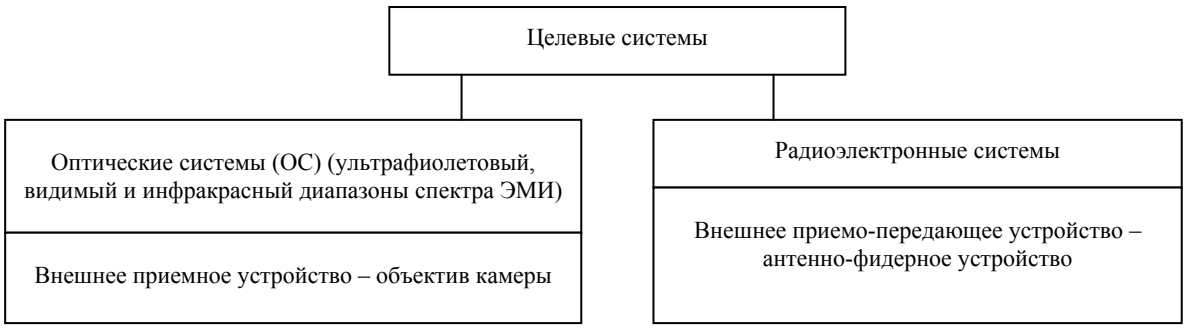


Рис. 2. Основные типы целевых систем

Наиболее значимым представляется опосредованное воздействие ДПН на ЦС путем изменения характеристик бортовых обеспечивающих систем и их элементов. Датчики ориентации системы управления движением (СУД) имеют в своем составе оптические элементы, чувствительные к затенению. Возникновение зон затенения ДПН поверхностей этих элементов способно повлиять на их выходные характеристики, что приведет к искажению показаний датчиков. Кроме того, характеристики СУД и КА в целом оказывают определяющее влияние на ресурс рабочего тела КА, т. е. срок, в течение которого имеющийся на борту запас топлива системы исполнительных органов (СИО) обеспечивает заданные параметры движения КА. Ресурс рабочего тела является верхним пределом возможного срока активного существования КА и поэтому является одной из важнейших характеристик последнего. Размещение на КА ДПН приводит к изменению массогабаритных характеристик, моментов инерции и положения центра масс КА, в результате изменяется расход топлива СИО. Воздействие со стороны ДПН на систему обеспечения теплового режима (СОТР) заключается в образовании зон затенения РТО и терморегулирующих покрытий, что приводит к снижению их излучательной способности. При затенении ДПН солнечных батарей (СБ) системы энергоснабжения (СЭС) снижается генерируемая СЭС мощность. Это способно привести к нарушению нормального функционирования КА в связи с недостаточным уровнем энергоснабжения бортовых систем.

КА является сложной технической системой, функционирование всех элементов которой направлено на решение определенных задач, стоящих перед системой, поэтому все элементы КА тесно связаны между собой и взаимодействуют друг с другом. Изменение характеристик элементов отдельных бортовых систем КА способно привести к изменению параметров функционирования этих систем, что, в свою очередь, может повлиять на работу других элементов КА. Следовательно, при оценке работоспособности КА совместно с ДПН нельзя ограничиться только оценкой изменений характеристик чувствительных к ее влиянию элементов и работоспособности систем, содержащих эти элементы. Необходимо учитывать связи, существующие между этими системами и другими элементами КА.

По результатам проведенных исследований разработана структурная схема взаимовлияний элементов бортовых систем КА и ДПН (рис. 3). Она представлена совокупностью четырех систем: целевой системы, СОТР, СЭС и СУД, в состав которых входят чувствительные к воздействию ДПН функциональные элементы (элементы ЦС, радиационные теплообменники СОТР, солнечные батареи СЭС и оптические датчики СУД).

Как следует из рис. 3, влияние изменения параметров работы элементов, подверженных воздействию ДПН, на работу бортовых систем и их элементов осуществляется за счет наличия между ними шести связей. Рассмотрим их.

1. В результате затенения оптических датчиков СУД возникают ошибки определения углового положения КА, которые, в свою очередь, ведут к нарушению его ориентации и снижению точности наведения оси ЦС. А от точности наведения оси зависит качество решения целевой задачи КА.

2. При нарушении точности ориентации панелей солнечных батарей СЭС на Солнце происходит изменение потока солнечного излучения, поступающего на СБ. Наряду с затенением элементами систем и конструкции ДПН фотоэлектрических преобразователей, нарушение ориентации СБ ведет к снижению генерируемой мощности, которое может стать причиной выхода КА из строя.

3. При нарушении ориентации радиационного теплообменника (РТО) СОТР происходит изменение поглощаемых тепловых потоков, поступающих из окружающей среды. Затенение РТО и изменение тепловых потоков со стороны Земли и Солнца способны привести к заметному изменению температуры теплоносителя на выходе из РТО, что отражается на работоспособности СОТР.

4. При изменении теплового режима КА, вызванного затенением и нарушением ориентации РТО, происходит увеличение потребления электроэнергии за счет включения или перевода работающих агрегатов СОТР (насосов, вентиляторов, нагревателей) в другие режимы для изменения тепловых потоков между функциональными элементами КА с целью поддержания в заданных пределах температур объектов регулирования СОТР, что сказывается на работе СЭС.

5. При нарушении функционирования СУД возникает изменение режима углового движения КА, что влечет за собой изменение потребления электроэнергии СИО СУД, представляющее собой часть нагрузки на СЭС. Это может повлиять на работоспособность СЭС и энергообеспечение других БС.

6. При размещении ДПН на КА изменяется расход рабочего тела СУД на поддержание заданных параметров орбиты и угловую стабилизацию, что может привести к преждевременному прекращению активного функционирования КА.

Разрабатываемая математическая модель функционирования КА отличается от разработанных ранее наличием ДПН. При моделировании процесса функционирования КА принято допущение, что КА находится в исправном состоянии и все нарушения работы систем и их элементов являются следствием только воздействия со стороны ДПН. Так как не подверженные воздействию со стороны ДПН системы и элементы КА не изменяют параметров своей работы, то принятое допущение позволяет для составления модели функционирования ограничиться моделированием работы четырех бортовых систем (ЦС, СЭС, СОТР и СУД) и моделированием работы ДПН, как одной из БС. Функционирование остальных систем и элементов КА учитывается комплексом ограничений и требований к параметрам функционирования указанных систем и их элементов.

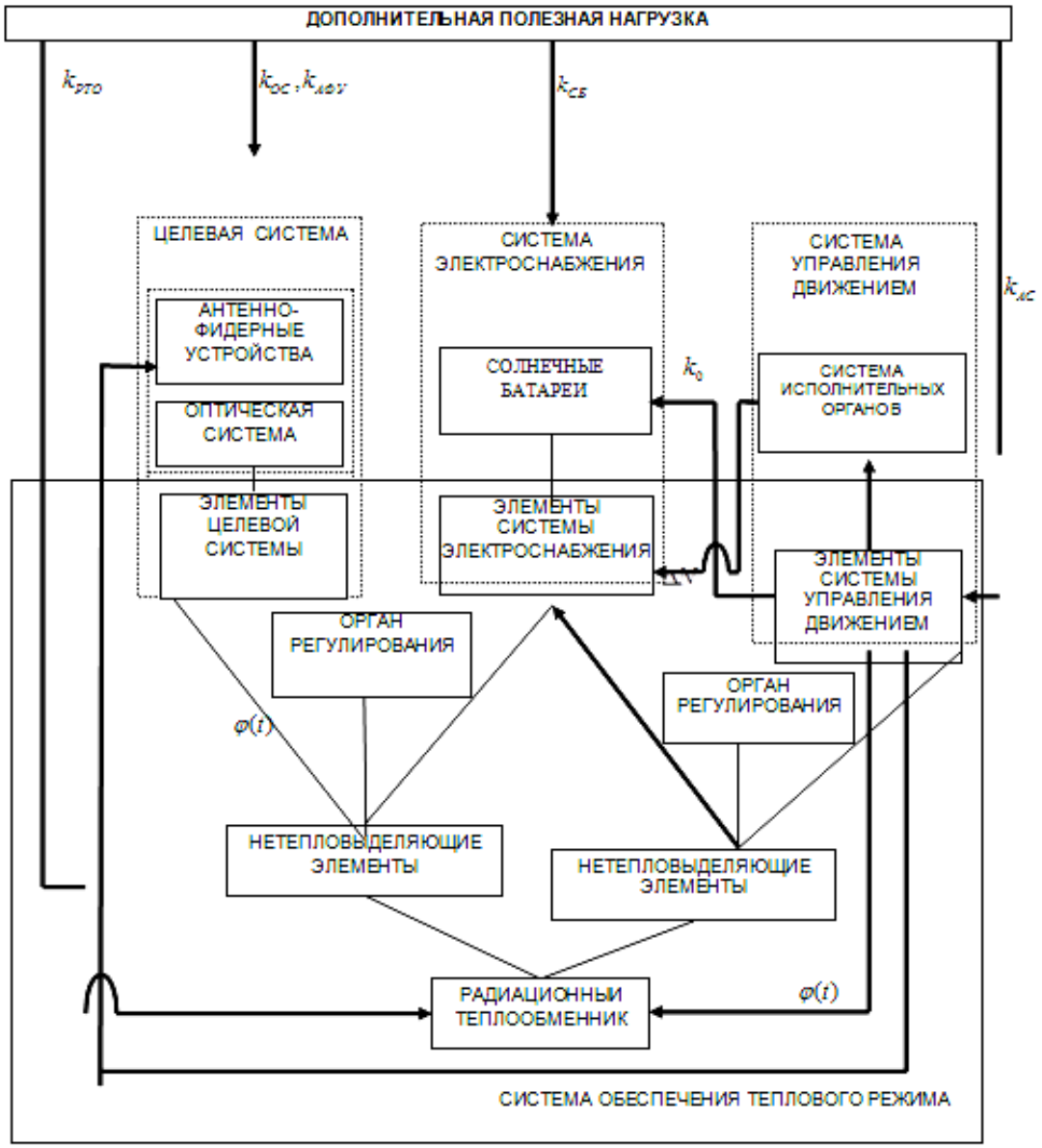


Рис. 3. Структурная схема КА с ДПН:

$\phi(t)$ – угол ориентации КА; ΔN – изменения электропотребления; $k_{ОС}, k_{АФУ}$ – показатели влияния ДПН на ОС и АФУ соответственно; $k_{СБ}$ – показатель влияния ДПН на СБ; $k_{О}$ – показатель влияния снижения точности ориентации на СБ; $k_{РТО}$ – показатель влияния ДПН на функционирование РТО; $k_{АС}$ – показатель влияния ДПН на датчики ориентации

В результате ММ процесса функционирования КА строится в соответствии с представленной на рис. 4 структурной схемой.

На ранней стадии разработки проекта двойного использования КА проводится оценка приемлемости конкретной ДЦА для данного КА путем сравнения характеристик последнего из имеющихся резервных ресурсов с требованиями, предъявляемыми ДПН. Эта оценка носит предварительных характер. Комплексную оценку технической целесообразности реализации проекта ДИ КА дает оценивание стойкости КА к воздействию ДПН.

Оценивание стойкости КА к воздействию ДПН представляет собой вычисление значения показателя стойкости и сравнение его с требуемым значением. Поэтому, для решения этой задачи в первую очередь необходимо обоснованно выбрать показатель стойкости КА к влиянию ДПН.

Процесс функционирования КА предполагает наличие множества неопределенностей, проявляющихся в результате как случайного объема решаемых им задач, так и неопределенности некоторых характеристик элементов КА, а также множества внешних факторов, меняющихся случайным образом [5; 6] Поэтому результаты целенаправленного процесса функционирования КА в условиях влияния ДПН будут случайными, и показатель стойкости КА должен это учитывать.

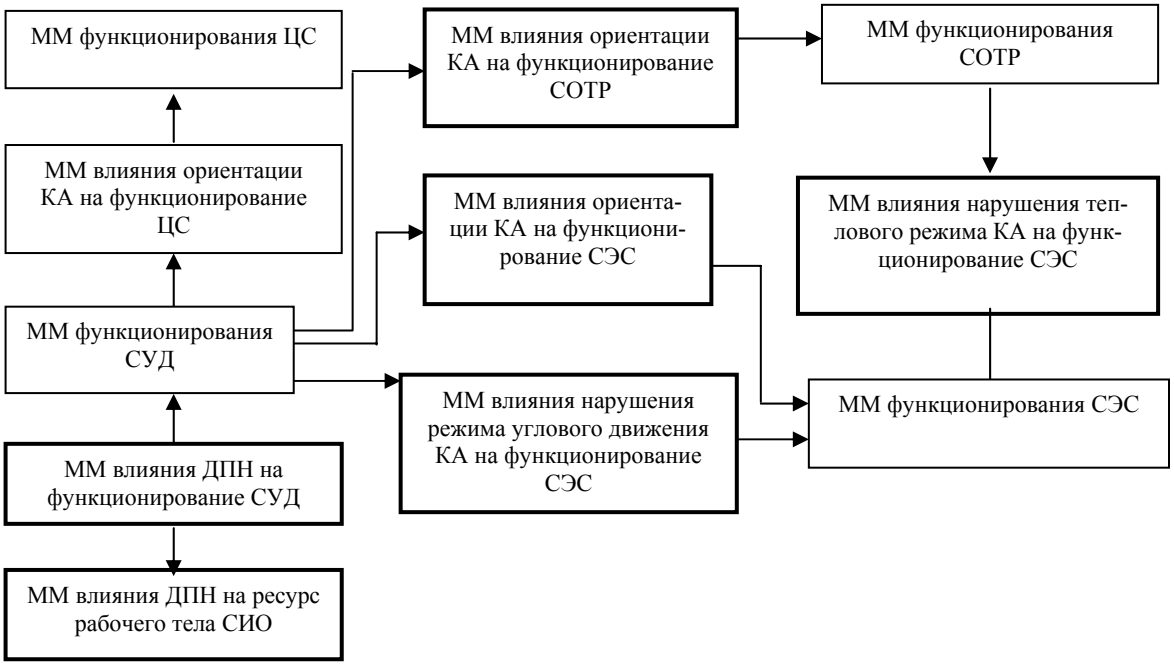


Рис. 4. Структурная схема математической модели функционирования КА

Показатель стойкости должен количественно характеризовать способность КА сохранять свои функции в условиях влияния ДПН, при этом он должен учитывать случайный характер результатов функционирования подверженных влиянию ДПН космических аппаратов. В качестве показателя стойкости КА к влиянию ДПН целесообразно рассматривать вероятность нахождения КА в работоспособном состоянии $P_{\text{КА}}^{\text{нф}}$, в котором он способен решать стоящие задачи с требуемым качеством в течение заданного промежутка времени.

Качество выполнения КА целевых задач сложным образом зависит от работоспособности всех функциональных систем и элементов. Показатель стойкости КА можно представить в виде

$$P_{\text{КА}}^{\text{нф}} = P\left(\hat{P}_0 \le P_0^{\text{д}} \bigcap \hat{T}_{<i>} \in \left\{T^{\text{д}}_{<i>}\right\} \bigcap \hat{E}_{\text{СЭС}} \ge 0 \bigcap \hat{\varphi}_{\text{M}<3>} \le \varphi_{\text{M}}^{\text{д}} \bigcap \left|\hat{\psi}_{<3>}\right| \le \left|\psi^{\hat{\text{д}}}_{<3>}\right| \bigcap t \le t_{\text{ТР}}\right), \quad (1)$$

где $P_0^{\text{д}}, \left\{T^{\text{д}}_{<i>}\right\}, \varphi_{\text{M}}^{\text{д}}$ – диапазоны допустимых значений параметров функционирования элементов КА; $t_{\text{ТР}}$ – время, в течение которого оценивается стойкость КА; $\hat{E}_{\text{СЭС}}$ – баланс генерируемой и потребляемой электроэнергии на борту КА за время $t_{\text{ТР}}$; $\left|\psi^{\hat{\text{д}}}_{<3>}\right|$ – максимальное допустимое отклонение КА от заданного углового положения; $T_{\langle i\rangle}$ – температура элементов КА.

Знак ^ в представленных соотношениях используется для обозначения величин, носящих случайных характер.

Формулировка показателя стойкости КА, представленная выражением (1), справедлива при допущении, что в отсутствие ДПН все системы и элементы исследуемого объекта функционируют надежно с требуемым качеством, а в результате воздействия ДПН происходит изменение только свойств подверженных влиянию ДПН элементов КА.

Для оценки показателя стойкости КА введем ряд допущений.

По результатам проведенного анализа представляется целесообразным для описания температуры ОР использовать закон β-распределения:

$$f_T(T) = \frac{6(T - T_{\min})(T_{\max} - T)}{(T_{\max} - T_{\min})^3} \times \times \Delta(T - T_{\min})\Delta(T_{\max} - T), \quad (2)$$

где $T_{\max}, T_{\min}$ – соответственно верхняя и нижняя границы интервала распределения допустимой температуры.

Потребление электроэнергии элементами КА зависит от объема решаемых задач. Особенности энергопотребления многих КА позволяют использовать двухуровневую циклограмму энергопотребления, предусматривающую дежурную $N_{\text{деж}}$ и пиковую $N_{\text{пик}}$ нагрузку на СЭС. Характер решаемых КА задач, как правило, предусматривает относительно непродолжительное включение целевой аппаратуры с частотой, задаваемой потоком распределения наблюдаемых объектов. Принимая допущение о равномерности распределения заданных объектов по трассе полета КА, циклограмма его энергопотребления может быть представлена множеством равномерно распределенных во времени участков пикового энергопотребления (рис. 5).

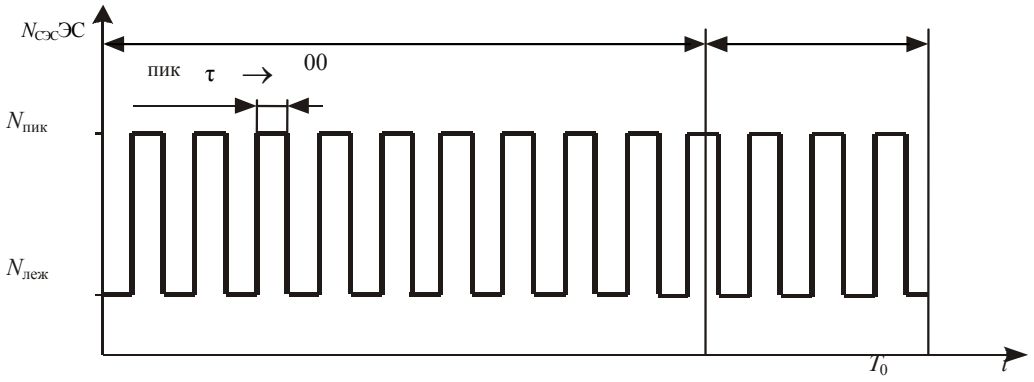


Рис. 5. Циклограмма энергопотребления КА:
$N_{пик}$ – уровень пикового энергопотребления; $N_{деж}$ – уровень дежурного энергопотребления; $\tau_С$ – время движения КА по освещенному участку орбиты; $\tau_Т$ – время движения КА по теневому участку орбиты; $\tau_{пик}$– длительность участка пикового энергопотребления; T_0 – период орбитального полета КА

Тогда потребление электроэнергии в штатных режимах функционирования КА может быть представлено в виде

$$\hat{N}_{СЭС}(t) = \frac{N_{пик}\hat{\tau}_{пик} + N_{деж}(T_0 - \hat{\tau}_{пик})}{T_0}. \qquad (3)$$

Суммарное время пикового потребления электроэнергии за период орбитального движения КА может непрерывно принимать значения в диапазоне $\tau_{пик} \in [0, T_0]$. Примем допущение о том, что суммарное время функционирования КА в режиме пикового энергопотребления распределено по усеченному нормальному закону

$$f_\tau(\tau_{пик}) = \frac{1}{C_\tau \sigma_\tau \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau_{пик} - M\tau)^2}{2\sigma_\tau^2}} \times \qquad (4)$$
$$\times \Delta(\tau_{пик})\Delta(T_0 - \tau_{пик})$$

где $C_\tau = \frac{1}{\sigma_\tau\sqrt{2\pi}} \int_0^{T_0} e^{-\frac{(\tau_{пик} - M\tau)^2}{2\sigma_\tau^2}} dt$ – коэффициент пропорциональности, учитывающий «усечение» закона распределения; $M\tau, \sigma\tau$ – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение суммарного времени пикового энергопотребления соответственно.

При решении стохастических задач моделирования объектов чаще всего применяется метод статистического имитационного моделирования, главное преимущество которого заключается в возможности моделировать стохастические процессы практически любой сложности с высокой степенью адекватности. Кроме того, метод статистического имитационного моделирования предоставляет широкие возможности по применению современной вычислительной техники.

На основе применения метода статистического имитационного моделирования разрабатывается методика, позволяющая оценивать стойкость КА в два этапа.

На первом этапе производится расчет оценки показателя стойкости методом статистического имитационного моделирования. Выбор промежутка времени, в течение которого производится моделирование процесса функционирования КА, осуществляется исходя из заданного времени функционирования аппарата, входящего в состав показателя стойкости КА. На втором этапе оценивания стойкости КА к влиянию ДПН осуществляется сравнение полученного показателя стойкости КА с требуемым значением этой величины. Предложенная модель обеспечивает комплексное оценивание стойкости КА с учетом изменения характеристик всех уязвимых элементов и взаимовлияния нарушений функционирования бортовых систем аппарата.

Библиографические ссылки

1. Кислицкий М. И. Концепция двойного использования космических аппаратов // Вестник СибГАУ. 2011. № 2(35). С. 119–124.

2. Никольский В. В. Оптимизация резерва массы полезной нагрузки космического аппарата по обобщенной математической модели / Уткинские чтения : тр. V Междунар. науч.-техн. конф. СПб. : БГТУ, 2011. С. 89–90.

3. Тарасов Ю. Л., Фомин Г. Е. Двойные технологии проведения научных исследований в открытом космосе // Сб. научн.-техн. статей по ракетно-космической тематике / под ред. Д. И. Козлова ; ЦСКБ «Прогресс». Самара, 1999. С. 186–196.

4. Романов А. В., Никольский В. В. Исходная эффективность космического аппарата наблюдения // Оптимизация элементов конструкции космических аппаратов и двигательных установок : сб. статей. СПб., 2004. С. 31–34.

5. Абдурахимов А. А., Езерский В. В. К вопросу об оценивании результатов воздействия космического мусора на ЛА на этапе проектирования // Проблемы теории, проектирования и конструирования ракет,

ракетных двигателей и наземного оборудования к ним : тезисы докладов 31-го науч.-техн. семинара. Саратов, 1998. С. 97–98.

6. Абдурахимов А. А., Езерский В. В. Математическая модель ЛА для оценивания его стойкости к воздействию микрочастиц космического мусора // Проблемы, методы, алгоритмы испытаний и управления космических систем (комплексов) : науч.-техн. сб. (труды). Вып. 6 (ОВТИ). Т. 1. СПб. : МО РФ, 1999. С. 63–67.

M. I. Kislitskiy

METHODOLOGICAL BASES OF ESTIMATION OF SYSTEMIC ACTION OF ADDITIONAL PAYLOAD ON SPACECRAFT FUNCTIONING

Systemic astion of additional payload on spacecraft functioning is considered. The structure of mathematical model for assessment of this influence is defined. Indicators of resistibility of a spacecraft and hypothesis used are presented.

Keywords: additional payload, influences, spacecraft, double use

© Кислицкий М. И., 2012

УДК 621.25.532.528.001.2(02)

М. В. Краев, Е. М. Краева

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ КАВЕРН В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ВЫСОКООБОРОТНОМ НАСОСЕ*

Рассмотрены особенности кавитационных процессов в проточной части высокооборотного центробежного насоса. На основе высокоскоростной регистрации по визуализации формирования кавитационной каверны представлены экспериментальные материалы, характеризующие форму, объем и параметры развития кавитационной полости. Получена зависимость изменения объема каверны при работе центробежного насоса в диапазоне параметров, характеризующих срывной режим насосного агрегата и следующие за ним кавитационные автоколебания в гидросистеме ЖРД.

Ключевые слова: высокооборотные турбонасосные агрегаты, жидкостные ракетные двигатели, кавитационные каверны, центробежный насос.

Высокооборотные турбонасосные агрегаты (ТНА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) обладают высокими антикавитационными свойствами при угловой скорости ротора более 1 000 рад/с [1]. Особенности работы ЖРД обусловлены явлениями, протекающими в системе подачи на переходных режимах: при запуске двигателя, останове, переходе на режим другой тяги и т. п. Например, при запуске могут возникать глубокие провалы давления компонентов топлив на входе в насос, что приводит к возникновению кавитации [2].

При анализе динамических свойств системы подачи двигательной установки с ЖРД на переходных режимах работы важное значение приобретает оценка характеристик расходной магистрали с насосным агрегатом, работающим в режиме развитой кавитации.

Начало кавитационных каверн формируется при давлении на входе в насос $P_{кав}$ (рис. 1). При дальнейшем снижении давления от $P_{кав}$ до $P_{кр}$, несмотря на формирование кавитационных каверн, в проточной части насоса величины расхода и напора практически не изменяются. Такой режим работы является режимом частичной или скрытой кавитации, и для него характерен резкий рост виброактивности насоса и всей системы гидродинамической системы подачи ЖРД.

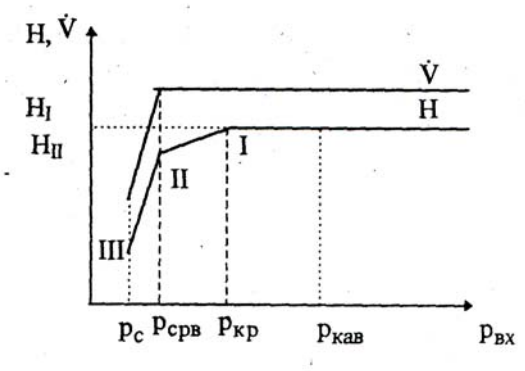


Рис. 1. Срывная кавитационная характеристика высокооборотного насоса

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № Б.7.4791.2011).

Работа насосов при наличии скрытой кавитации на стационарных и нестационарных режимах характерна для всех насосов ЖРД, что связано с низкими давлениями в баках ракет-носителей и соответственно на входе в насосы.

Кавитация в высокооборотных насосных агрегатах (НА) ЖРД имеет различные формы [4]. Основная из них – профильная, обусловленная применением в рабочих колесах НА ЖРД заостренных кромок лопаток. Профильная кавитация формируется в виде присоединения паровой каверны к профилю лопатки. Сопутствующая ей вихревая кавитация образуется в вихрях потока жидкости, например в зоне обратных токов и в концевых вихрях на периферии лопаток, а также в области замыкания кавитационной каверны в проточной части РК насоса. Такие режимы скрытой кавитации характеризуются нестационарностью режима работы гидросистемы ЖРД с появлением виброактивности насоса. При длительной работе насосов на режимах скрытой кавитации наблюдается появление эрозионных каверн в виде повреждений межлопаточных каналов РК. При критическом снижении давления на входе в насос отмечается падение энергетических параметров насоса и стремительное достижение срывного режима работы системы подачи, что характеризуется давлением срыва $P_{срв}$ на входе в насос. Трудности при исследовании кавитационных течений в проточной части высокооборотного насосного агрегата связаны с быстротечностью самого процесса кавитации [4].

При проектировании высокооборотных насосов ЖРД рабочее давление на входе в насосы выбирается вблизи $P_{кр}$ (см. рис. 1). В процессе работы двигателя входное давление может падать до величины, меньшей $P_{кр}$, в то время как для промышленных насосов это не допускается. При давлении $P_{кр}$ напор насоса начинает снижаться (одновременно с напором снижается мощность и КПД. При давлении на входе $P_{срв}$ резко падает и формируется режим развитой кавитации, который является срывным. На величину $P_{срв}$ существенно влияют отклонения теплофизических свойств перекачиваемой жидкости от их номинальных значений. При дальнейшем снижении давления до $P_с$ на входе в новое наступает суперкавитационный критический режим, который характерен тем, что насос работает при резко уменьшающихся значениях напора и расхода. По своей величине $P_с$ близок к $P_{срв}$ или равен ему.

Анализ кавитационных процессов показывает, что в динамике при быстрых изменениях входного давления напор насосов не соответствует их статическим срывным кавитационным характеристикам, а изменяются с некоторыми фазовыми сдвигами относительно провалов давления на входе в насосы. Авторами работы [2] экспериментально установлено, что основной причиной наблюдаемых сдвигов являются затраты времени на образование и захлопывание кавитационных каверн в межлопаточном канале центробежного насоса. При этих явлениях изменение объема кавитационных каверн происходит исключительно за счет нарушения баланса вытекающей и втекающей в насос жидкости, а время протекания физических процессов испарения, газовыделения и конденсации по своей величине на два порядка меньше, поэтому они играют второстепенную роль в формировании рассматриваемого процесса.

При моделировании динамики работы системы подачи ЖРД, как правило, проводят анализ изменения напора и потребляемой насосом мощности при возникновении кавитации в зависимости относительного напора насоса от параметров кавитационной каверны $\bar{H} = f(V)$. Динамика изменения объема каверны в зависимости от изменения расходов насоса при падении давления на входе насоса ниже $P_{кр}$ выражается зависимостью [6]

$$\frac{d\bar{V}_к}{dt} = \frac{1}{\rho V_{рк}}(\dot{m}_{вых} - \dot{m}_{вх}), \qquad (1)$$

где $V_{рк}$ – объем рабочего колеса в проточной части насосного агрегата; P – плотность жидкости; $\dot{m}_{вх}, \dot{m}_{вых}$ – соответственно расходы жидкости на входе и выходе из насосного агрегата.

Наличие кавитационной каверны, которая по своей природе представляет колебательное звено и приводит к режиму автоколебаний, при котором изменение объема кавитационной каверны в проточной части РК можно выразить в виде уравнения расходного баланса рабочей жидкости от входа до выхода из насоса:

$$V_к(t) = \int_0^t \left[\dot{V}_2(t) - \dot{V}_1(t)\right]dt + V_к(0), \qquad (2)$$

где V_2 (t) и V_1 (t) – изменение расхода на выходе и на входе в насос; $V_к(0)$ – начальный объем кавитационной каверны.

Из анализа уравнения (2) следует необходимость проведения испытаний в режиме кавитации с высокой точностью определения расходов V_1 (t) и V_2 (t), что потребует высокоточных датчиков мгновенного измерения расхода по времени. Следует отметить, что для режима развитых кавитационных автоколебаний напор насоса на участках минимального входного давления определяется объемом кавитационной каверны, а минимальному объему кавитационной полости соответствует максимальный, с некоторым опережением, напор РК. Исследования В. П. Козелкова и А. Ф. Ефимочкина [5] по динамике гидравлических систем двигательной установки (ДУ) с НА показали, что напор насоса однозначно при $\frac{V}{\omega} = \text{const}$, определяется объемом $V_к$ кавитационной каверны в РК. В свою очередь, объем $V_к$ определяется из материального баланса по уравнению (1).

С целью экспериментального изучения развитых кавитационных режимов работы высокооборотных насосов были проведены испытания на специальной установке, обеспечивающей снятие энергетических параметров и кавитационных характеристик с центробежными РК, при одновременной визуализации кавитационных каверн без нарушения структуры

потока. Режимы работы насоса варьировались изменением давления на входе в насос. Кавитационная характеристика испытанного центробежного насоса представлена на рис. 2 со следующими конструктивными параметрами: D_2 = 41,6 мм; D_1 = 15,5 мм; $\beta_{1л} = 30^{\circ}$, $\beta_{1л} = 75^{\circ}$; b_1 = 3 мм; b_2 = 3 мм.

Испытания проводились при угловой скорости $\omega = 836$ рад/с (n = 8 000 об/мин). В качестве рабочей жидкости применялась деаэрированная вода, температура которой поддерживалась постоянной и составляла 20 ºС. Расход рабочей жидкости поддерживался постоянным 300 см^3/с.

Учитывая необходимость проведения фотосъемки при высоких угловых скоростях, имеющих место при работе насоса, было использовано несколько способов съемки, которые в комбинации с применяемым методом визуализации течений позволили зафиксировать процессы, происходящие в межлопаточных каналах РК при различных режимах работы. Особую ценность представляют фотографии при развитой кавитации в каналах РК. Установка для испытаний имела крышку корпуса и покрывной диск исследуемого РК, выполненные из прозрачного оргстекла. Приводом насоса был двигатель постоянного тока с регулируемой угловой скоростью. Визуальные наблюдения проводились как при стробоскопическом освещении, так и фотосъемкой при освещении объекта съемки от электрического разряда с положительностью свечения $\tau = (1\ldots4)\cdot10^{-6}$ с, создаваемого специальной установкой. Объект съемки и фотоаппарата предварительно защищались от освещения посторонним источником света. Разряд между электродами осуществлялся от конденсатора, питаемого генератором типа УПУ-1М с регулируемым выходным напряжением от 7 до 14 кВт. Процессы зарядки и разрядки конденсатора проводятся дистанционно пусковым реле высокого напряжения.

Кавитационные каверны в ее развитии снимались через прозрачный покрывной диск и корпус насоса последовательно при снижении давления на входе и выходе, вплоть до выхода кавитационной каверны из межлопаточного канала колеса. Это позволило уточнить границы зоны активного потока, расходного течения, размеров и объема кавитационных каверн при формировании кавитационного потока в каналах РК, присущих конструктивным и режимным особенностям высокооборотных центробежных НА.

Характерные фотографии (рис. 3) выбраны из серии пятнадцати последовательно выполненных снимков при изменении давления на входе в насос от 0,044 до 0, 017 МПа вплоть до срыва работы насоса.

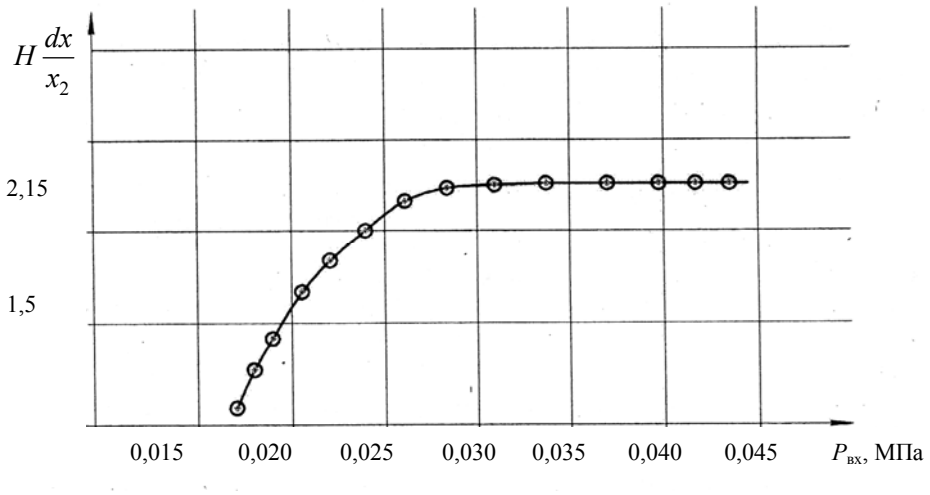


Рис. 2. Кавитационная характеристика центробежного насоса
◯ – точки при визуализации кавитационных каверн

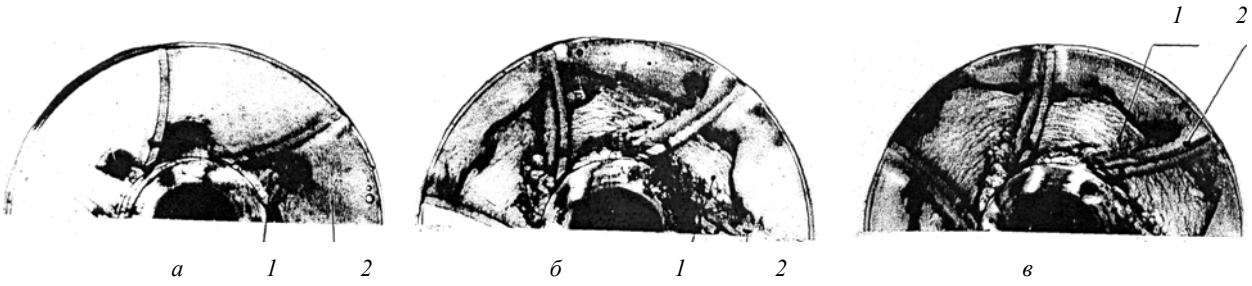


Рис. 3. Фотографии кавитационных режимов работы центробежного насоса:
1 – каверна; *2* – поток жидкости. Параметры:
а – $P_{вх}$ = 0,034 Мпа; *б* – $P_{вх}$ = 0,022 Мпа; *в* – $P_{вх}$ = 0,021 2 МПа

На фотографии видно, что на режимах, предшествующих срыву, расходное течение обеспечивается узкой областью по напорной стороне лопатки РК, что обусловливает работоспособность насоса на режимах $P_{вх} < P_{кр}$. Кроме того, на фотографиях отмечается наличие пульсирующих кавитационных каверн у задней стороны лопатки.

Полученные кавитационные характеристики, одна из которых представлена на рис. 2, при одновременном анализе фотографий динамики роста кавитационных каверн показали характер зависимости объема при снижении напора насоса, при котором каждая точка изменения давления входа на срывной ветви кавитационной характеристики насоса соответствовала строго определенной величине объема кавитационной каверны.

Зависимость $\overline{V}_к = \int(\overline{P}_{вх})$ для установившегося расхода через насос представлена на рис. 4.

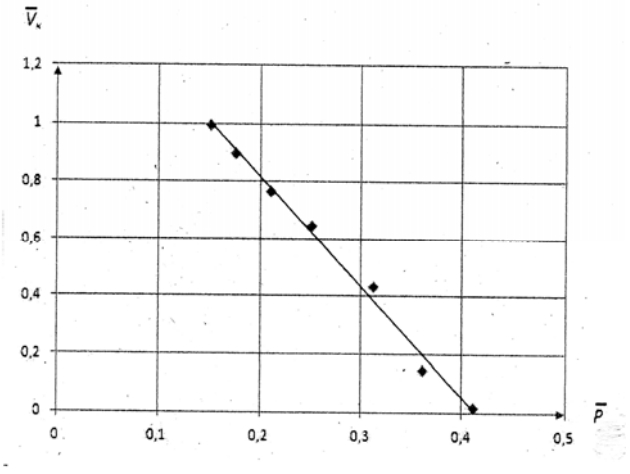


Рис. 4. Зависимость относительного объема кавитационной каверны входного давления в насосе при кавитации

Полученная экспериментальная зависимость изменения относительного объема кавитационной полости от средней величины относительного входного давления выражается в центробежном насосе зависимостью

$$\overline{V}_к = 0{,}16 - 4\overline{P}_{вх}. \qquad (3)$$

Полученные нами результаты подтверждают исследования характера изменения размеров кавитационных зон перед шнеком и в проточной части насоса в процессе развитых кавитационных автоколебаний авторами работы [6]. При отсутствии кавитационных явлений максимальным значениям напора $\overline{H} = 1$ соответствует объем кавитационных каверн $\overline{V}_к \approx 0$ (т. е. происходит практически полное смыкание кавитационных каверн).

Для исключения влияния скорости изменения объема каверн $\frac{dV_к}{dt}$ на изменение входного давления при определении зависимости $\overline{V}_к = f(\overline{P}_{вх})$ использовались значения давления $P_{вх}$ и объема $V_к$, соответствующие моменту времени, когда расход V_1 становится равным V_2, т. е. только экстремальные значения $V_к$. Расшифровки экспериментальных кавитационных режимов работы РК проводились при различных значениях $P_{кав}$ и $V_к$, при различных средних значениях давления на входе в насос, на постоянном среднем расходе.

Библиографические ссылки

1. Овсянников Б. В., Краев М. В., Черваков В. В. Теория и расчет турбомашины : учеб. пособие. Красноярск, 2012.

2. Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натанзон М. С. Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем. М. : Машиностроение, 1977.

3. Петров В. И., Чебаевский В. Ф. Кавитация в высокооборотных лопаточных насосах. М. : Машиностроение, 1982.

4. Кнэпп Р., Дейнец Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М. : Мир, 1974.

5. Козелков В. П., Ефимочкин А. Ф. Механизм кавитации центробежного насоса на неустановившихся режимах // Гидродинамика лопаточных машин и общая механика : сб. науч. тр. Вып. 1. Воронеж : Изд-во ВПИ, 1972. С. 17–29.

6. Калнин В.М., Шерстянников В. А. Динамика кавитационных срывов напора шнекоцентробежных насосов при импульсных возмущениях на входе // Кавитационные автоколебания в насосных системах. Ч. 1. Киев : Наукова думка, 1976. С. 135–143.

M. V. Kraev, E. M. Kraeva

FEATURES OF FORMATION OF CAVITATIONAL CAVITIES IN CENTRIFUGAL HIGH-SIDED PUMP

Features of cavitational processes in a flowing part of high-sided centrifugal pump are considered. On the basis of high-speed registration on visualization of formation of cavitational cavities, the experimental materials describing the form, volume and parameters of development кавитационной to a cavity, are presented. Dependence of change of volume of a cavity, during work of centrifugal pump in a range of the parameters describing stalling mode of a pump unit and following it cavitational self-oscillations in hydro-system of a liquid rocket engine, is obtained.

Keywords: high-speed turbo-pump units, liquid rocket engines, cavitational cavities, centrifugal pump.

© Краев М. В., Краева Е. М., 2012

УДК 004.725

Ф. А. Лукин, А. В. Шахматов, К. В. Мушовец, П. В. Зеленков

МЕХАНИЗМ УПРАВЛЯЕМОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА*

Обосновывается запросный механизм получения телеметрической информации с борта космического аппарата, анализируются преимущества данного подхода, для его технического обеспечения рассматривается возможность создания аппаратного хранилища телеметрии.

Ключевые слова: космические аппараты, телеметрия, космические командно-измерительные системы, аппаратное хранилище телеметрии.

В настоящее время к информативности канала передачи телеметрической информации (ТМИ) с борта космического аппарата (КА) предъявляются все более и более серьезные требования. Данное обстоятельство обусловливается возрастающей сложностью процессов управления и жизнеобеспечения на борту КА, необходимостью их детального контроля. Объем передаваемых данных по телеметрическому каналу должен быть большим, в информации должна отсутствовать избыточность.

Технические решения по повышению информативности канала ТМИ могут быть различными.

Первым очевидным решением является увеличение физической скорости канала телеметрии. Действительно, с одной стороны, применяемые в настоящее время скорости передачи в служебном канале телеметрии системы управления КА (2, 4, 8 кбит/с) можно считать не вполне удовлетворительными. Увеличение физической скорости передачи данных потребует перехода на повышенный частотный диапазон радиоканала ТМИ и связанные в связи с этим высокие технические затраты.

Другим очевидным решением является сжатие ТМИ перед посылкой в канал передачи. Сжатие может существенно увеличить объем передаваемых данных, но если данные избыточные, имеются их повторы, то применение сжатия не позволит кардинально повысить информативность канала ТМИ.

Природа избыточности данных может быть разная: нерациональный подбор измеряемых параметров, погрешности измерения, нерациональная структура передаваемых сообщений (транспортных кадров, сегментов передачи) и т. д. Но основным источником избыточности может оказаться общий механизм формирования и посылки телеметрии.

До настоящего времени основным остается механизм, имеющий непрерывный характер выдачи ТМИ в канал передачи данных. Данные телеметрии передаются в транспортных кадрах, имеющих определенную структуру. Так как источников данных много и они имеют в общем случае разную структуру данных, то для передачи ТМИ о текущем состоянии бортовых систем КА используется несколько транспортных кадров (N). Таким образом, последовательность из N транспортных кадров передает полную ТМИ о состоянии КА в текущий момент времени t. В дальнейшем для передачи ТМИ в момент $t + 1$ используется новая последовательность из N транспортных кадров. Заполнение данных об источниках в наборе телеметрических кадров выполняется в соответствии с определенным форматом, в котором определяется, сколько источников данных размещаются в каждом кадре и какова разрядность выделенного для каждого источника поля. Поэтому данный механизм формирования и передачи ТМИ в дальнейшем будем называть форматным.

В наземном комплексе управления (НКУ) происходит выделение информации из транспортных кадров в соответствии с их форматами и вся последующая обработка, связанная с анализом полученной информации: выделение нормально работающих источников, у которых отклонения информации находятся в допустимых границах; выделение источников с отклонениями информации за допустимые границы; анализ динамики изменения информации от источников; диагностирование работы бортовых систем; принятие решений по устранению выявленных проблем.

Рассмотренный форматный механизм формирования и передачи телеметрии имеет высокую избыточность: для бортовых систем находящихся в нормальном работоспособном состоянии изменения ТМИ во времени незначительны или вообще отсутствуют. Тем не менее канал ТМИ полностью загружен этими избыточными малоинформативными данными.

Происходящий в настоящее время переход на пакетный механизм в соответствии с рекомендациями CCSDS не решает проблему избыточности информации. Сущность концепции пакетной телеметрии состоит в том, что данные различных процессов бортовых систем КА объединяются в пакеты данных, соответствующие источникам, которые затем передаются по каналу передачи так, чтобы принимающие средства с высокой надежностью могли восстановить их [1]. Модель телеметрических служб CCSDS, построенная по образцу модели OSI представлена на рис. 1.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.B37.21.0451 «Исследование и разработка сетевой архитектуры бортового комплекса управления малого космического аппарата».

Рис. 1. Иерархическая модель телеметрических служб

Рекомендации комитета CCSDS адресованы только пяти нижним уровням этой модели. И если системный уровень модели, отвечающий за преобразование физических величин в наборы телеметрических данных, будет построен по принципам рассмотренной ранее форматной телеметрии, высокая избыточность информации сохранится. Принимаемые НКУ пакеты будут по большей части иметь повторяющуюся информацию.

Для снижения избыточности ТМИ предлагается дополнить пакетную телеметрию запросным механизмом ее формирования и передачи (режим управляемой телеметрии). Сущность управляемой телеметрии состоит в следующем: ТМИ передается только по запросным командам поступающим в телеметрическую систему КА (командно-измерительная система, КИС) с НКУ.

При отсутствии передачи полезной ТМИ из бортовой КИС в телеметрический канал поступают неинформативные данные, необходимые для поддержания синхронизации процессов на передающей и приемной стороне. При высокой надежности передающих устройств при отсутствии полезной ТМИ телеметрический канал может вообще отключаться.

Передача полезной ТМИ инициализируется поступлением в бортовой КИС запросной команды. Запросные команды могут быть нескольких типов: разовый запрос на выборку текущих данных от нескольких источников; запрос на выполнение определенного сценария выборки данных от нескольких источников; отложенный запрос на выполнение определенного сценария при наступлении какого-либо события; запрос на выборку с предобработкой данных (суммирование, усреднение, отклонение от среднего и т. д.) и другие.

Разовый запрос позволяет получить немедленную выборку данных. Скорее всего, данный вид запроса потребуется при устранении нештатных ситуаций на борту КА, когда потребуется «ручное» управление потоком телеметрических данных.

В штатном режиме эксплуатации вероятнее всего будут выполняться запросы на выполнение предопре-

деленных сценариев выборки. Сценарий выборки определяет последовательность и формат представления данных для опроса нескольких источников. Отложенные запросы на выполнение сценария выборки могут выполнятся либо периодически через определенные интервалы времени, либо при наступлении какого-либо события, например, изменении данных от какого-либо источника выше критического порога. Запрос на выборку с предобработкой необходим для каких-либо операции по анализу данных.

Запросный механизм, осуществляя управляемую выдачу ТМИ, существенно разгружает канал передачи данных и дает возможность расширить количество источников ТМИ. Одним из таких источников могла бы стать система журналирования, фиксирующая управляющие воздействия бортового компьютера, процедуры взаимодействия бортовой аппаратуры, отказы оборудования и исключительные ситуации информационных процессов на борту КА. Появление полноценной системы журналирования поднимет на новый качественный уровень диагностику КА.

Важнейшим практическим вопросом является реализуемость предложенного механизма управляемой выдачи телеметрии. Понятно, что прямое соединение источников данных с телеметрической системой КИС не позволит реализовать запросный механизм. Необходимо аппаратное хранилище накапливаемых данных для их последующей передачи в канал телеметрии.

Для реализации запросного механизма наилучшим видом организации аппаратного хранилища является база данных (БД). БД позволяет эффективно реализовать хранение, запись, поиск, выборку данных. Логическая и физическая организация БД не является предметом рассмотрения данной статьи. Отметим лишь, что БД должна располагаться в электрически перепрограммируемой энергонезависимой памяти и представлять собой набор файлов: таблиц и индексов, связанных между собой.

БД должна располагаться в КИС, тем самым бортовой компьютер освобождается от нагрузки, связанной с управлением БД. Система управления БД (СУБД) должна представлять из себя некий контроллер, реализующий по командному запросу следующие функции:

– запись данных из соответствующих источников в соответствующие таблицы БД;

– выборка данных из БД для ее передачи в телеметрическую систему КИС;

– хранение соответствующих командному запросу данных до получения подтверждения о доставке данных на НСУ;

– предоставление данных для других систем КА, в том числе и для бортового компьютера.

Работу запросной телеметрии можно упрощенно описать следующим образом. Командная система КИС идентифицирует поступившую команду как запросную и передает ее на исполнение телеметрической системе. Телеметрическая система определяет источники данных и производит обращение в соответствующие таблицы БД. Телеметрическая система КИС путем периодического опроса постоянно выполняет актуализацию данных в БД, но, если в настоящий момент в БД не хранятся актуальные данные от указанных источников, обращается к ним.

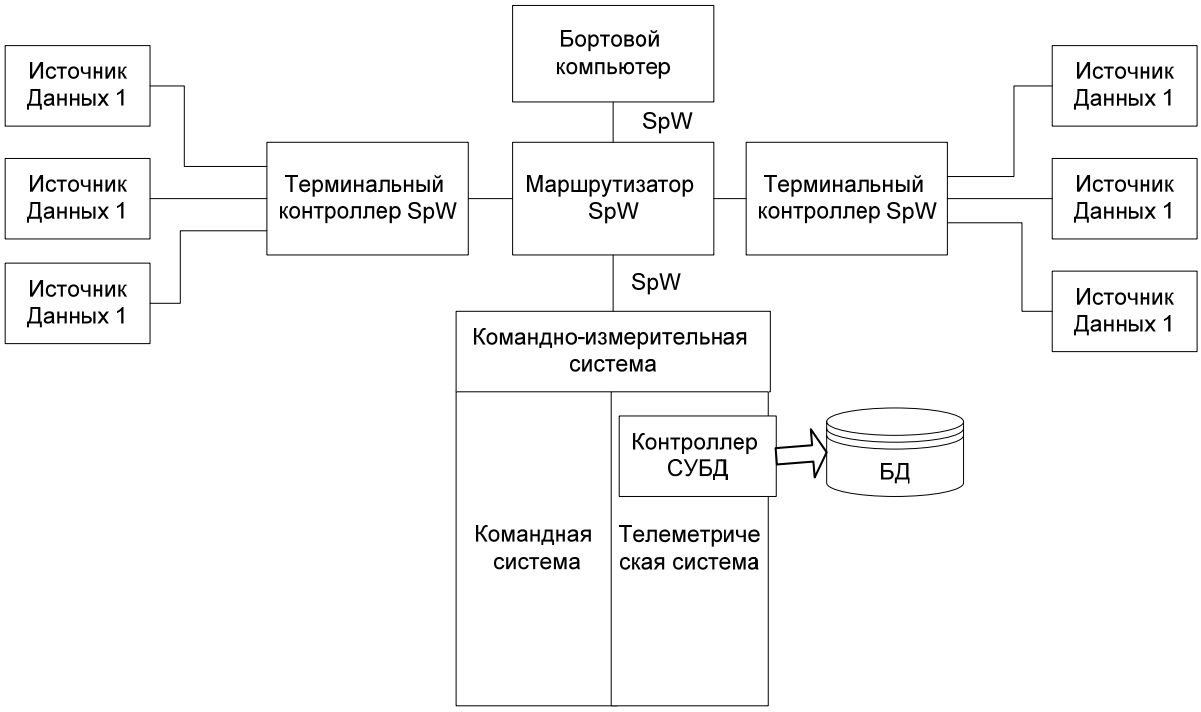


Рис. 2. Телеметрическая система в составе сетевой архитектуры БКУ

Получение данных от источников просто реализуется при сетевой архитектуре бортового комплекса управления (БКУ) [2], представленной на рис. 2. Источники данных физически подключены к удаленному контроллеру сети. КИС, как активное устройство, обращается к удаленному контроллеру, используя сервисы сети. Поступившие данные от источников сохраняются СУБД в соответствующих таблицах БД (оператор *INSERT*).

Затем СУБД организует выборку данных из БД, используя операторы типа *SELECT* и *WHERE*, и передает на уровень пакетирования телеметрической системы. Данные передаются по каналу передачи.

При успешном приеме данных НКУ формирует положительную квитанцию. Признак положительной квитанции от командной системы КИС передается на телеметрическую систему, тем самым завершая транзакцию БД.

Запросный способ выдачи телеметрической информации потенциально может сам быть причиной внесения избыточности, но несколько иного рода. В формируемом сообщении порядок передачи данных от источников в общем виде может быть произвольным, определяется видом запроса. Это предполагает адресный способ идентификации источников данных в передаваемом сообщении: <идентификатор 1><данные источника 1><идентификатор 2><данные источника 2>…<идентификатор n><данные источника n>. Если источников много, например 1 000, то поле <адрес источника i> может занимать 10 разрядов. Данная проблема имеет множество вариантов решения, например, для случая предопределенных запросов, когда заранее известен формат принимаемого сообщения и количество источников данных, можно существенно уменьшить длину идентификатора. Но в любом случае такой вариант избыточности заведомо менее значимый, чем при форматном механизме непрерывной выдачи ТМИ.

БД и СУБД телеметрической системы, по сути, промежуточные звенья от источников данных до телеметрической системы для обеспечения высокой скорости выдачи телеметрии в ответ на запросную команду должны иметь высокую производительность.

Для обеспечения высокой производительности при выборе проектных решений необходимо учитывать следующие обстоятельства. Первое обстоятельство касается собственно БД, которое физически располагается в энергонезависимой памяти (флеш-память, фазоинверсная энергонезависимая память и др.). Энергонезависимая память имеет низкую скорость доступа. Кроме того, энергонезависимая память имеет ряд ограничений на эксплуатационный ресурс в условиях космоса [3]; этот ресурс необходимо использовать оптимально. Для этого с помощью внешней оперативной памяти организуется так называемое «отсоединенное хранилище данных», которое является образом БД в энергонезависимой памяти. Все операции выполняются над отсоединенным хранилищем, а его синхронизация с БД в энергонезависимой памяти осуществляется по специальному алгоритму.

Второе обстоятельство относится к СУБД, а конкретно – к вариантам реализации контроллера СУБД. Для обеспечения высокой производительности предлагается выполнить аппаратную реализацию контроллера на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Алгоритмы работы всех входящих в состав СУБД блоков известны, достаточно жестко определены, не требуют высокой вариативности и гибкости, поэтому хорошо реализуемы на ПЛИС. Конечный автомат аппаратного контроллера СУБД напрямую работает с данными, что является заведомо более быстродействующим вариантом относительно варианта на микропроцессоре (микроконтроллере). Решение, основанное на аппаратных блоках, является весьма предсказуемым в плане времени исполнения. Расчет таймингов работы блоков с линейным быстродействием не составляет труда, чего не скажешь о решениях, основанных на связке [микропроцессор + микропрограмма], где производительность является зависимой от микропрограммы, а значит, плавающей и трудно прогнозируемой. Кроме того, предварительный анализ показывает, что ресурсы современных ПЛИС достаточны для того, чтобы на одном кристалле полностью реализовать КИС, включая командную и телеметрическую систему, вместе с СУБД.

Таким образом, в результате проведенных исследований обоснован механизм управляемого получения телеметрической информации с борта космического аппарата, проведен анализ достоинств данного подхода, рассмотрены варианты создания аппаратного хранилища телеметрии. В настоящее время проведен этап концептуального проектирования аппаратных блоков СУБД.

Библиографические ссылки

1. Современная телеметрия в теории и на практике : учебный курс. СПб. : Наука и техника, 2007.

2. Сетевая архитектура бортового комплекса управления / Д. А. Никитин [и др.] // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения : тр. конф. М. : ИПУ РАН, 2012. С. 1539–1546.

3. Шурыгина В. Энергонезависимая память. Кто победит в гонке? Ч. 2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. № 6. С. 36–47.

F. A. Lukin, A. V. Shakhmatov, K. V. Mushovets, P. V. Zelenkov

MECHANISM OF OPERATED TELEMETRY FOR A SPACECRAFT

This article presents query-oriented method of receiving telemetry information from the board of a spacecraft, analyses advantages of this method. For implementing this method, the possibility of creation of hardware database is considered.

Keywords: spacecrafts, telemetry, space CCU (command and control units), telemetry hardware storage.

© Лукин Ф. А., Шахматов А. В., Мушовец К. В., Зеленков П. В., 2012

УДК 681.3:629.7

В. Х. Ханов, А. В. Шахматов, С. А. Чекмарев, М. Ю. Вергазов, Ф. А. Лукин

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ*

Описываются основные технические решения, принятые при проектировании бортового комплекса управления для малых космических аппаратов. Определены открытые технологии и продукты, используемые в проекте. Представлены сетевая архитектура и конструкция бортового комплекса управления. Приведены результаты разработки экспериментального макета.

Ключевые слова: малые космические аппараты, бортовой комплекс управления, сетевая архитектура, конструкция бортового комплекса управления, экспериментальный макет бортового комплекса управления.

Проектирование малых космических аппаратов (МКА) является новейшим быстроразвивающимся направлением мировой космонавтики. Применение МКА открывает новые возможности для исследования космического пространства, проведения эффективных научных экспериментов, отработки новых перспективных технологий.

Исходные данные для проектирования подобных аппаратов задают жесткие требования к массогабаритным показателям, энергопотреблению, параметрам надежности при приемлемом уровне аппаратных задач, стоимости как в целом МКА, так и ко всем составляющим узлам и блокам, в том числе и к бортовому комплексу управления (БКУ). Стремление к удовлетворению этих требований обусловливает необходимость применения новых подходов и технологий проектирования.

Целью проекта является разработка бортового комплекса управления (БКУ) для малых космических аппаратов на основе применения ряда новых технологий, позволяющих достичь высоких технических и эксплуатационных характеристик БКУ.

Большинство реализуемых в проекте новшеств можно отнести к категории так называемых COTS-решений, COTS-продуктов (Commercial Off-The-Shelf – коммерческие, готовые к использованию) [1]. COTS-подход заключается в использовании при разработке систем военного или космического назначения открытых технологий, многократно использованных в коммерческих приложениях, а поэтому надежных и дешевых.

При инициализации проекта было принято решение использовать только открытые продукты и технологии. Это касается и аппаратных решений и программного обеспечения. К числу основных открытых решений, принятых в проекте, следует отнести:

– использование только стандартизированных интерфейсов и сетей: SpaceWire, AMBA;

– использование только открытых сложнофункциональных блоков (IP-блоков): LEON 3, SpaceWireLight;

– использование только открытых операционных систем: RTEMS;

– использование открытых стандартов телеуправления/ телеметрии: соответствующие стандарты Европейского космического агентства Packet Telecommand Standard ESA PSS-04-107 и Telecommand Decoder Specification ESA PSS-04-151 [2; 3].

Основной элементной базой реализации основных устройств проекта были определены программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Данное решение приводит к снижению габаритов, массы и энергопотреблению устройств. Часть устройств, требующих повышенной функциональной гибкости, принято реализовать в виде «систем-на-кристалле» [4].

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» № П1032 от 27.05.2010.

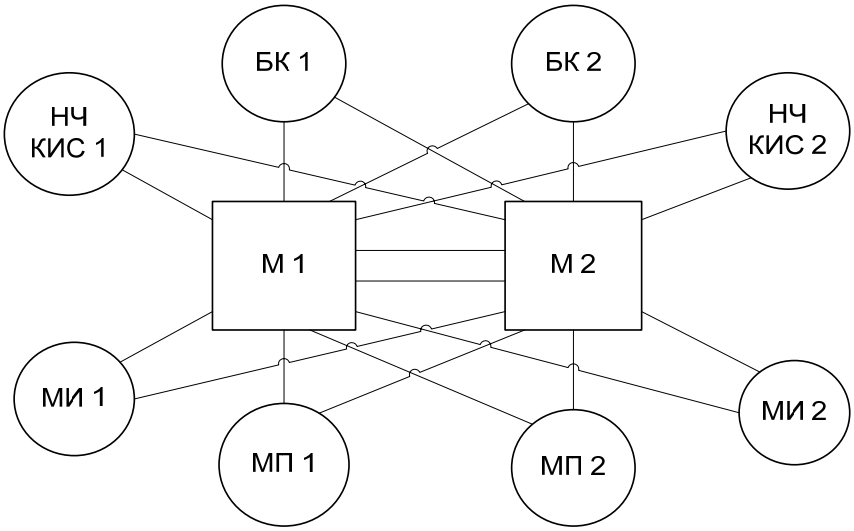


Рис. 1. Топология типа «двойная звезда»

Основополагающим проектным решением стала сетевая архитектура построения БКУ. Особенностью сетевой архитектуры является создание инфраструктуры передачи данных, позволяющей легко дублировать основные и инфраструктурные компоненты сети, иметь несколько альтернативных путей передачи данных, масштабировать или модифицировать сеть под имеющееся оборудование на борту КА. В качестве базы для сетевой архитектуры определена технология SpaceWire, получающая в настоящее время бурное развитие.

За основу в качестве базовой использована топология типа «звезда» с быстродействующим коммутатором (маршрутизирующим коммутатором в случае технологии SpaceWire) в качестве центрального узла. В качестве наиболее вероятного кандидата на сетевую архитектуру БКУ определена топология «двойная звезда» [5], представленная на рис. 1.

Сетевая архитектура предполагает использование в качестве инфраструктурных компонентов «связку» двух маршрутизаторов (М), один из который является активным, другой находится в «холодном» резерве. Для повышения надежности связь маршрутизаторов обеспечивают 2 физических линка. К каждому маршрутизатору подключается свой полукомплект устройств, составляющих БКУ. Кроме того, каждое устройство из одного полукомплекта подключается к маршрутизатору другого полукомплекта. В текущий момент времени один полукомплект находится в активном режиме, другой – в «холодном» резерве. При отказе устройства из одного полукомплекта, автоматически включается аналогичное устройство из другого полукомплекта.

Данную архитектуру можно определить как наиболее оптимальную для МКА, имеющего небольшие значения для срока активного существования (САС) КА (от 2 до 5 лет). Он обеспечивает достаточную для МКА надежность при приемлемом уровне аппаратного резервирования. Для аппаратов со сроком САС более 5 лет представленная архитектура хорошо масштабируется до более высоких значений кратности резервирования: 2 или 3. Для аппаратов с совсем малым САС (1–2 года) и с малым бюджетом разработки от второго маршрутизатора и резервного полукомплекта можно отказаться.

Устройствами, входящими в каждый полукомплект для МКА, являются:

– модуль бортового компьютера (БК), реализующий основные вычислительные и управляющие действия на борту МКА;

– модуль низкочастотной части командно-измерительной системы (НЧ КИС), предназначенный, с одной стороны, для сбора телеметрических данных от систем КА, преобразования их в телеметрические пакеты и передачи пакетов в высокочастотную часть командно-измерительной системы (ВЧ КИС) для их передачи по радиоканалу; с другой стороны, для приема от ВЧ КИС телекоманд управления, их дешифрации и передачи по адресуемым системам КА, в основном в БК;

– модуль преобразования интерфейсов (МИ) имеет чисто технологическую функцию; он предназначен для преобразования некоторого множества интерфейсов, используемых системами космического аппарата (UART, CAN и др.) к интерфейсу SpaceWire; кроме того, он может принимать аналоговые сигналы с датчиков и передовать сигналы на исполнительные устройства (ИУ);

– модуль питания (МП), предназначен для стабилизации напряжения, поступающего в БКУ от внешней бортовой питающей сети.

Для обеспечения жестких требований к массогабаритным показателям КА принципиально важным решением стал отказ от внутриблочной кабельной сети. В настоящее время масса кабельной сети составляет от 7 до 10 % от веса всего КА. Постоянно разрабатываются новые подходы по оптимизации кабельной сети в сторону уменьшения веса. Но лучшим решением мог бы стать отказ от кабельных соединений, конечно, в тех случаях, когда это выполнимо, например,

для организации внутриблочных интерфейсов. Для создания внутриблочных связей в проекте предложено использовать межплатные соединители и стековую структуру построения конструкции БКУ. Стековая конструкция БКУ представлена на рис. 2. Подобная стековая конструкция уже прошла апробирование в ряде зарубежных изделий, для ее реализации был разработан особый тип межплатных соединителей с так называемыми гиперболическими контактами [6], обеспечивающих высокое качество соединения. По межплатным соединителям происходит как передача информационных сигналов, так и питающих напряжений. Металлическая рамка модуля обеспечивает необходимую радиационную защиту и нормальный тепловой режим.

Принятая стековая конструкция определила следующую схему взаимодействия устройств БКУ МКА с сетевой архитектурой (рис. 3). БКУ состоит из пяти плат, соединенных межплатными разъемами. На каждой плате располагаются по два одинаковых устройства из разных полукомплектов. Одно устройство является основным (включено), другое находится в ненагруженном резерве (выключено). Устройства на плате гальванически развязаны по питанию. Переключение устройств в случае отказа основного происходит коммутатором питания, располагаемом на плате питания.

Все устройства БКУ связаны SpaceWire. Маршрутизаторы SpaceWire каждого полукомплекта обеспечивают как внутренние связи посредством межплатных разъемов, так и внешние посредством кабельных соединений. Плата интерфейсов осуществляет связь с внешними устройствами, не имеющими SpaceWire.

В качестве кодека SpaceWire определен открытый кодек SpaceWireLight [7], отличающийся от аналогичных открытых кодеков хорошей технической поддержкой. Тестирование кодека аппаратной реализации кодека SpaceWireLight с помощью аппаратного тестера SpW Conformance Tester and Packet Generator показало его полное соответствие стандарту ECSSE-ST-50-12C SpaceWire – Links, nodes, routers and networks [8].

Анализ процессоров для реализации БК показал, что сегодня из имеющихся космических процессоров наилучшим выбором является процессор LEON 2/3 по следующим причинам:

– процессорное IP-ядро является открытым, оно базируется на открытой архитектуре SPARC v8;

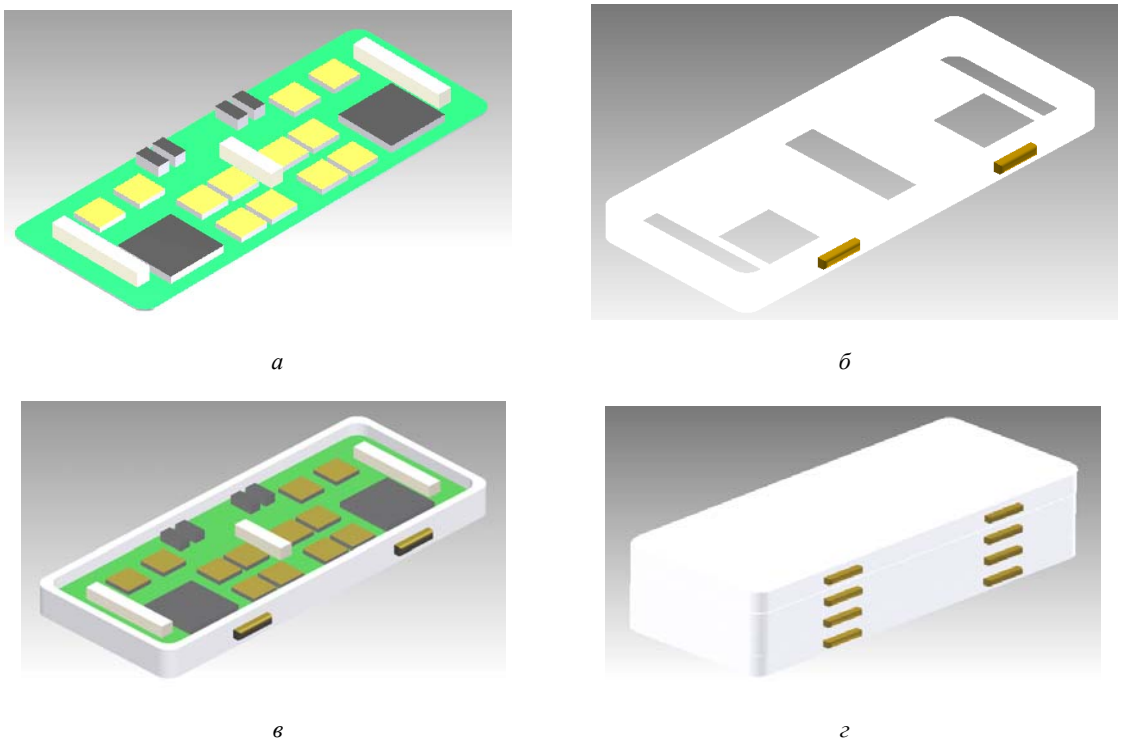
– процессор LEON разработан по инициативе Европейского космического агентства (ESA) и рекомендован ESA для применения в новых европейских проектах;

– процессор поддерживается двумя крупными в области создания космической компонентной базы компаниями: европейским отделением компании Atmel и американской Aeroflex;

– имеются отказоусточивые версии FT процессора, известна его отказоустойчивая архитектура;

– процессор имеет хорошую летную историю;

– процессор взят в разработку БК для КА средних и тяжелых типов Ижевским радиозаводом, ведущим производителем бортовых космических систем, в том числе и для ОАО «Информационные спутниковые системы».



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Стековая конструкция БКУ МКА:
а – плата модуля БКУ; *б* – рамка для платы модуля; *в* – модуль БКУ в сборе; *г* – модули БКУ в сборе

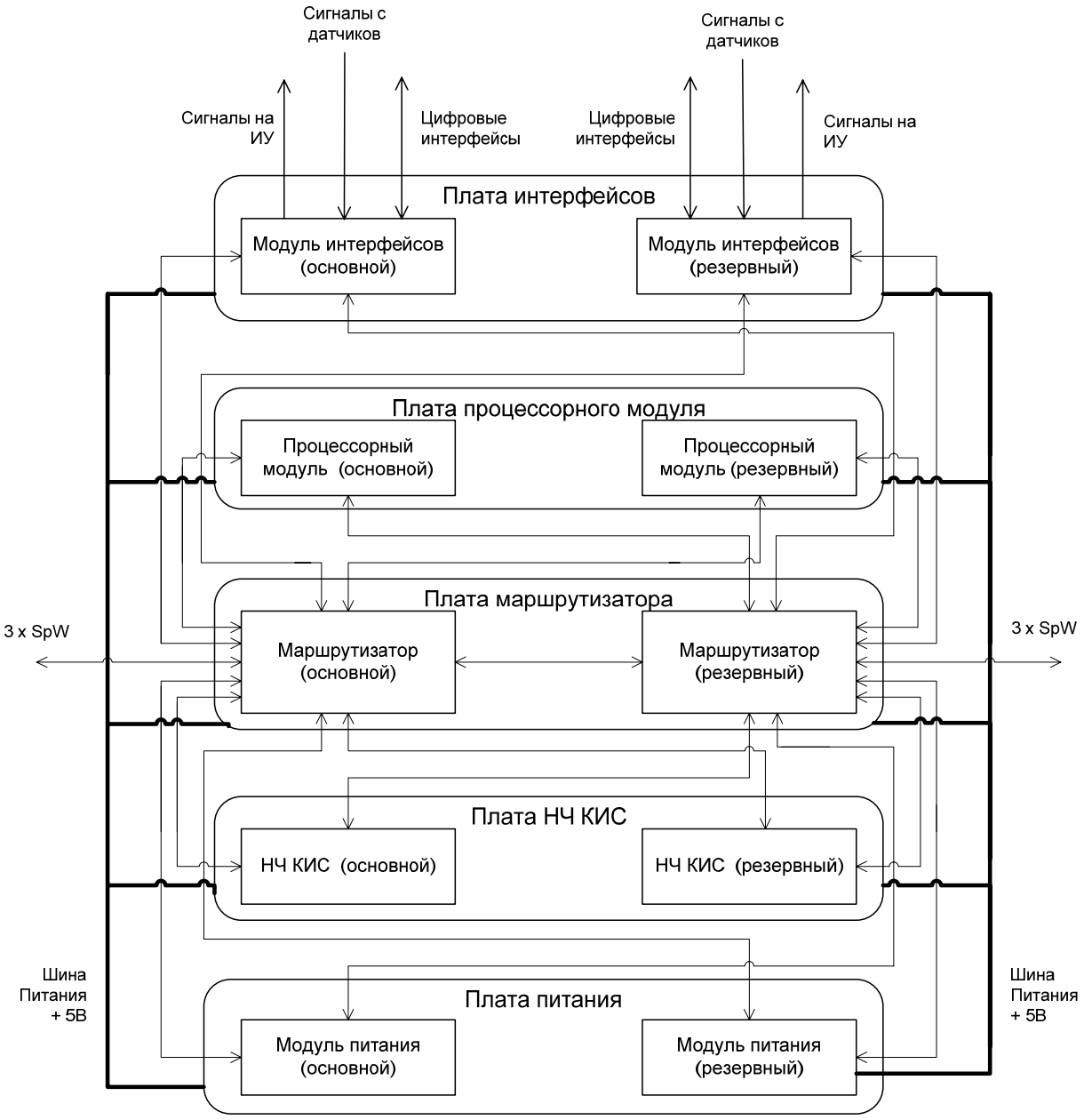


Рис. 3. Структурная схема БКУ для МКА

Проведенные экспериментальные исследования по оценке применимости процессора LEON 2/3 позволили получить количественные характеристики БК при различных типах ПЛИС (компаний Actel, Altera, Xilinx) и разной конфигурации процессора, на основании которых сделан вывод о возможности его использования в проекте. Так, для ПЛИС компании Xilinx Virtex 4 тактовая частота процессора составила 75 МГц, при этом ресурсы ПЛИС оказались заняты на 50 %.

Процессор LEON 2/3 поддерживают большое число операционных систем. Однако операционной системой БК определена открытая операционная система реального времени RTEMS, рекомендованная ESA для европейских космических миссий. Для данной операционной системы экспериментальными исследованиями определены минимально достаточная конфигурация процессора, в частности размеры кэш-памяти данных и инструкций.

НЧ КИС, как отмечалось выше, предполагается выполнить по стандартам ESA. Алгоритмы формирования транспортных пакетов и дешифрации команд являются «жесткими», а поэтому хорошо реализуемыми на ПЛИС. Аутентификацию телекоманд предполагается выполнить по спецификациям ESA, однако криптографический алгоритм заменяется на алгоритм, согласно ГОСТ 28147–89 «Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования». Проведенные исследования показали, что ГОСТ 28147–89 вписывается в схему стандартов и рекомендаций ESA. Поэтому он может быть рекомендован для отечественных

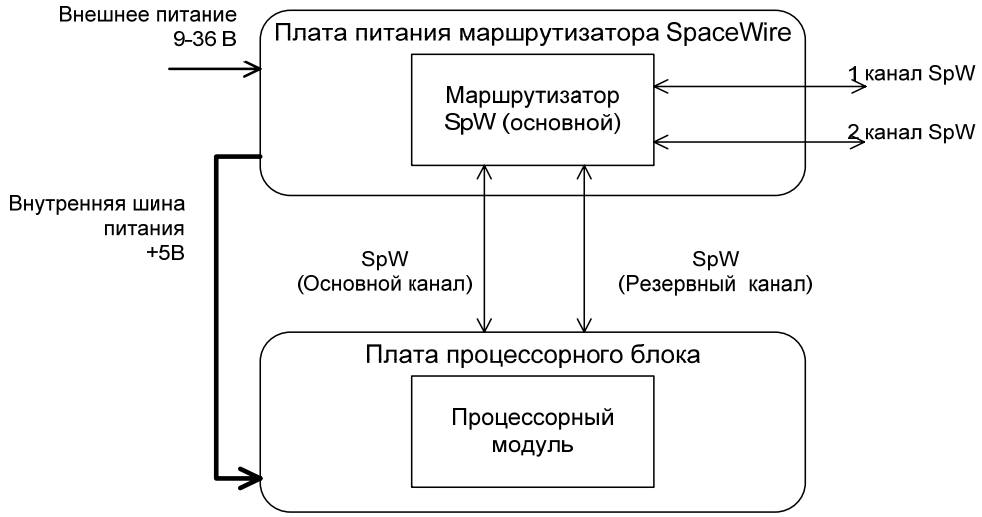
КА для реализации режима аутентификации телекоманд [9].

Для отработки основных проектных решений разработан и изготовлен экспериментальный макет БКУ МКА, представленный на рис. 4.

Макет состоит из двух устройств: модуля питания и маршрутизатора SpaceWire и процессорного модуля LEON 3. Связь между ними осуществляется посредством двух линков SpaceWire: основного и резервного. Кроме того, имеются два канала SpaceWire для подключения внешних устройств. Конструкция является стековой с использованием межплатных соединителей, располагаемых на противоположных сторонах плат. Оба устройства выполнены на ПЛИС компании Actel A3PE1500, для которой имеются радиационно-стойкие аналоги.

Основные характеристики макета:
– тактовая частота процессора – 30 МГц;
– ОЗУ – 8 МБ;
– ПЗУ – 8 МБ;
– максимальная скорость SpaceWire – 120 Мбит/с;
– количество портов маршрутизатора – 4;
– общее потребление –2,5 Вт;
– габариты – 122 мм × 78 мм × 30 мм;
– масса – 0,2 кг.

Экспериментальные исследования макета, включавшие тесты производительности процессорного модуля, тесты памяти, тесты сети SpaceWire и маршрутизатора, тесты операционной системы, подтвердили его работоспособность. Работы над созданием макета показали реализуемость принятых проектных решений.



а

б

Рис. 4. Экспериментальный макет БКУ для МКА:
а – структурная схема; *б* – внешний вид

Таким образом, в результате проведенных исследований определена общая концепция проектирования БКУ для МКА, апробированная разработкой, изготовлением и тестированием экспериментального макета.

Библиографические ссылки

1. Рыбаков А. Н. Открытые компьютерные COTS-технологии в военных приложениях // Мир компьютерной автоматизации. № 4. 1999. С. 4–8.

2. Packet Telecommand Standard ESA PSS-04-107.ESA, 1992.

3. Packet Telemetry Standard ESA PSS-04-105.ESA, 1988.

4. Немудров В., Мартин Г. Системы на кристалле. Проектирование и развитие. М. : Техносфера, 2004. С. 216.

5. Сетевая архитектура бортового комплекса управления / Д. А. Никитин [и др.] // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения : тр. конф. М. : ИПУ РАН, 2012. С. 1539–1546.

6. PCB Connectors – HDLP. URL: http://www.hypertac.com/webapp/en-gb/products/223/pcb-connectors-hdlp.aspx/

7. Joris van Rantwijk. SpaceWire Light v20110709. URL: http://opencores.org/project,spacewire_light.

8. ECSSE-ST-50-12C SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2008. 129 c.

9. Жданов О. Н., Чалкин Т. А., Лукин Ф. А. Аутентификации канала телеуправления малым спутником аппаратными криптографическими средствами // Электронные средства и системы управления : материалы докл. Междунар. науч.-практ. конф. Томск : В-Спектр, 2011. С. 215–219.

V. Kh. Khanov, A. V. Shakhmatov, S. A. Chekmaryov, M. Yu. Vergazov, F. A. Lukin

PRINCIPLES OF ON-BOARD CONTROL COMPLEX DEVELOPMENT FOR SMALL SPACECRAFTS

This paper describes the main technical decisions made during design of the on-board control complex for small spacecrafts and determines open technologies and products used in the project. Network architecture and on-board control complex design are presented. The results of the development of the experimental model are given.

Keywords: small spacecrafts, on-board control complex, network architecture, on-board control complex design, on-board control complex experimental model.

© Ханов В. Х., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Вергазов М. Ю., Лукин Ф. А., 2012

Раздел
3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 536.6

В. С. Бондарев, А. Н. Втюрин, А. С. Крылов, Е. М. Колесникова

ЭЛЕКТРОКАЛОРИЧЕСКИЙ И БАРОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В НЕКОТОРЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГИДРОСУЛЬФАТАХ И ТРИГЛИЦИНСУЛЬФАТЕ*

Проведен сравнительный анализ электрокалорической и барокалорической эффективности в сегнетоэлектриках $Rb_x(NH_4)_{1-x}HSO_4$, испытывающих переход типа порядок–беспорядок, и ТГС. Обнаружено хорошее согласование между экспериментально-измеренным интенсивным электрокалорическим эффектом и вычисленным по формуле электронного состояния. Барокалорические эффекты были оценены из анализа экспериментальных данных теплоемкости и фазовых диаграмм T-p.

Ключевые слова: сегнетоэлектричество, фазовые переходы, электрокалорический и барокалорический эффекты.

Электро-, магнето)- и барокалорические (ЭКЭ, МКЭ и БКЭ соответственно) эффекты в твердых телах могут быть реализованы двумя способами во внешнем поле соответствующей физической природы. Адиабатическое изменение поля приводит к изменению температуры ΔT_{AD}, известное как интенсивный калорический эффект. Обратимое изменение энтропии ΔS^{CE} в результате изменения поля при постоянной температуре, имеющее противоположный знак, по сравнению с ΔT_{AD}, связано с экстенсивным калорическим эффектом.

В последние годы гигантский калорический отклик, обнаруженный в некоторых ферромагнетиках [1] и сегнетоэлектриках [2], стимулировал фундаментальные и прикладные интересы в разработке материалов, которые являются полезными для магнетоэлектрического охлаждения. БКЭ не было изучено в твердых телах так широко и интенсивно, как, например, ЭКЭ и МКЭ. Однако это свойство является очень привлекательным из-за своей общности для материалов любой физической природы (сегнетоэлектрик, ферромагнетик, сегнетоэластик и т. д.). Действительно, согласно соотношению Максвелла

$$\left(\partial S \big/ \partial p\right)_{T,E,H} = -\left(\partial V \big/ \partial T\right)_{p,E,H}, \qquad (1)$$

где p, E, H – гидростатическое давление, электрическое и магнитное поле, соответственно, величина экстенсивного БКЭ ΔS^{BCE} зависит от производной объема по температуре, которая, как известно, является самой большой вблизи точки фазового перехода.

Особый интерес представляет изучение возможностей различных калорических эффектов в одном и том же материале. Известно лишь несколько исследований, посвященных БКЭ и МКЭ в одном магнитном материале [3]. Что касается сегнетоэлектриков, их барокалорическая эффективность не изучалась до сих пор.

Попытаемся проанализировать ЭКЭ и БКЭ в ряде кристаллов $Rb_x(NH_4)_{1-x}HSO_4$, испытывающие, в зависимости от x, следующие последовательности фазовых переходов: $P2_1/c \rightarrow P\,c \rightarrow P$–1 (x = 0, 0,02, 0,04) и $P2_1/c \rightarrow Pc$ (x = 0,33, 1) [4–6].

Кроме того, было интересно сравнить БКЭ с ЭКЭ в гидросульфатах, а также в триглицинсульфате (ТГС), который характеризуется довольно большим значением изменения энтропии при фазовом переходе ΔS = 6,8 Дж/моль·K [7] по сравнению с $Rb_x(NH_4)_{1-x}HSO_4$ ($\Delta S \le 1{,}7$ Дж/моль·K) [4-6].

Для выполнения поставленных задач, мы проанализировали данные по теплоемкости, диэлектрической проницаемости, интенсивном ЭКЭ и барические коэффициенты для $Rb_x(NH_4)_{1-x}HSO_4$ [4–6; 8; 9] и ТГС [7; 10–12].

Сначала мы рассмотрели избыточную теплоемкость $\Delta C_p(T)$ в рамках термодинамической теории Ландау. Согласно [13] из термодинамического потенциала для фазовых переходов второго рода

$$\Delta\Phi = A_T(T - T_{PT})P^2 + BP^4 + CP^6 - EP \qquad (2)$$

при E = 0 можно получить уравнение

$$\left(\frac{\Delta C_p}{T}\right)^{-2} = \left(\frac{2\sqrt{B^2 - 3A_T C}}{A_T^2}\right)^2 + \frac{12C}{A_T^3}\left(T_{PT} - T\right). \qquad (3)$$

Было установлено, что во всех исследуемых кристаллах $(\Delta Cp\ /T)^{-2}(T)$ является линейной функцией в довольно широком диапазоне температур ΔT_L ниже точки фазового перехода T_{PT} (табл. 1). Используя данные по диэлектрической проницаемости, мы вычислили значения коэффициентов в (2). Можно видеть, что даже довольно небольшая добавка рубидия (x = 0,33) в твердом растворе $Rb_x(NH_4)_{1-x}HSO_4$ приводит к снижению ΔT_L и увеличению значения $N = (B^2/3A_T \cdot\ C\ \cdot\ T_{PT})^{1/2}$, которая характеризует близость фазового перехода к трикритической точке. Принимая во внимание небольшое влияние электрического поля на коэффициент A_T [12] был проведен анализ уравнения электрического состояния $\partial\Delta\Phi/\partial P = 0$, и поверхность «поляризация–температура–электрическое поле» (P–T–E) была построена. По аналогии с уравнением (1) можно записать соотношение Максвелла для сегнетоэлектриков:

$$\left(\partial S \big/ \partial E\right)_{p,T} = \left(\partial P \big/ \partial T\right)_{p,E}. \qquad (4)$$

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013г., № 8379.

Таблица 1

Температура фазового перехода T_{PT}; температурный интервал ΔT_L, связанный с уравнением (3); коэффициенты термодинамического потенциала A_T, B, C (2); близость к трикритической точке N

Кристалл	T_{PT}, К	ΔT_L, К	$A_T \cdot 10^2$, $К^{-1}$	B, (Дж/моль)$^{-1}$	C, (Дж/моль)$^{-2}$	N
NH_4HSO_4	271,7	190–271,7	3,0	$8{,}9 \cdot 10^{-3}$	$2{,}3 \cdot 10^{-4}$	0,12
$Rb_{0.33}(NH_4)_{0.67}HSO_4$	269	220–265	1,4	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$	$2{,}5 \cdot 10^{-5}$	0,24
$RbHSO_4$	264,6	240–262	5,0	0,04	$8{,}4 \cdot 10^{-4}$	0,22
ТГС	322,3	310–321	0,18	$5{,}7 \cdot 10^{-6}$	$1{,}4 \cdot 10^{-9}$	0,12

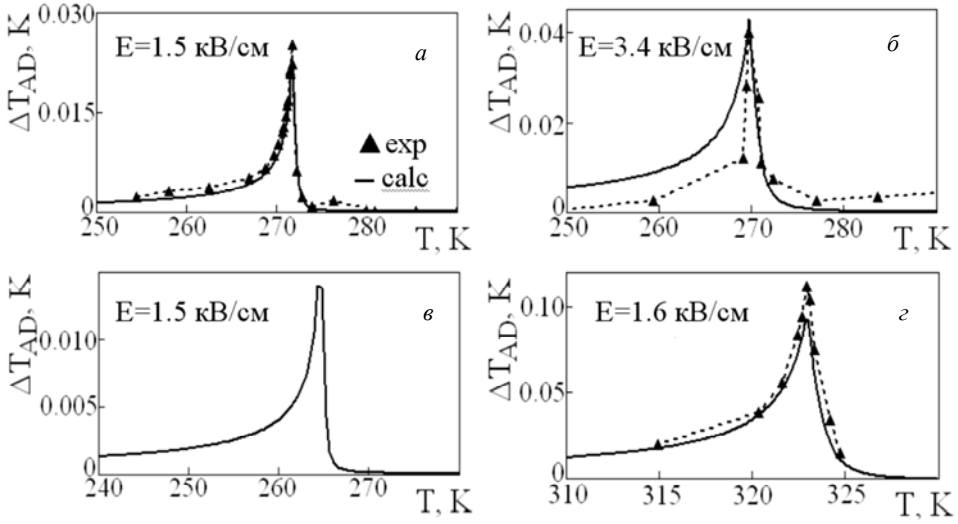


Рис. 1. Экспериментально измеренный и вычисленный интенсивный ЭКЭ ΔT_{AD} для NH_4HSO_4 (*а*), $Rb_{0.33}(NH_4)_{0.67}HSO_4$ (*б*), $RbHSO_4$ (*в*) и ТГС (*г*)

Отсюда следует, что интенсивный электрокалорический эффект может быть выражен как

$$dT_{AD}^{ECE} = -\left(T / C_{p,E}\right)\left(\partial P / \partial T\right)_{p,E} dE. \qquad (5)$$

По результатам рассмотрения уравнения электрического состояния были определены значения ΔT_{AD}^{ECE} для твердых растворов $Rb_x(NH_4)_{1-x}HSO_4$ (x = 0, 0,33, 1), а также для кристалла ТГС при электрических полях используемых в экспериментах [4; 10]. Было получено удовлетворительное согласие между вычисленными и экспериментально полученными значениями, а также их температурными зависимостями для всех исследуемых кристаллов (рис. 1). Максимальная величина ΔT_{AD}^{ECE} в твердых растворах отличается друг от друга (при одном и том же E) в соответствии со значением N, так как производная поляризации по температуре увеличивается с уменьшением N. Таким образом, полученные результаты доказывают возможность применения рассмотренного в статье метода для косвенного определения ΔT_{AD}^{EC} на основании исследований теплоемкости и диэлектрической проницаемости.

Самым надежным способом для определения калорического эффекта является прямое измерение изменений температуры с помощью, например, адиабатического калориметра. На самом деле, этот способ относительно прост для изучения ЭКЭ и МКЭ [3; 4; 10]. Но для барокалорических измерений этот метод не удобен. Мы оценили барокалорическую эффективность исследуемых кристаллов в рамках приближения разработанного в [14].

Разрушение монокристалла NH_4HSO_4 при сильном фазовом переходе первого рода $Pc \rightarrow P\text{-}1$ при T_2 препятствует изучению ЭКЭ. С другой стороны, довольно большие изменения энтропии $\Delta S_2 = 1{,}4R$ и объема $\Delta V_2/V \approx 1{,}2$ %, а также гигантский барический коэффициент $dT_2/dp = 76{,}5$ К/кбар делают этот переход весьма перспективным для исследования БКЭ (рис. 2).

Можно предположить, что существует ничтожно малый эффект довольно малого давления ($p < 10$ кбар) на решеточную теплоемкость C_L и решеточную энтропию S_L. Таким образом, суммарная энтропия $S(p, T)$ при $p > 0$ может быть определена как сумма независящей от давления части $S_L = \int (C_p/T)dT$ и аномального вклада $\Delta S_2 = \int (\Delta C_p/T)dT$, определенного при $p = 0$ и смещенного по температурной шкале при $p > 0$ в соответствии со значением dT_2/dp [1]. Полная энтропия в зависимости от температуры и давления показана на рис. 2, *а*. Значения экстенсивного БКЭ были вычислены как разность $\Delta S^{BCE}(T, p) = S(T, p \neq 0) - S(T, p = 0)$ при постоянной температуре (рис. 2, *б*). Очевидно, что значение на-

сыщения ΔS^{BCE} будет равно энтропии фазового перехода $Pc \rightarrow P$–1, которое довольно велико ~ Rln4 в NH_4HSO_4 при T_2 [5]. Интенсивный БКЭ $\Delta T_{AD}{}^{BCE}$ был определен как изменение температуры при постоянной энтропии в зависимости от давления (рис. 2, *в*). Максимальное значение $\Delta T_{AD}{}^{BCE} \approx 19$ K сопоставимо со значениями в ферромагнитных и сегнетоэлектрических материалах, которые рассматриваются как перспективные материалы в качестве твердых хладагентов [1; 2]. Самое главное, что давление, необходимое для обеспечения максимума БКЭ при T_2 в NH_4HSO_4, является относительно низким $p \geq 0{,}3$ кбар.

Используя вышеупомянутую процедуру, было определено адиабатическое изменение температуры с изменением давления в окрестности фазовых переходов второго рода в $Rb_x(NH_4)_{1-x}HSO_4$ и ТГС. Из-за малой величины энтропии ($\Delta S < \ln 2$) величина $\Delta T_{AD}{}^{BCE}$ оказывается также незначительна (рис. 3). Видно, что замена Rb → NH_4 приводит к сильному уменьшению значения $\Delta T_{AD}{}^{BCE}$. Самый низкий интенсивный БКЭ характерен для ТГС и связан с самым низким барическим коэффициентом dT/dp = 2,6 K/кбар. Сравниваются ЭКЭ и БКЭ (табл. 2). Для того чтобы значения обоих эффектов были близки в районе перехода $P2_1/c \rightarrow Pc$ в NH_4HSO_4, требуется очень низкое давление и большое электрическое поле. Сравнение полученных данных показывает также, что, с одной стороны, ЭКЭ является самым большим в ТГС и, с другой стороны, сульфат водорода характеризуется самой большой барокалорической эффективностью благодаря большому барическому коэффициенту dT_1/dp = 14 K/кбар.

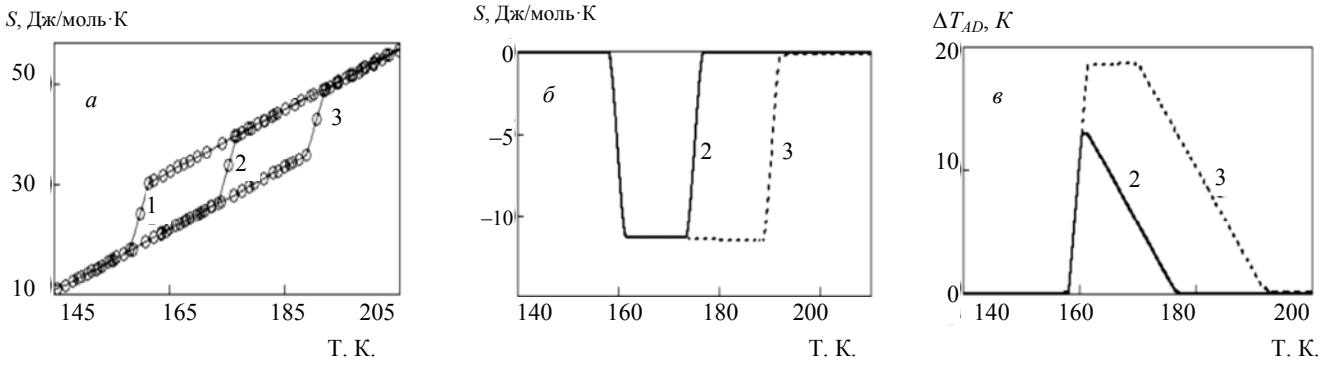


Рис. 2. Полная энтропия S (*а*), экстенсивный ΔS (*б*) и интенсивный ΔT_{AD} (*в*) БКЭ для NH_4HSO_4 в окрестности фазового перехода $Pc \rightarrow P$–1; p = 0 бар (1); p = 200 бар (2); p = 400 бар (3)

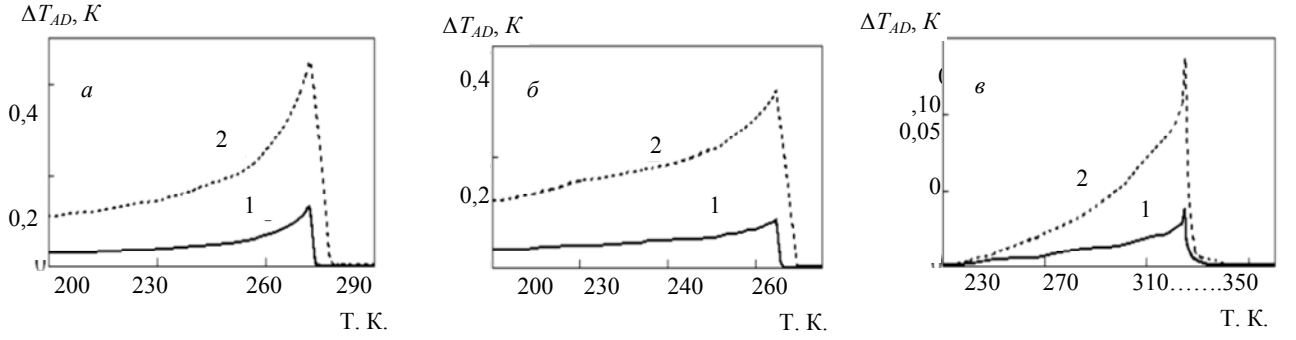


Рис. 3. Интенсивный ΔT_{AD} БКЭ вблизи фазового перехода второго рода в NH_4HSO_4 (*а*), $RbHSO_4$(*б*) и ТГС (*в*); p = 100 бар (1), p = 400 бар (2)

Таблица 2

Температура фазового перехода T_{PT}, электрическое поле E, гидростатическое давление p, интенсивный и экстенсивный ЭКЭ ($\Delta T_{AD}{}^{ECE}$, ΔS^{ECE}) и БКЭ ($\Delta T_{AD}{}^{BCE}$, ΔS^{BCE}). Данные по $\Delta T_{AD}{}^{ECE}$ в ТГС [10]

Кристалл	T_{PT}, К	E, кВ/см	$\Delta T_{AD}{}^{ECE}$, К	ΔS^{ECE}, Дж/кг·К	p, бар	$\Delta T_{AD}{}^{BCE}$, К	ΔS^{BCE}, Дж/кг·К
NH_4HSO_4	271,	1,5	0,025	–0,11	20	0,027	–0,12
	160				20	1,3	–57,6
$Rb_{0.33}(NH_4)_{0.67}HSO_4$	269	1,5	0,025	–0,076			
$RbHSO_4$	264,6	1,5	0,014	–0,044	20	0,02	–0,042
ТГС	323	1,6	0,112	–0,617	20	0,007	–0,044

Таким образом, анализ экспериментальных данных теплоемкости и диэлектрической проницаемости позволяет получить достоверную информацию, касающуюся электрокалорических эффектов в сегнетоэлектриках, испытывающих фазовый переход второго рода, близкий к трикритической точке. Сегнетоэлектрики, характеризующиеся довольно низкой энтропией фазового перехода и высокой восприимчивостью к гидростатическому давлению, могут показать значительную барокалорическую эффективность по сравнению с электрокалорической.

Библиографические ссылки

1. Tishin A. M., Spichkin Y. I. The Magnetocaloric Effect and Its Applications. United Kingdom: Bristol Institute of Physics, 2003.

2. Birks E., Dunce M., Sternberg A. High electrocaloric effect in ferroelectrics // Ferroelectrics. 2010. № 400. P. 336–343.

3. Medeiros L. G., Oliveira N. A., Troper A. Barocaloric and magnetocaloric effects in $La(Fe_{0.89}Si_{0.11})_{13}$ // J. Appl. Phys. № 103. 2008. P. 113909-1 – 113909-5.

4. Phase transitions and caloric effects in ferroelectric solid solutions of ammonium and rubidium hydrosulfates / E. A. Mikhaleva [et. al.] // Phys. Solid State. 2011. № 51. P. 510–517.

5. Исследование фазовых переходов в гидросульфате аммония / И. Н. Флеров [и др.] // Известия АН СССР Сер. Физика. № 39. 1975. С. 752–757.

6. Флеров И. Н., Искорнев И. М.: Фазовый переход в сегнетоэлектрике $RbHSO_4$ // Физика твердого тела. 1976. № 18. С. 3666–3669.

7. Logarithmic singularity in the specific heat in the vicinity of phase transitions in uniaxial ferroelectrics / B. A. Strukov [et al.] // Phys. Solid. State. 1998. № 40. P. 95–95.

8. Поландов И. Н., Мылов В. П., Струков Б. А. Об *p–T* диаграмме сегнетоэлектрического кристалла NH_4HSO_4 // Физика твердого тела. 1968. № 10. С. 2232–2234.

9. Gesi K, Ozawa K. Effect of hydrostatic pressure on the phase transitions in ferroelectric $RbHSO_4$ and $RbDSO_4$ // J. Phys. Soc. Jap. 1975. № 38. P. 459–4462.

10. Струков Б. А. Электрокалорический эффект в монокристалле триглицинсульфата // Кристаллография. 1966. № 11. С. 892–895.

11. Леонидова Г. Г., Поландов И. Н., Голентовская И. П. Эффект гидростатического давления на температуру фазового перехода в триглицинсульфате // Физика твердого тела. 1962. № 4. С. 3337–3340.

12. Силиверстова И. М. Диэлектрические свойства дейтерированного кристалла триглицинсульфата // Кристаллография. 1961. № 6. С. 582–590.

13. Александров К. С., Флеров И. Н. Области применения термодинамической теории к структурным фазовым переходам близким к трикритической точке // Физика твердого тела. 1979. № 21. 327–336.

14. Effect in Oxyfluorides Rb_2KTiOF_5 and $(NH_4)_2NbOF_5$ / M. V. Gorev [at. al] // Ferroelectrics. 2010. № 397. P. 76–80.

V. S. Bondarev, A. N. Vtyurin, A. S. Krylov, E. M. Kolesnikova

ELECTROCALORIC AND BAROCALORIC EFFECT IN SOME FERROELECTRIC HYDROSULFATES AND TRIGLYCINE SULFATE

A comparative analysis of electrocaloric and barocaloric efficiency in ferroelectrics $Rb_x(NH_4)_{1-x}HSO_4$ and TGS is performed. A good agreement was found between intensive electrocaloric effects measured experimentally and calculated using electric equation of state. Barocaloric effects were evaluated by analysis of the experimental data on heat capacity and T-p phase diagrams.

Keywords: Ferroelectrics; phase transitions; electrocaloric and barocaloric effects.

© Бондарев В. С., Втюрин А. Н., Крылов А. С., Колесникова Е. М., 2012

УДК 537.6; 537.9

И. А. Гудим, М. С. Молокеев, В. Л. Темеров, Л. Н. Безматерных, А. В. Еремин

РАЦЕМИЯ ТРИГОНАЛЬНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ОКСИБОРАТОВ*

Обнаружено рацемическое двойникование в монокристаллах оксиборатов $RM_3(BO_3)_4$ (R = Y, La-Lu; M = Fe, Al, Ga). Установлена его зависимость от химического состава кристаллов. Показано, что количество правых и левых изомеров можно изменять путем введения замещающих элементов как в R, так и M подрешетках. Это дает возможность устранить влияние двойникования на свойства кристаллов.

Ключевые слова: рост кристаллов, мультиферроики, спиральные магнитные структуры.

Монокристаллы редкоземельных алюмо- и ферроборатов со структурой хантита привлекли большое внимание как лазерные средствы с однопозиционным распределением активных ионов. В начале этого тысячелетия в кристаллах ферроборатов была обнаружена достаточно большая магнитоэлектрическая поляризация [1; 2].

В последние годы в монокристаллах гольмиевого, тулиевого и эрбиевого алюмоборатов также был обнаружен [3] сильный магнитоэлектрический эффект, и они вызвали немалый интерес в качестве объектов для изучения механизма формирования магнитоэлектрического взаимодействия и возможностей электрического управления локальным магнитным состоянием в структурах с квазиодномерным распределением магнитных катионов.

Наличие в структуре кристалла геликоидальных цепочек из октаэдров $Fe(Al)O_6$ предполагает существование их в двух видах: с правым и левым вращением. Действительно, как показали проведенные рентгенографические исследования, существуют кристаллы с правым вращением цепочек, например $HoFe_3(BO_3)$, и левым, например $PrFe_3(BO_3)$ (рис. 1). Более того, оказалось, что в зависимости от химического состава в кристаллах могут одновременно присутствовать участки цепочек и с левым, и с правым вращением.

Установлено, что соотношение между правыми и левыми изомерами зависит от ионных радиусов Re и M. Показано (в процентах) содержание правых изомеров в монокристаллах $ReFe_3(BO_3)_4$ и $ReAl_3(BO_3)_4$. У первых явно, а у вторых менее выражена тенденция к уменьшению количества правых изомеров в кристаллах по мере возрастания ионного радиуса редкоземельного элемента.

Аналогичная тенденция наблюдается при замещении на катион с меньшим ионным радиусом в редкоземельной подрешетке или в подрешетке малого катиона (рис. 2, 3).

Таким образом, путем замещения катионов можно изменять соотношение правых и левых изомеров вплоть до устранения хиральности.

Рассмотрим данные по двойникованию и измеренной магнитоэлектрической поляризации в парамагнитных кристаллах (табл. 1). Предполагая, что измеренная магнитоэлектрическая поляризация равна разности поляризаций от лево- и правозакрученных изомеров, можно оценить локальную микроскопическую поляризацию, которую можно было бы достичь при однонаправленном вращении спиралей.

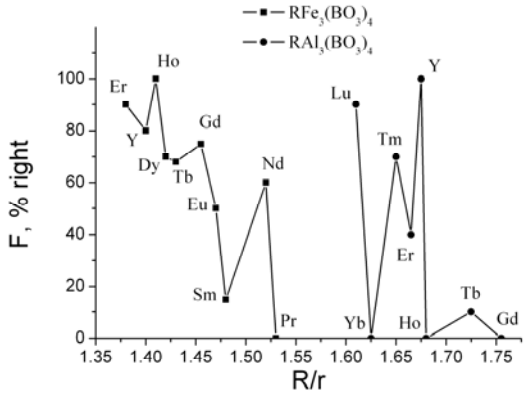


Рис. 1. Соотношение правых и левых изомеров в монокристаллах $ReFe_3(BO_3)_4$ и $ReAl_3(BO_3)_4$

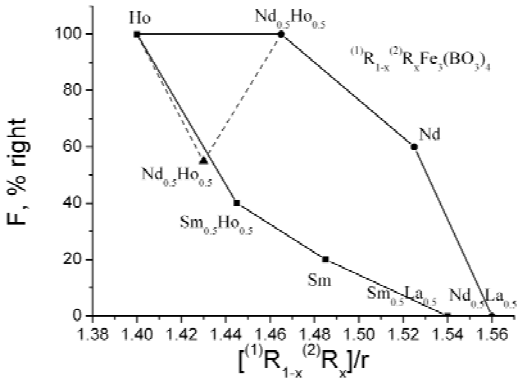


Рис. 2. Содержание в процентах правых изомеров в монокристаллах $Nd_{1-x}(Ho,La)_xFe_3(BO_3)_4$ и $Sm_{1-x}(Ho,La)_xAl_3(BO_3)_4$

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8365.

Таблица 1

Соотношение двойникования и магнитоэлектрического эффекта

Состав	R/r	% правых	% левых	$P_a(H)_{max}$ (μC/m^2)
$TmAl_3(BO_3)_4$	1,645	70	30	700 (70кЭ)
$ErAl_3(BO_3)_4$	1,664	40	60	150 (70кЭ)
$HoAl_3(BO_3)_4$	1,684	0	100	3600 (70кЭ)

Таблица 2

Результаты эксперимента при выращивании монокристалла $SmFe_{3-x}Al_x(BO_3)_4$

№ эксперимента	Содержание *x* по закладке	Рентгеновские измерения			*F*, %
		x из рентгеновских измерений	Параметры решетки (Å)		
			a	c	
1	0	0	9,577	7,595	100
2	0,05	0,27	9,570	7,593	56
2	0,1	0,33	9,563	7,581	0
4	0,15	0,42	9,557	7,580	0

Чтобы непосредственно показать влияние степени замещения в системе малых катионов на двойникование, был проведен эксперимент (табл. 2).

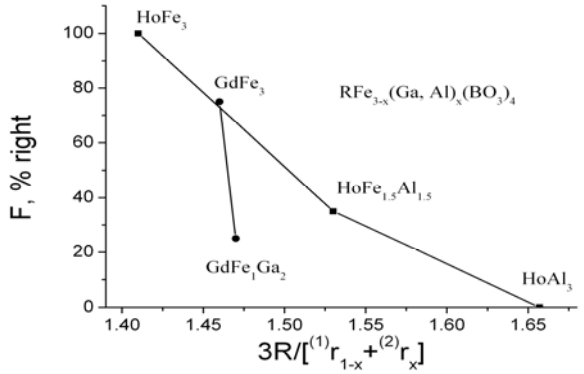


Рис. 3. Содержание в процентах правых изомеров в монокристаллах $HoFe_{3-x}Al_x(BO_3)_4$ и $GdFe_{3-x}Ga_x(BO_3)_4$

Из приготовленного раствора-расплава выращивались монокристаллы $SmFe_3(BO_3)_4$. Затем в этот раствор-расплав добавлялась только окись алюминия в соответствии с $x = 0,05$, и в аналогичном температурном и динамическом режиме выращивались кристаллы $SmFe_{2,95}Al_{0,05}(BO_3)_4$. Далее раствор-расплав опять пополнялся окисью алюминия, и последовательно выращивались кристаллы с $x = 0,1$; $x = 0,15$. При этом сводилось к минимуму возможное попадание примесей в раствор-расплав при изменении состава кристаллов. В результате наблюдалась (без отклонений) тенденция к увеличению числа левых изомеров при уменьшении среднего радиуса ионов в подрешетке малых катионов.

Другими причинами, кроме химического состава, влияющими на появление изомеров с левым и правым вращением, могут являться условия выращивания кристаллов, в частности, наличие примесей, дефекты кристаллической структуры. Такие исследования в настоящее время продолжаются.

В заключении можно отметить следующее соотношение левых и правых изомеров в монокристаллах тригональных редкоземельных оксиборатов зависит от химического состава кристалла, соотношения радиусов (для замещенных кристаллов – средние радиусы) редкоземельного и малого катионов. Введением замещающих элементов можно добиться однонаправленности геликоидальных цепочек кристалла.

Библиографические ссылки

1. Giant magnetoelectric effect in $HoAl_3(BO_3)_4$ / R. P. Chaudhury [at. al] // Phys. Rev. B. 2009. V. 80. P. 104424–104428.

2. Магнитоэлектрические и магнитоупругие свойства редкоземельных ферроборатов / М. Кадомцева [и др.] // ФНТ. 2010. Т. 36. № 6. С.640–653.

3. Magnetoelectricity in the system $RAl_3(BO_3)_4$ (R = Tb, Ho, Er, Tm) / K.-C. Liang, R. P. Chaudhury, B. Lorenz et. al. // Abstract of Low Temperature Conf. Benijne, 2011. P. C0234.

I. A. Gudim, M. S. Molokeev, V. L. Temerov, L. N. Bezmaternykh, A. V. Eremin

RACEMISM OF TRIGONAL SINGLE RARE-EARTH OKSIBORATES

The authors describe the uncovered racemic twinning in single crystals of *$RM_3(BO_3)_4$ (R=Y, La-Lu; M=Fe, Al, Ga) and its dependence on chemical composition of the crystals. The authors prove that number of left and right isomers can be changed by the introduction of substitute elements in R and M sublattices, which makes it possible to eliminate the influence of twinning on the properties of crystals.*

Keywords: crystal growth, multiferroics, spiral magnetic structures.

© Гудим И. А., Молокеев М. С., Темеров В. Л., Безматерных Л. Н., Еремин А. В., 2012

УДК 621.791.72

А. А. Дружинина, В. Д. Лаптенок, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин

МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ ПО РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ИЗ ЗОНЫ ОБРАБОТКИ

Предложен метод контроля влияния магнитных полей, действующих на электронный луч в процессе электронно-лучевой сварки. Разработана математическая модель коллимированного рентгеновского датчика контроля влияния магнитных полей.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, магнитное поле, рентгеновское излучение.

Одной из главных причин отклонения электронного пучка от стыка при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) ферромагнитных материалов является влияние магнитных полей. Магнитные поля в большинстве случаев обусловлены остаточной намагниченностью свариваемых деталей, которая формируется в ферромагнитных материалах при обработке и подготовке к сварке. Наибольшую опасность представляет намагниченность, направленная вдоль линии сварки, поскольку луч в данном случае отклоняется поперек линии стыка [1].

Существующие способы уменьшения влияния магнитных полей такие, как предварительное размагничивание и экранирование электронного пучка, являются трудоемкими и дорогостоящими либо снижают возможность наблюдения за процессом сварки. Поэтому актуальной является задача разработки методов контроля влияния на электронный луч магнитных полей и их компенсации в процессе электронно-лучевой сварки.

Наиболее приемлемым способом защиты пучка электронов от магнитного поля является его компенсация в зоне сварки. Для этого измеряется продольная составляющая магнитного поля в пространстве между пушкой и свариваемым изделием и с помощью электромагнитных катушек осуществляется его компенсация [2].

В работе [3] предложен способ контроля влияния магнитных помех на электронный луч коллимированным рентгеновским датчиком, ориентированным вдоль стыка свариваемых деталей, при котором луч на короткое время (2 мс) выводят из сварочной ванны и перемещают по поверхности изделия поперек стыка, по возникающему рентгеновскому излучению определяют время прохождения луча в зоне обзора рентгеновского датчика, по которому судят об отклонении электронного луча, обусловленном магнитными помехами, а компенсацию влияния магнитных помех осуществляют с помощью компенсационных катушек магнитного поля, установленных вдоль оси луча. Недостатком данного способа является необходимость периодического кратковременного прекращения сварки и вывода электронного луча из сварочной ванны.

Исходя из потребностей производства и учитывая достигнутый технический уровень систем контроля и компенсации магнитных полей, в данной работе решались задачи разработки математической модели коллимированного рентгеновского датчика и метода контроля влияния магнитных помех, действующих на электронный луч в процессе ЭЛС.

При взаимодействии электронного пучка с обрабатываемым материалом электроны в результате торможения теряют свою энергию. Этот процесс сопровождается возбуждением рентгеновского излучения, локализованного в месте взаимодействия электронного пучка с обрабатываемым материалом.

Возможность контролировать влияние магнитных помех на электронный луч при ЭЛС по рентгеновскому излучению из зоны торможения электронов основана на том, что интенсивность рентгеновского излучения зависит от площади поверхности, через которую проходит поток излучения. Отклонение луча, обусловленное действием магнитных полей, от оси электронной пушки вызовет уменьшение доли рентгеновского излучения, прошедшего через площадь кристалла датчика, а следовательно, и интенсивности рентгеновского излучения, измеренной датчиком.

Рентгеновский датчик контроля влияния магнитных полей содержит рентгеновский детектор и коллиматор, представляющий щелевую бленду, ограничивающую зону обзора датчика и выполненную из материала, поглощающего рентгеновское излучение.

Коллимированный датчик РД ориентируется таким образом, чтобы проекция 2 коллимационного отверстия, представляющего собой полосу, была направлена вдоль стыка 1 свариваемых деталей и его ось находилась в одной плоскости с оптической осью электронно-лучевой пушки ЭЛП и стыком (рис. 1). В этом случае контролируется смещение электронного пучка относительно оптической оси пушки.

В результате взаимодействия пучка электронов с обрабатываемым материалом возникает тормозное рентгеновское излучение. Интенсивность рентгеновского излучения от поверхности свариваемого изделия можно определить из следующего выражения [4]:

$$I_{\text{д}} = kk_1k_2I_{\text{п}}ZU_0^{\,2}, \qquad (1)$$

где k =1,5·10^{-9} В$^{-1}$ – коэффициент пропорциональности [3]; k_1 – коэффициент, учитывающий пространственную ориентацию датчика; k_2 – коэффициент, учитывающий длину пробега электронов в материале изделия; $I_{\text{п}}$ – ток электронного пучка; Z – атомный номер материала свариваемого изделия; U_0 – ускоряющее напряжение.

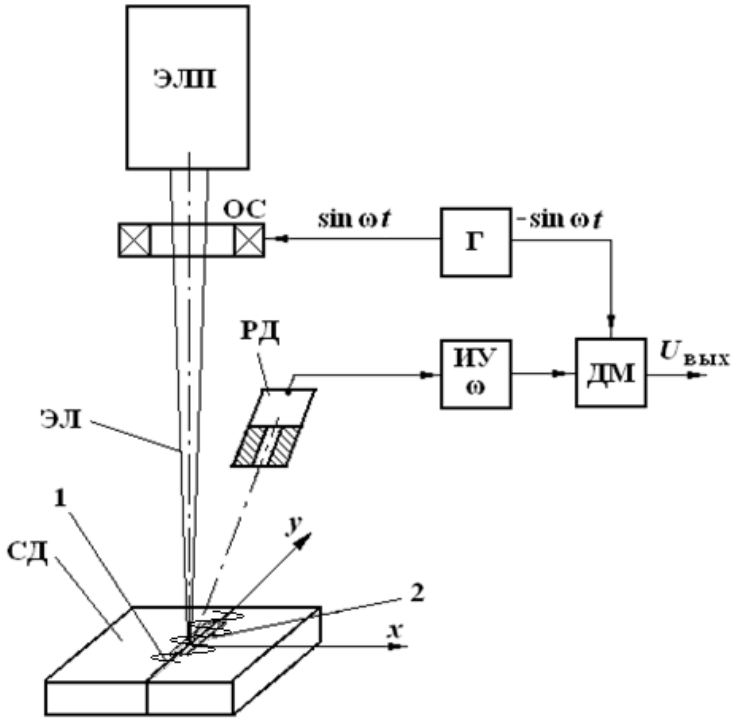


Рис. 1. Схема метода измерения влияния магнитных полей на электронный луч с помощью рентгеновского датчика:
ЭЛП – электронно-лучевая пушка; ЭЛ – электронный луч; СД – свариваемые детали; ОС – отклоняющая система; РД – коллимированный рентгеновский датчик; Г – генератор; ИУ – избирательный усилитель; ДМ – демодулятор; *1* – стык свариваемых деталей; *2* – проекция коллиматора

Учитывая, что плотность тока электронного пучка распределяется по поверхности детали неравномерно, выражение (1) можно записать в виде

$$I_{\text{д}} = kk_1 U_0^{\,2} Z I_{\text{п}} \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{д}}(x,y)\, j_{\text{п}}(x,y)\, dxdy, \qquad (2)$$

где $f_{\text{д}}(x, y)$ – функция обзора рентгеновского датчика; $j_{\text{п}}(x, y)$ – нормированное распределение плотности тока пучка на поверхности детали в координатах x, y, причем

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} j_{\text{п}}(x,y)\, dxdy = 1 .$$

Ряд исследований показали, что нормированная плотность тока электронного пучка с достаточной мерой точности описывается нормальным законом распределения [5; 6; 7]:

$$j_{\text{п}}(x,y) = \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) \times \\ \times \frac{1}{\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-\varepsilon_y)^2}{2\sigma_y^2}\right), \qquad (3)$$

где σ_x, σ_y – среднеквадратические отклонения электронов от оси пучка по соответствующим осям; ε_x, ε_y – положение оси пучка в координатах x и y.

Так как щель коллиматора ориентирована вдоль оси y (рис. 1), то функция обзора рентгеновского датчика не зависит от y, т. е.

$$f_{\text{д}}(x,y) = f_{\text{д}}(x) .$$

Предположим, что распределение плотности тока является независимым:

$$j_{\text{п}}(x,y) = j_{\text{п}}(x)\, j_{\text{п}}(y) .$$

В этом случае плотность тока пучка вдоль оси y

$$\int_{-\infty}^{\infty} j_{\text{п}}(y)\, dy = 1 ,$$

и выражение (2) примет следующий вид:

$$I_{\text{д}} = kk_1 U_0^{\,2} Z I_{\text{п}} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{д}}(x)\, j_{\text{п}}(x)\, dx \qquad (4)$$

или

$$I_{\text{д}} = kk_1 U_0^{\,2} Z I_{\text{п}} \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{д}}(x) \exp\left(-\frac{(x-\varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx. \qquad (5)$$

Если обозначить l_1 – длина коллимационного канала; l_2 – расстояние от коллиматора до поверхности детали (рис. 2), то функция зоны обзора коллиматора рентгеновского датчика (рис. 3) будет иметь вид

$$f_{\text{д}}(x)=\begin{cases}0, & \text{при } x<-\dfrac{l_2}{l_1}h-\dfrac{h}{2},\\ \dfrac{l_1}{l_2h}x+\left(1+\dfrac{l_1}{2l_2}\right), & \text{при} -\dfrac{h}{2}-\dfrac{l_2}{l_1}h\le x<-\dfrac{h}{2},\\ 1, & \text{при } -\dfrac{h}{2}\le x\le\dfrac{h}{2},\\ -\dfrac{l_1}{l_2h}x+\left(1+\dfrac{l_1}{2l_2}\right), & \text{при } \dfrac{h}{2}<x\le\dfrac{h}{2}+\dfrac{l_2}{l_1}h,\\ 0, & \text{при } x>\dfrac{h}{2}+\dfrac{l_2}{l_1}h,\end{cases} \quad (6)$$

где h – ширина щели коллиматора рентгеновского датчика.

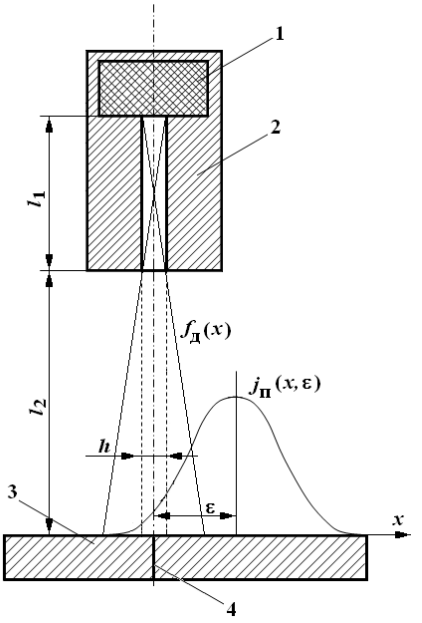


Рис. 2. Схема размещения рентгеновского датчика: *1* – рентгеновский детектор; *2* – коллиматор; *3* – свариваемое изделие; *4* – стык свариваемых деталей

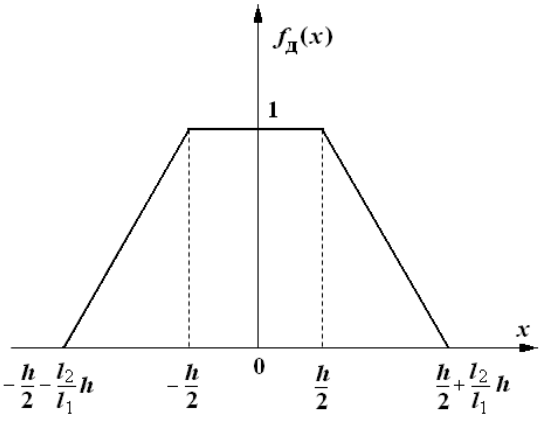


Рис. 3. Функция зоны обзора коллиматора рентгеновского датчика

Интенсивность рентгеновского излучения в этом случае определяется выражением

$$I_{\text{д}}=kk_1U_0{}^2ZI_{\text{п}}\frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}}\left(\int\limits_{-\frac{h}{2}-\frac{l_2}{l_1}h}^{-\frac{h}{2}}\left(\frac{l_1}{l_2h}x+1+\frac{l_1}{2l_2}\right)\times\right.$$

$$\times\exp\left(-\frac{(x-\varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right)dx+\int\limits_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\exp\left(-\frac{(x-\varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right)dx+ \quad (7)$$

$$\left.+\int\limits_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}+\frac{l_2}{l_1}h}\left(-\frac{l_1}{l_2h}x+1+\frac{l_1}{2l_2}\right)\exp\left(-\frac{(x-\varepsilon_x)^2}{2\sigma_x^2}\right)dx\right).$$

По выражению (7) рассчитаны нормированные статические характеристики в зависимости рентгеновского излучения от смещения пучка электронов от оптической оси электронно-лучевой пушки, вызванного действием магнитных полей. Нормирование производилось делением полученных из выражения (7) значений на $kk_1U_0{}^2ZI_{\text{п}}$. Расчеты проводились при длине коллимационного канала l_1 = 10 мм и расстоянии от коллиматора до поверхности детали l_2 = 15 мм. Величина σ_x определена из выражения эффективного диаметра для нормального нормированного распределения [2]:

$$d=\sigma_x\sqrt{2\pi}\,. \quad (8)$$

Приняв d = 0,8 мм, получим

$$\sigma_x=\frac{d}{\sqrt{2\pi}}=0,32\,.$$

Интенсивность рентгеновского излучения зависит от положения луча относительно оптической оси электронно-лучевой пушки для различных значений ширины коллиматора рентгеновского датчика (рис. 4). Из этих характеристик видно, что интенсивность рентгеновского излучения максимальна при совмещении электронного луча с оптической осью пушки.

При увеличении ширины коллимационного отверстия датчика интенсивность рентгеновского излучения увеличивается до своего максимального значения, при достижении которого дальнейшее увеличение ширины коллиматора будет приводить к снижению чувствительности датчика. Пригодной для контроля влияния магнитных полей на электронный луч является ширина коллимационного отверстия, обеспечивающая 60–80 % максимальной интенсивности рентгеновского излучения. Этому условию удовлетворяет значение h = 0,3 мм.

Для реализации метода синхронного детектирования придадим гармонические колебания параметру ε_x в соответствии с выражением

$$\varepsilon_x=\varepsilon_0+\varepsilon_m\sin\omega t\,, \quad (9)$$

где ε_0 – рассогласование положений пучка и оптической оси электронно-лучевой пушки; ε_m – амплитуда сканирования пучка поперек стыка; $\omega=2\pi/T$ – частота

сканирования поперек стыка (T – период сканирования).

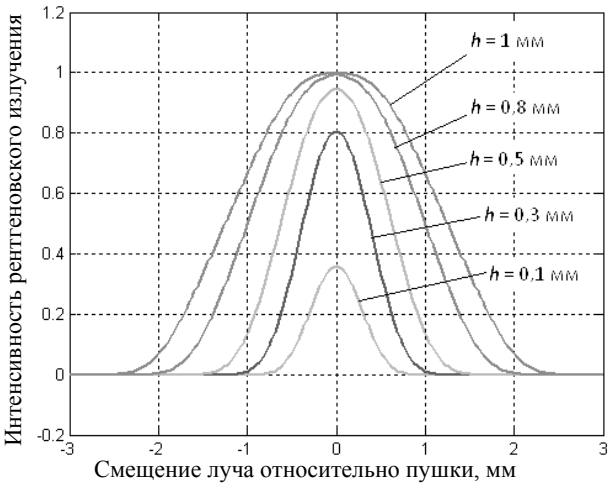


Рис. 4. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от положения луча относительно оптической оси электронной пушки

В этом выражении для простоты начальная фаза гармонической составляющей принята равной нулю, что не оказывает влияния на полученные результаты.

Выражение (5) с учетом (9) будет иметь вид

$$I_{\text{д}} = kk_1 U_0^{\,2} Z I_{\text{п}} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \times \times \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{д}}(x) \exp\left(-\frac{\left(x - \varepsilon_0 - \varepsilon_m \sin \omega t\right)^2}{2\sigma_x^2} \right) dx. \quad (10)$$

Изменение интенсивности рентгеновского излучения во времени можно представить в виде кратного ряда Фурье [8]:

$$I_{\text{д}}(\omega t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega t}, \quad (11)$$

где C_n – коэффициенты ряда Фурье.

Для упрощения расчетов примем период сканирования $T = 2\pi$, тогда, с учетом того, что $\omega = 2\pi/T = 2\pi/2\pi = 1$, формула (11) примет вид

$$I_{\text{д}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jnt}, \quad (12)$$

где коэффициенты ряда Фурье определяются формулой

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\text{д}}(t) e^{-jnt} dt \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, ...). \quad (13)$$

С учетом выражения (10), получим

$$C_n = \frac{1}{2\pi} kk_1 U_0^{\,2} Z I_{\text{п}} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \times \times \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\text{д}}(x) \exp\left(-\frac{\left(x - \varepsilon_0 - \varepsilon_m \sin t\right)^2}{2\sigma_x^2} \right) dx \cdot e^{-jnt} dt. \quad (14)$$

Соотношения (12) и (14) выражают математическую модель рентгеновского датчика как элемента, обладающего частотным спектром выходного сигнала при наличии периодического сигнала сканирования электронного пучка. Математическая модель позволяет выявить составляющие сигнала датчика с частотами, кратными частоте сканирования.

В тригонометрической форме ряд (12) будет иметь вид

$$I_{\text{д}}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos nt + b_n \sin nt \right), \quad (15)$$

где коэффициенты ряда определяются выражениями:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\text{д}}(t) dt, \quad (16)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\text{д}}(t) \cos nt dt, \quad (17)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} I_{\text{д}}(t) \sin nt dt. \quad (18)$$

В этом случае

$$C_n = \frac{a_n - jb_n}{2}.$$

Согласно выражениям (16)–(18) видим, что интенсивность рентгеновского излучения можно представить суммой постоянной составляющей (16) и гармонических составляющих (17), (18).

Если сканирование отсутствует, т. е. $\omega = 0$, то ряды (12), (15) вырождаются в соотношение (5).

Нечетные и четные гармоники зависят от положения электронного луча относительно оптической оси пушки (рис. 5, 6). Расчет соответствующих гармоник производился по формулам (17) и (18) с учетом формул (6) и (10).

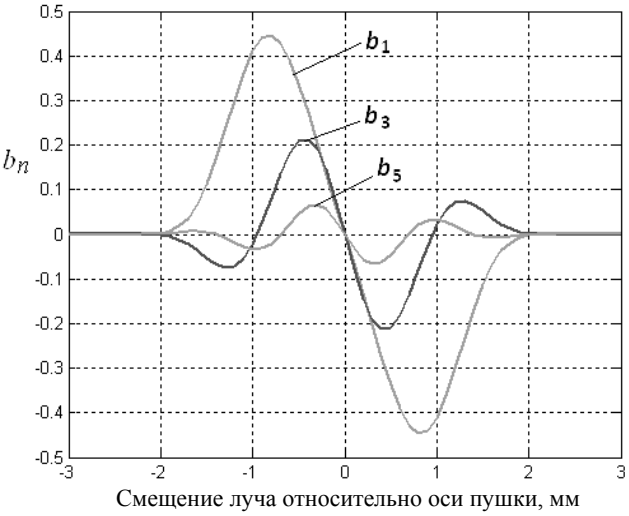


Рис. 5. Зависимость $b_n(\varepsilon_0)$ при $\varepsilon_m = 1$

Из указанных характеристик видно, что наиболее подходящей для контроля влияния магнитных полей

на электронный луч является первая гармоника b_1 (рис. 5), имеющая наибольшую амплитуду и однозначность фазы в зависимости от направления действия магнитных полей.

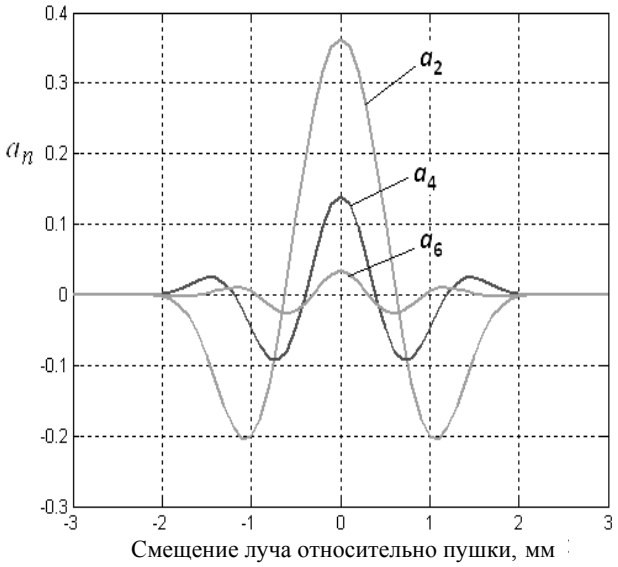


Рис. 6. Зависимость $a_n(\varepsilon_0)$ при $\varepsilon_m = 1$

Амплитуды четных гармоник a_n (рис. 6) с частотами, кратными 2ω, максимальны при $\varepsilon_0 = 0$. Амплитуды четных гармоник с частотами, кратными частоте сканирования ω, равны нулю. Наибольшую амплитуду и пригодность для целей контроля и управления процессом ЭЛС имеет вторая гармоника с частотой 2ω.

Амплитуда выходного сигнала датчика зависит от амплитуды сканирования луча ε_m. Для определения оптимального значения ε_m, обеспечивающего максимальную амплитуду выходного сигнала, были построены зависимости амплитуды первой гармоники b_1 от смещения луча относительно оптической оси электронной пушки, вызванного действием магнитных полей, при различных значениях амплитуды сканирования ε_m (рис. 7).

Здесь видим, что максимальная амплитуда первой гармоники выходного сигнала рентгеновского датчика соответствует амплитуде сканирования $\varepsilon_m = 0{,}7$ мм.

Таким образом, предложен метод контроля и компенсации влияния магнитных полей на положение электронного пучка относительно геометрической оси электронно-лучевой пушки.

В соответствии с разработанной математической моделью рентгеновского датчика первая гармоника частоты сканирования позволяет определять отклонение электронного пучка от оси электронно-лучевой пушки. Амплитуда второй гармоники пропорциональна чувствительности измерительного преобразователя и может быть использована для стабилизации коэффициента усиления системы компенсации влияния магнитных помех.

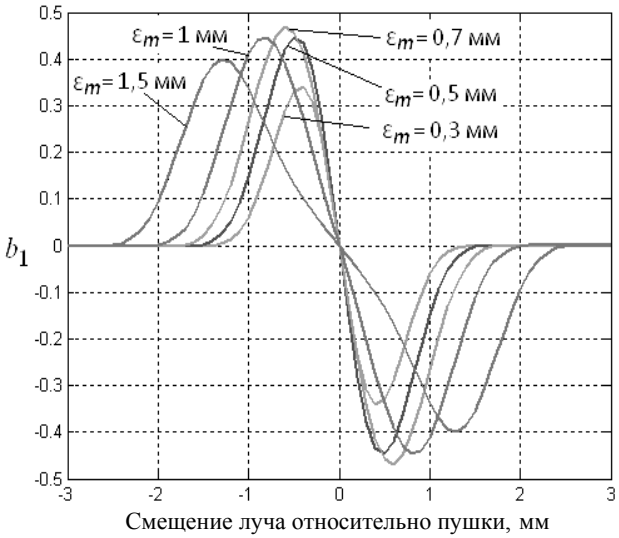


Рис. 7. Зависимости $b_1(\varepsilon_0)$ при различных значениях амплитуды сканирования ε_m

Библиографические ссылки

1. Драгунов В. К., Гончаров А. Л., Слива А. П. Пространственные параметры электронного пучка при взаимодействии с намагниченной мишенью // Сварочное производство. 2008. № 12. С. 20–24.

2. Управление электронно-лучевой сваркой / В. Д. Лаптенок, А. В. Мурыгин, Ю. Н. Серегин, В. Я. Браверман ; Сиб. аэрокосмич. акад. Красноярск, 2000.

3. Automatische Steuerung des Elektronenstrahlschweiβprozesses mit Schweiβzusatz in Abhangigkeit von der Werkstuckabmessung und magnetischen Storfeldern / P. Anderl, C. Monk, W. Paul, K. Steigerwald / DVS-Berichte 63/ Steigerwald Strahltechnic GmbH Puchheim. Munchen, 1963. P. 3–10.

4. Рентгеновские лучи / пер. с англ. и нем. Л. Н. Бронштейн. М.: Изд-во иностр. лит, 1960.

5. Балакирев Е. Н., Майоров Л. Н., Лившиц М. Л. Устройство для получения изображения с помощью вторичных электронов из зоны электронно-лучевой сварки // Сварочное производство, 1979. № 6. С. 73–78.

6. Баня Е. Н., Киселевский Ф. Н., Назаренко О. К. Анализ сигналов датчиков вторичной эмиссии, применяемых в системах автоматического направления электронного пучка по стыку // Автоматическая сварка. 1973. № 3.

7. Башенко В. В., Мауер К. О., Миткевич Е. А. Использование отраженных электронов для контроля установки луча на стык и параметров стыка при электронно-лучевой сварке // Труды ЛПИ. 1974. № 336. С. 97–100.

8. Математические основы теории автоматического регулирования : учеб. пособие. В 2 т. / под ред. Б. К. Чемоданова. 2-е изд., доп. М. : Высш. шк., 1977.

A. A. Druzhinina, V. D. Laptenok, A. V. Murygin, Yu. N. Seregin

METHOD FOR MONITORING OF IMPACT OF MAGNETIC FIELDS IN THE PROCESS OF ELECTRON-BEAM WELDING BY X-RAY RADIATION FROM TREATMENT AREA

Method for monitoring of impact of magnetic fields on the electron beam in the process of electron-beam welding is proposed. The mathematical model of collimated X-ray sensor of he effect of magnetic fields monitoring is developed.

Keywords: electron-beam welding, magnetic field, X-ray radiation.

© Дружинина А. А., Лаптенок В. Д., Мурыгин А. В., Серегин Ю. Н., 2012

УДК 544.18, 538.91

Н. С. Елисеева, А. А. Кузубов, П. О. Краснов, А. С. Федоров, А. О. Лыхин

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ И ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В ИНТЕРМЕТАЛЛИДЕ Mg_2Ni[*]

Представлено теоретическое исследование интерметаллида Mg_2Ni *как потенциального материала для абсорбирования водорода. Рассмотрены процессы сорбции и диффузии водорода в объеме данного материала. Изучено влияние структурных характеристик на энергию сорбции атомов водорода.*

Ключевые слова: водородная энергетика, сорбция, диффузия, Mg_2Ni*, теория функционала плотности (DFT).*

Важное значение для решения проблем водородной энергетики имеют гидриды интерметаллических соединений (ИМС) общей формулы $A_mB_nH_x$, где A_mB_n – соединение двух или более металлов из ряда ИМС, один из которых (А) образует стабильный бинарный гидрид, а другой (В) в обычных условиях с водородом не взаимодействует, но является катализатором диссоциации молекул H_2. Гидридообразующие интерметаллиды принято классифицировать, исходя из соотношения m/n их компонентов. Из большого числа семейств гидридообразующих ИМС наиболее практическое значение имеют AB_5 (структура типа $CaCu_5$), AB_2 (фаза Лавеса), АВ (структура типа CsCl) и A_2B (структура типа B_2Al). В соединениях AB_5 в качестве компонента А используют редкоземельные металлы (РЗМ) или кальций, в AB_2 и АВ – элементы подгруппы титана, в A_2B – главным образом магний. Компонент В во всех семействах преимущественно включает переходные металлы (Fe, Co, Ni, V, Mn, Cr) [1].

Интерметаллические гидриды имеют подходящую для прикладного использования кинетику поглощения/выделения водорода в мягких условиях и поэтому в наибольшей мере подходят для создания систем хранения водорода [2; 3]. Однако практическое хранение водорода в таких связанных состояниях сталкивается с рядом сложностей. Основные трудности, которые необходимо решить для этих материалов – это увеличение скорости процессов сорбции-десорбции водорода и повышение циклической устойчивости материала адсорбента. Для их преодоления требуются углубленные теоретические и экспериментальные исследования в области физико-химических свойств интерметаллидов и гидридов на их основе.

Интерметаллиды на основе магния считаются наиболее перспективными материалами для хранения водорода за счет их высокой емкости, широкой распространенности магния в земной коре и его низкой стоимости по сравнению с альтернативными материалами [4]. Из всех сплавов на основе магния интерметаллическое соединение Mg_2Ni, обладающее гексагональной кристаллической решеткой, может быть легко синтезировано. При этом оно быстро реагирует с водородом, образуя гидрид Mg_2NiH_4, что делает его перспективным материалом для хранения водорода [5; 6]. После гидрирования Mg_2Ni претерпевает структурную перегруппировку, переходя в гидрид Mg_2NiH_4 [7]. Под давлением 1 атм. этот гидрид переходит из высокотемпературной (ВТ) кубической фазы в низкотемпературную (НТ) моноклинную фазу, температура перехода составляет 518–483 K [8–10].

Ввиду того, что для практического применения адсорбентов водорода наиболее подходящим является материал, поглощающий водород при низком давлении и невысоких температурах, низкотемпературная фаза Mg_2NiH_4 привлекает большее внимание исследователей в области водород-аккумулирующих материалов [11–14]. Myers и другие [11] исследовали термодинамические, электронные и оптические свойства моноклинной НТ-Mg_2NiH_4 на основе ab-initio расчетов. Было установлено, что геометрия комплекса NiH_4 в НТ-фазе близка к правильному тетраэдру, что согласуется с данными нейтронной дифракции [15].

[*]Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8194.

Были рассчитаны теплота образования Mg_2NiH_4 из H_4 и Mg_2Ni, а также энтальпия фазового перехода Mg_2NiH_4 из НТ в ВТ-Мфазу, хотя полученные значения оказались значительно выше экспериментальных. Haussermann и другие [12] исследовали структурную стабильность НТ-Mg_2NiH_4 и Ba_2PdH_4, используя DFT расчеты. Разница в связывании водорода этими соединениями объясняется различием в силе взаимодействий групп Ni(Pd)-H и Mg(Ba)-H. Авторами было предложено, что температура десорбции водорода из Mg_2NiH_4 может быть снижена путем введения дефектов (например, замена атома Mg на атом Al) вблизи тетраэдрического комплекса NiH_4. Jasen и др. [13] также провели расчет электронной структуры НТ-Mg_2NiH_4 в рамках приближения локальной плотности (LDA). Ими был сделан вывод, что связь водорода с никелем сильнее, чем с магнием, и взаимодействие sp-оболочек Ni с s-оболочкой водорода является основным в гидриде. На основании расчетов [14] теплоты реакции гидрирования, энтальпии образования и энергии, необходимой для отрыва атома водорода, был сделан вывод, что при гидрировании Mg_2Ni вероятность образования НТ-фазы Mg_2NiH_4 выше, чем ВТ-фазы. Также было установлено, что для удаления водорода при низких температурах из НТ-Mg_2NiH_4, обладающим высокой структурной стабильностью, необходимо вводить в состав материала примесей-катализаторов, облегчающих кинетику процессов сорбции/десорбции. Однако для этого необходимо детальное изучение кинетики диффузии водорода внутри чистой фазы Mg_2Ni. Поэтому целью данной работы и являлось теоретическое исследование сорбции и диффузии водорода в интерметаллическом соединении Mg_2Ni.

Исследования осуществлялись с помощью квантово-химического моделирования в лицензионном программном пакете VASP 5.3 (Vienna Ab-initio Simulation Package) [16–18] в рамках метода функционала плотности (DFT) [19–20] с использованием базиса плоских волн и PAW формализма [21–22]. Вычисления проводились в рамках обобщенного градиентного приближения (GGA) – обменно-корреляционого функционала PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) с коррекцией Grimme, учитывающей ванн-дер-ваальсово взаимодействие [23]. Для нахождения переходного состояния и потенциальных барьеров при переходе атома водорода внутри Mg_2Ni был применен метод упругой ленты (nudged elastic band).

На начальном этапе работы была смоделирована элементарная гексагональная ячейка Mg_2Ni. При оптимизации ее геометрии для интегрирования по первой зоне Брюллюэна (1BZ) эта зона автоматически разбивалась на сетку 12 × 12 × 2, выбранную по схеме Монхорста-Пака [24]. Далее, для изучения диффузии атома водорода в объеме Mg_2Ni, была сконструирована суперячейка из 3 × 3 × 1 элементарных ячеек. При нахождении оптимальной геометрии суперячейки, ввиду достаточно больших ее размеров, количество *k*-точек вдоль каждого из направлений составляло 2 × 2 × 2. Энергия обрезания плоских волн E_{cutoff} в расчетах была равна 269,5 эВ. При моделировании всех исследуемых структур оптимизация геометрии проводилась до значения максимальных сил, действующих на атомы, равных 0,01 эВ/Å. Для определения наиболее выгодных позиций атома водорода в объеме Mg_2Ni были рассчитаны структуры с различным его расположением (рис. 1).

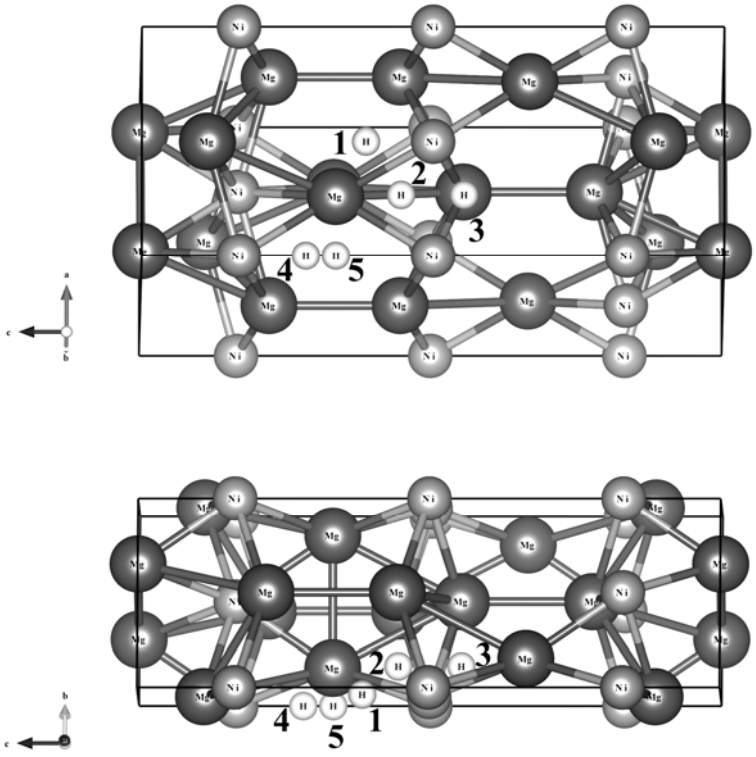


Рис. 1. Сорбционные положения атома водорода в интерметаллиде Mg_2Ni

Таблица 1

Экспериментально определенные и рассчитанные параметры решетки Mg_2Ni

Параметры решетки	a, Å	b, Å	c, Å
Экспериментальные	5,205	5,205	13,236
Рассчитанные	5,125	5,125	13,026

Таблица 2

Значения энергии образования соединения на один атом водорода и расстояния Ni-H в зависимости от положения сорбции водорода в Mg_2Ni

Положение водорода	Энергия связи *E*, эВ	Расстояние Ni-H, Å
1	0,3717	1,5120
2	–0,1087	1,5825
3	–0,1042	1,5848
4	0,4063	1,4981
5	0,6011	1,8253

Таблица 3

Значения энергии образования соединения на один атом водорода и расстояния Ni-H в зависимости от положений сорбции двух и четырех атомов водорода в Mg_2Ni

Положения водорода	Энергия связи *E*, эВ	Расстояние H-H, Å	Угол H-Ni-H, º
2a, 2c	–0,144	2,0574	77,5, 78,0
2c, 2b	–0,177	3,0820	153,2
2c, 2d	–0,182	2,6940	115,5
3a, 3b	–0,185	2,6392	111,9
3a, 3d	–0,453	2,7444	119,0
2d, 3d	0,028	1,7762	64,8, 64,9
3b, 3d	–0,138	2,0830	78,6, 78,8
2b, 3d	–0,002	1,8109	66,8, 66,9
2c, 3d	–0,185	2,6535	111,9
2c, 3b	–0,178	3,1231	159,3
2a, 2b, 2c, 2d	–0,148	2,1100; 2,6563	148,3; 108,4; 80,3
3a, 3b, 3c, 3d	0,074	1,8173; 2,6647	154,2; 115,9; 69,9
2a, 2d, 3c, 3b	0,009	1,8652; 2,5744	154,1; 105,3; 61,6

Расчет энергии образования соединения на один атом водорода в Mg_2NiH реализовывался по формуле

$$E = (E_{Mg_2NiH} - E_{Mg_2Ni} - 0{,}5E_{H_2}), \quad (1)$$

где E_{Mg_2NiH} – полная энергия системы Mg_2NiH; E_{Mg_2Ni} – полная энергия интерметалида Mg_2Ni; E_{H_2} – энергия молекулы водорода.

В ходе оптимизации геометрии элементарной ячейки Mg_2Ni была получена ее оптимальная геометрия, которая хорошо согласуется с установленной экспериментально (табл. 1) [10].

Далее, с помощью суперячейки Mg_2Ni, смоделированной из оптимальной геометрии элементарной ячейки, было найдено наиболее выгодное сорбционное положение атома водорода (рис. 1, табл. 2).

Экспериментальные значения длины связи Ni-H в НТ-Mg_2NiH_4 колеблются в области 1,519–1,572 Å [25], согласно теоретическим работам – в интервале 1,537–1,579 Å [11]. Сравнивая эти данные с полученными нами (табл. 2), можно сделать вывод о том, что атом водорода изначально стремиться занять оптимальные положения 2 и 3 на рис. 1, соответствующие тетраэдрической конфигурации комплекса NiH_4, так как именно эти положения являются выгодными. В остальных трех положениях (1, 4, 5) на рис. 1, атом водорода находится либо слишком близко к атому никеля, либо, наоборот, далеко, что в свою очередь негативно сказывается на энергетике системы. Этот факт можно объяснить наличием дополнительных сил (отталкивания/притяжения), действующих на атом водорода.

Для более детального изучения механизма сорбции внутри интерметаллического соединения Mg_2Ni в процессе его полного наводороживания были рассмотрены структуры с двумя и четырьмя атомами водорода, сорбированных в наиболее выгодных положениях (табл. 3, рис. 2).

Для структуры с четырьмя сорбированными атомами водорода была рассчитаны три конфигурации, в которых атомы достаточно разнесены и максимально приближены к тетраэдрическому расположению. Это было вызвано тем, что среди систем Mg_2NiH_2 стабильнее оказались структуры, где расстояние между атомами водорода $D_{H\text{-}H}$ превышает 2,0 Å, что соответствует экспериментальным данным $D_{H\text{-}H}$ = 2,4 Å [26] (табл. 3) и что можно объяснить уменьшением электростатического отталкивания между атомами водорода.

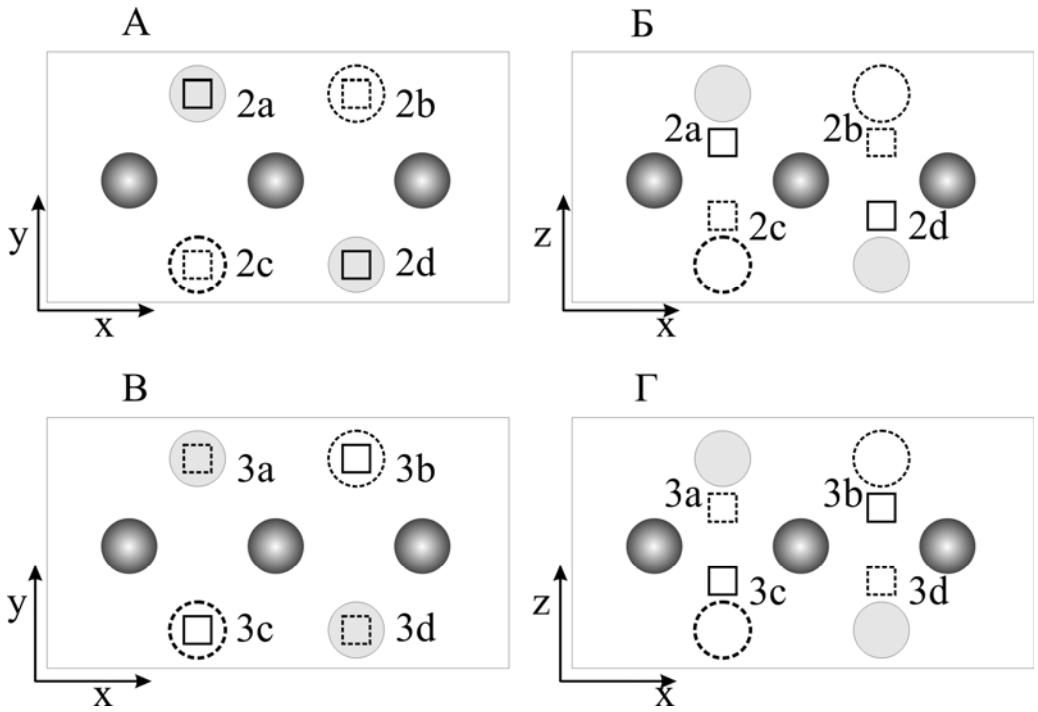


Рис. 2. Сорбционные положения атома водорода в Mg_2NiH_2:
А – вид сверху для положения 2; Б – вид сбоку для положения 2; В – вид сверху для положения 3, – вид сбоку для положения 3 (серые сферы соответствуют атомам Ni, квадраты – атомам H, круги – атомам Mg, пунктирной линией обозначены атомы слоя, расположенного под слоем никеля, сплошной линией – над слоем никеля)

Таблица 4

Значения величин потенциального барьера перехода в зависимости от пути миграции атома водорода

Начальное и конечное положения водорода	Потенциальный барьер перехода, эВ	
	в прямом направлении	в обратном направлении
4–3	0,08	0,59
1-3	0,03	0,51
3a–2a	0,02	0,03
3a–2c	0,05	0,05
3b–2a	0,33	0,33

При этом величины углов H-Ni-H (119º, 111,9º) в данных системах Mg_2NiH_2 близки к экспериментальным значениям (103,4º и 119,3º) [25] и полученным ранее теоретическим значениям (107,8º и 111,3º) [11]. Следует обратить внимание на то, что энергия образования рассматриваемых систем Mg_2NiH_x (x = 1–4) очень зависит от структуры системы. Поскольку, несмотря на энергетическую стабильность положений 3a, 3d; 3a, 3b; 3b, 3d атома водорода в Mg_2NiH_2, структура Mg_2NiH_4, где атомы водорода находятся в положениях 3a, 3b, 3c, 3d, является неустойчивой. Это можно объяснить как изменением расстояний и углов (табл. 3) между атомами водорода, так и тем, что некоторые атомы водорода находятся очень близко друг к другу (D_{H-H} = 1,82–1,86 Å).

Также нами был изучен процесс диффузии атома водорода в исследуемом материале Mg_2NiH, т. е. на первой стадии гидрирования интерметаллида Mg_2Ni. Были рассмотрены несколько возможных путей миграции одиночного атома водорода в структуре (табл. 4). Согласно проведенным расчетам большинство величин потенциальных барьеров очень малы. Следовательно, атом водорода будет свободно перемещаться в объеме Mg_2Ni.

В ходе работы с помощью DFT расчетов были определены наиболее выгодные положения для адсорбирования атомов водорода в объемном интерметаллиде Mg_2Ni. Были вычислены энергии абсорбирования атомов водорода внутри набора рассматриваемых систем Mg_2NiH_x (x = 1–4), которые сильно зависят от структуры соединения потому, что атомы водорода стремятся образовать с атомом никеля правильный тетраэдрический комплекс. Исследование процесса диффузии одиночных атомов водорода в объеме Mg_2Ni показало, что потенциальные барьеры для миграции атома H очень малы, что свидетельствует о свободном его перемещении. Следовательно, из полученных данных можно сделать вывод о перспективности применения Mg_2Ni в качестве материала для хранения водорода.

Авторы выражают благодарность Институту компьютерного моделирования СО РАН (Красноярск),

Межведомственному суперкомпьютерному центру РАН (Москва), компьютерному центру СФУ, а также НИВЦ МГУ Лаборатории параллельных информационных технологий (система СКИФ МГУ «Чебышев») за предоставление возможности использовать вычислительные кластеры, на которых были проведены все расчеты.

Библиографические ссылки

1. Sandrock G. J. A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view // Alloys and Compounds. 1999. Vol. 293–295. P. 877.

2. Семененко К. Н., Вербецкий В. Н., Кочуков А. В. Взаимодействие с водородом сплавов системы магний-лантан // Доклады Ан СССР. 1981. № 258. С. 362.

3. Вербецкий В. Н., Митрохин С. В. Гидриды интерметаллических соединений – синтез, свойства и применение для аккумулирования водорода // Альтернативная энергетика и экология. 2005. № 10. С. 41.

4. Ronnebro E., Nore´us D. A new ternary magnesium–titanium hydride Mg_7TiH_x with hydrogen desorption properties better than both binary magnesium and titanium hydrides // Alloys and Compounds. 2004. Vol. 228. P. 115.

5. Dantzer P. Metal-hydride technology: a critical review// Topics in Applied Physics, Hydrogen in Metals III. Berlin: Springer. 1997. Vol. 73. P. 279.

6. Gupta M., Shlapbach L. Electronic properties of metal hydrides // Topics in Applied Physics, Hydrogen in Intermetallic Compounds. Berlin: Springer. 1988. Vol. 63. P. 139.

7. Reilly J. J., Wiswall R. H. Reaction of hydrogen with alloys of magnesium and nickel and the formation of Mg_2NiH_4 // Inorg. Chem. 1968. Vol. 7. P. 2254.

8. Yvon K., Schefer J., Stucki F. Structural studies of hydrogen storage material Mg_2NiH_4. Cubic high-temperature structure // Inorg. Chem. 1981. Vol. 20. P. 2776.

9. Gupta M., Belin E. Louis Schlapbach Density of occupied states of intermetallic hydride $NiMg_2H_4$ // Less-Common Met. 1984. Vol. 103. P.3 89.

10. Structural studies of the hydrogen storage material magnesium nickel hydride (Mg_2NiH_4). Monoclinic low-temperature structure / P. Zolliker [et al.] // Inorg. Chem. 1986. Vol. 25. P. 3590.

11. Myers W. R., Wang L-W., Richardson T. J., Rubin M. D. Calculation of thermodynamic, electronic, and optical properties of monoclinic Mg_2NiH_4 // Appl. Phys. 2002. Vol. 91. P. 4879.

12. Haussermann U., Blomqvist H., Noréus D. Bonding and Stability of the Hydrogen Storage Material Mg_2NiH_4 // Inorg. Chem. 2002. Vol. 41. P. 3684.

13. A theoretical study of the electronic structure and bonding of the monoclinic phase of Mg_2NiH_4 / P. V. Jasen [et al.] // Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32. P. 4943.

14. First-principles investigation of Mg_2Ni phase and high/low temperature Mg2NiH4 complex hydrides / J. Zhang [et al.] // Physics and Chemistry of Solids. 2009. Vol. 70. P. 32.

15. Züttel A. Materials for hydrogen storage // Materials Today. 2003. Vol. 9 P. 24.

16. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular dynamics for liquid metals // Phys. Rev. 1993. Vol. B47. P. 558.

17. Kresse G., Hafner J. Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal–amorphous-semiconductor transition in germanium // Phys. Rev. 1994. Vol. B49. P. 14251.

18. Kresse G., Furthműller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set // Phys. Rev. 1996. Vol. B54. P. 11169.

19. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // Phys. Rev. 1964. Vol. 136. P. 864.

20. Kohn W., Sham L.J . Self-consistent equations including exchange and correlation effects // Phys. Rev. 1965. Vol. 140. P. 1133.

21. Blöchl P. E. Projector augmented-wave method // Phys. Rev. B 1994. Vol. 50. P. 17953.

22. Kresse G., Joubert J. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented wave metho // Phys. Rev. 1999. Vol. 59. P. 1758.

23. Grimme S. Semiempirical GGA-type density functional constructed with a long-range dispersion correction // Comp. Chem. 2006. Vol. 27. P. 1787.

24. Monkhorst H. J., Pack J. D. Special points for Brillouin-zone integrations // Phys. Rev. 1976. Vol. B13. P. 5188.

25. Etude structurale du systeme Mg_2NiH_2 I – La solution solide Mg_2NiH_x (x = 0,30) / J. L. Soubeyroux [et al.] // Materials Research Bulletin. 1984. Vol. 19. P. 895.

26. Yvon K. Complex Transition-Metal Hydrides // Chimia 1998. Vol. 10. P. 613.

N. S. Eliseeva, A. A. Kuzubov, P. O. Krasnov, A. S. Fedorov, A. O. Lykhin

THEORETICAL STUDY OF SORPTION AND DIFFUSION OF HYDROGEN IN INTERMETALLIC COMPOUND Mg_2Ni

In this report we present theoretical study of intermetallic compound Mg_2Ni as a promising material for hydrogen absorbtion. Processes of hydrogen sorption and diffusion in the bulk of this material are investigated. The influence of Mg_2NiH_x *structure features on sorption energy of hydrogen atoms is studied.*

Keywords: sorption, diffusion, hydrogen energy, Mg_2Ni, density functional theory (DFT).

© Елисеева Н. С., Кузубов А. А., Краснов П. О., Федоров А. С., Лыхин А. О., 2012

УДК 537.6; 537.9

Е. В. Еремин, Д. А. Смоляков, Р. М. Федорищев, А. О. Густайцев, И. А. Бондарев

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОВЕДЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ $Pb_3Mn_7O_{15}$, ДОПИРОВАННЫХ ИОНАМИ Fe, Ga, Ge*

Методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве были выращены монокристаллы $Pb_3(Mn_{1-x}Fe_x)_7O_{15}$ с x = 0, x = 0,05, x = 0,1, x = 0,15, x = 0,2 и $Pb_3(Mn_{0,95}Ge_{0,05})_7O_{15}$, $Pb_3(Mn_{0,95}Ga_{0,05})_7O_{15}$. Исследованы их структура и магнитные свойства. Все выращенные кристаллы принадлежат к гексагональной пространственной группе $P6_3/mcm$. Обнаружено, что магнитные свойства $Pb_3Mn_7O_{15}$ сильно зависят от уровня допирования как диамагнитными ионами Ga и Ge, так и парамагнитными ионами Fe. Было обнаружено разрушение трехмерного магнитного упорядочения при допировании ионами Ga и ионами Fe в количестве x > 0,1.

Ключевые слова: рост кристаллов, мультиферроики, слоистые магнитные системы.

Среди оксидных соединений манганиты с переменной валентностью марганца продолжают оставаться интересными и привлекательными объектами для исследования на протяжении не одного десятка лет. Богатый набор физических свойств, вызванный взаимным влиянием зарядовыми, спиновыми и орбитальными степенями свободы, достаточно доступная возможность управлять их физическими свойствами делают эти материалы многообещающими объектами как для фундаментальных исследований, так и для широкого практического применения.

Систематическому исследованию в основном подвергнуты манганиты с перовскитоподобной структурой $R_{1-x}A_xMnO_3$ (R – редкая земля, A – Ca, Sr, Ba, Pb и др.). В структуре перовскита Mn^{3+} и Mn^{4+} катионы находятся в октаэдрах, которые соединены между собой вершинами. Это обстоятельство играет ключевую роль в картине обменных взаимодействий.

Разнообразие необычных физических явлений, наблюдаемых в примесных перовскитоподобных манганитах, механизмы которых во многом остаются непонятыми, стимулируют активный поиск и изучение других семейств оксидов, содержащих ионы марганца в смешанном валентном состоянии, но не обладающих перовскитоподобной структурой.

Одним из таких перспективных объектов является манганит $Pb_3Mn_7O_{15}$, который изначально содержит ионы марганца различной валентности. Обладая одновременно и магнитным порядком и антисегнетоэлектрической фазой он может дать дополнительную информацию о механизмах магнитоэлектрического взаимодействия.

Ранее были исследованы структурные [1], магнитные [2], калорические [3] транспортные и диэлектрические [4] свойства номинально чистого кристалла $Pb_3Mn_7O_{15}$. Было установлено, что при комнатной температуре он принадлежит к ромбической сингонии и обладает пространственной группой *Pnma*. А при нагревании орторомбическая структура *Pnma* трансформируется сначала в пространственно моделированную структуру (при T_1 = 400 К), затем (при T_2 = 560 К) в гексагональную структуру $P6_3/mcm$ [5].

Для того чтобы окончательно ответить на вопрос о магнитной структуре $Pb_3Mn_7O_{15}$, нами был выращен ряд кристаллов $Pb_3Mn_7O_{15}$, допированных ионами Fe^{3+}, Ga^{3+} и Ge^{4+}. Замещая ионы марганца парамагнитными и диамагнитными ионами, можно проследить за эволюцией магнитного состояния, что несомненно даст более полную информацию о магнитной структуре этого соединения.

В настоящей работе мы представляем исследования влияния замещения ионов марганца ионами железа, галлия и германия на магнитные и структурные свойства монокристаллов $Pb_3(Mn_{1-x}Me_x)_7O_{15}$ (Me = Fe, Ga и Ge).

Монокристаллы $Pb_3(Mn_{1-x}Me_x)_7O_{15}$ (Me = Fe, Ga и Ge) были выращены методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве. Выращенные кристаллы имели форму гексагональных пластинок черного цвета с «диаметром», достигающим 40 мм, и толщиной ~ 1 мм. Рентгенографические исследования кристаллов показали, что они кристаллизуются в гексагональной сингонии, пространственная группа $P6_3/mcm$. На элементарную ячейку приходится четыре формульные единицы. Кристаллическая структура $Pb_3Mn_7O_{15}$ оказалась изоморфной структуре минерала $Pb_3(Fe, Mn)_4Mn_3O_{15}$, известному как зензинит, она имеет ярко выраженный слоистый характер, и этот факт оказывает сильное влияние на ряд физических свойств. Каждый ион марганца находится в октаэдрическом окружении ионов кислорода. Ионы марганца Mn^{3+} (Fe^{3+}, Ga^{3+}) и Mn^{4+} (Ge^{4+}) содержатся в кристалле в соотношении 4:3 и распределены по неэквивалентным позициям – Me1(12i), Me(6f) и Me(2d), находятся в плоскостях, которые соединены «столбиками», состоящими из двух кислородных октаэдров, образующих позицию Me(8h) (здесь Me = Mn, Fe, Ge или Ga). Мессбауэровские измерения, проведенные на $Pb_3(Mn_{1-x}Fe_x)_7O_{15}$ с x = 0,05 и x = 0,15, показали, что ионы железа входят в матрицу кристалла только в трехвалентном состоянии. Из кристаллографических и рентгеновских данных следует, что ионы железа замещают в основном ионы марганца в позициях Me2(8h) и Me3(6f) и незначительно в позициях Mn1(12i).

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8365.

Поэтому мы предположили, что эти позиции должны содержать ионы Mn^{3+}. Наличие янтейлеровских ионов Mn^{3+} в этих позициях должно приводить к искажению кислородных октаэдров, в которых находятся эти ионы, что в принципе и наблюдается по кристаллографическим данным. И напротив, практически идеальный кислородный октаэдр позиции Mn4(2d) должен содержать ионы Mn^{4+}. Используя эмпирический метод «bond valence sums» [6], мы предложили следующую модель: позиции Mn1(12i) и Mn3(6f) содержат как ионы Mn^{3+}, так и ионы Mn^{4+}; наиболее сильно искаженный кислородный октаэдр позиции Mn2(8h) целиком содержит ионы Mn^{3+} и позиция Mn4(2d), обладающая идеальным кислородным октаэдром, целиком содержит ионы Mn^{4+}.

Намагниченности, измеренные на монокристаллах $Pb_3(Mn_{1-x}Fe_x)_7O_{15}$ при направлении магнитного поля вдоль плоскости кристалла зависят от температуры (рис. 1). Для образцов с x = 0 низкотемпературное поведение намагниченности и изотермические кривые до 80 кЭ при разных направлениях магнитного поля относительно кристаллографических осей приведены и подробно описаны в работе [3].

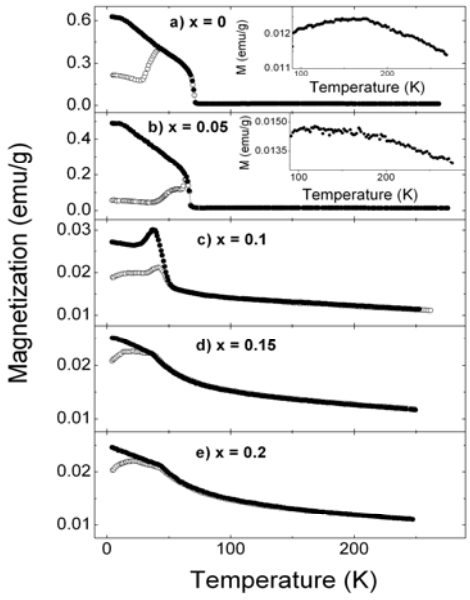


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности $Pb_3(Mn_{1-x}Fe_x)_7O_{15}$ в магнитном поле 500 Э, приложенном в плоскости кристалла

При понижении температуры в районе T_1 = 160 К на кривой температурной зависимости намагниченности наблюдается небольшой сильно уширенный пик (рис. 1, *а*). Природа данной аномалии все еще остается до конца невыясненной, скорее всего она связана с возникновением кластерного упорядочения. При дальнейшем понижении температуры при T_2 = 70 К в системе возникает дальний магнитный порядок со слабым спонтанным ферромагнитным моментом, лежащим в плоскости кристалла, который, вероятно, вызван неколлинеарностью магнитных подрешеток. При T_3 = 25 К, по-видимому, имеет место спин-переориентационный переход. Допирование $Pb_3Mn_7O_{15}$ ионами Fe в малых концентрациях (x = 0,05) приводит к тому что, величина намагниченности и температура Нееля T_N уменьшаются незначительно, при этом широкий пик при T_1 = 160 К становится более размытым и менее четким (рис. 1, *б*). При дальнейшем увеличении x кардинальным образом изменяется вид кривых намагниченности (рис. 1, *в*, 1, *г* и 1, *д*) – исчезает широкий пик при T_1 = 160 К, дальний магнитный порядок не возникает, и температурные зависимости намагниченности с $x \geq 0,1$ проявляют при низких температурах признаки спинового стекла, с характерной дивергенцией намагниченности при различных режимах охлаждения образца (в магнитном поле или без поля).

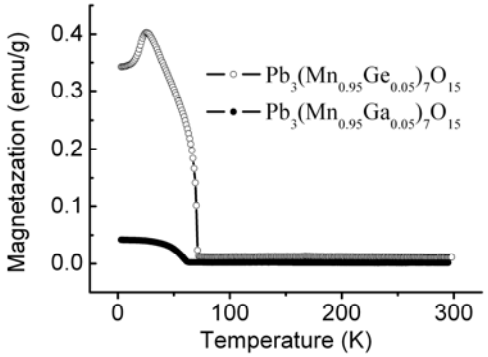


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности $Pb_3(Mn_{0.95}Ge_{0.05})_7O_{15}$ и $Pb_3(Mn_{0.95}Ga_{0.05})_7O_{15}$ в магнитном поле 500 Э, приложенном в плоскости кристалла

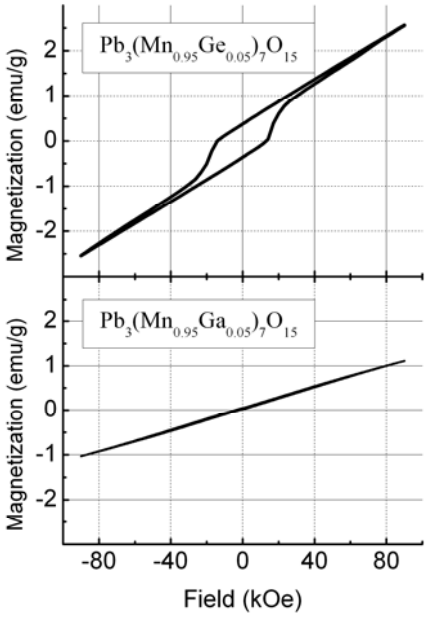


Рис. 3. Полевые зависимости намагниченности $Pb_3(Mn_{0.95}Ge_{0.05})_7O_{15}$ и $Pb_3(Mn_{0.95}Ga_{0.05})_7O_{15}$ в магнитном поле, приложенном в плоскости кристалла и температуре 4,2 К

Температурные зависимости намагниченности для $Pb_3(Mn_{0.95}Ge_{0.05})_7O_{15}$ и $Pb_3(Mn_{0.95}Ga_{0.05})_7O_{15}$, снятые в магнитном поле H = 500 Э при направлении магнитного поля вдоль плоскости кристалла представлены на рис. 2. Видно, что наибольшее влияние на магнитное состояние оказывают трехвалентные ионы Ga^{3+}. Температура Нееля T_N = 64 К (в противоположность T_N = 72 К для допирования германием), магнитный момент уменьшился на порядок, исчез уширенный пик при T = 160 К. Кроме того, измерения полевых зависимостей при T = 2 К (рис. 3), показывают, что магнитное состояние для $Pb_3Mn_7O_{15}$, допированное ионами Ge^{4+}, практически не отличается от номинально чистого $Pb_3Mn_7O_{15}$: наблюдается всего лишь уменьшение магнитного момента, вызванное обычным диамагнитным разбавлением. Для $Pb_3Mn_7O_{15}$, допированного ионами Ga^{3+}, ситуация меняется кардинальным образом, гистерезис в том виде, в котором наблюдался, отсутствует, и ситуация становится похожа на ту, которая наблюдается для $Pb_3(Mn_{1-x}Fe_x)_7O_{15}$ с x > 0,1. Наибольшее влияние на магнитный порядок можно оказать, заменив магнитные ионы диамагнитными в «столбиках», соединяющих ферримагнитно упорядоченные плоскости, а значит, по-нашему мнению, в этих позициях должен находиться трехвалентный марганец.

В заключении можно отметить, что методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве были выращены монокристаллы $Pb_3(Mn_{1-x}Me_x)_7O_{15}$ (Me = Fe, Ga и Ge). Рентгеноструктурные исследования показали, что все монокристаллы принадлежат к гексагональной пространственной группе Pb_3/mcm. Исследования, проведенные с помощью эффекта Мессбауэра, показали, что ионы железа входят в трехвалентное состояние Fe^{3+}. Магнитные свойства $Pb_3(Mn_{1-x}Fe_x)_7O_{15}$ существенно зависят от уровня допирования ионами железа. Так, при малом допировании x = 0,05 вид температурной зависимости намагниченности качественно не изменился. Наблюдаются лишь небольшое уменьшение намагниченности по сравнению с $Pb_3Mn_7O_{15}$ при одном и том же внешнем магнитном поле и уменьшение температуры Нееля T_N. Ситуация меняется кардинальным образом при уровне допирования начиная с x = 0,1. Исчезает широкий пик при T_1 = 160 К, дальний магнитный порядок не возникает, и температурные зависимости намагниченности с $x \geq 0,1$ проявляют при низких температурах признаки спинового стекла с характерной дивергенцией намагниченности при различных режимах охлаждения образца (в магнитном поле или без поля).

Библиографические ссылки

1. Structural properties of $Pb_3Mn_7O_{15}$ determined from high-resolution synchrotron power diffraction / J.C.E. Rash [et al.] // Sol. St. Chem. Vol. 182. 2009. P. 1188–1192.

2. Magnetic properties of the mixed-valence manganese oxide $Pb_3Mn_7O_{15}$ / N. V. Volkov [et al.] // Phys.: Condens. Matter. Vol. 20. 2008. P. 055217.

3. Heat Capacity of a Mixed-Valence Manganese Oxide $Pb_3Mn_7O_{15}$ / N. V. Volkov [et al.] // Phys.: Condens. Matter. Vol. 20. 2008. P. 445214 (5pp).

4. Dielectric properties of a mixed-valence $Pb_3Mn_7O_{15}$ manganese oxide / N. V. Volkov [et al.] // Phys.: Condens. Matter. Vol. 22. 2008. P. 375901(6 pp).

5. Temperature-dependent features of $Pb_3Mn_7O_{15}$ crystal structure / N V Volkov [et al.] // Phys. 2012. Vol. 407. P. 689.

6. Simon A. J. Kimber. Charge and orbital order in frustrated $Pb_3Mn_7O_{15}$ // Phys.: Condens. Matter. 2012. Vol. 24. P. 186002.

E. V. Eremin, D. A. Smolyakov, R. M. Fedorischev, A. O. Gustaytsev, I. A. Bondarev

PECULIARITIES OF MAGNETIC BEHAVIOR OF CRYSTALS $Pb_3Mn_7O_{15}$ DOPED BY Fe, Ga, Ge IONS

Structure and magnetic properties of $Pb_3(Mn_{1-x}Fe_x)_7O_{15}$ with x = 0, x = 0.05, x = 0.1, x = 0.15 and x = 0.2 and $Pb_3(Mn_{0.95}Ge_{0.05})_7O_{15}$, $Pb_3(Mn_{0.95}Ga_{0.05})_7O_{15}$ single crystals, grown by spontaneous crystallization from solution in melt, are investigated. All grown crystals belong to the hexagonal space group $P6_3/mcm$. The magnetic properties appeared to be heavily dependent on the level of doping by diamagnetic Ga and Ge ions, as well as by paramagnetic Fe ions. The authors show also the revealed destruction of 3-D magnetic ordering during doping by Ga ions and by Fe ions in the quantity of x > 0.1.

Keywords: crystal growth, multiferroics, layered magnetic systems.

© Еремин Е. В., Смоляков Д. А., Федорищев Р. М., Густайцев А. О., Бондарев И. А., 2012

УДК 538.913

В. И. Зиненко, М. С. Павловский, А. С. Крылов

ДИНАМИКА РЕШЕТКИ КРИСТАЛЛА $HoFe_3B_4O_{12}$*

Методом Рамановской спектроскопии были определены частоты колебания кристаллической решетки в центре зоны Бриллюэна. В рамках метода функционала плотности вычислены частоты колебания решетки, упругие модули, высокочастотная диэлектрическая проницаемость. Получена температурная зависимость решеточной теплоемкости.

Ключевые слова: динамика решетки.

Монокристаллы редкоземельных ферроборатов со структурой хантита в последние годы привлекают большое внимание, в первую очередь, как лазерные среды с однопозиционным распределением активных ионов.

В начале этого тысячелетия в кристаллах ферроборатов была обнаружена достаточно большая магнитоэлектрическая поляризация [1–3] и сильный магнитоэлектрический эффект [4]. Таким образом, эти соединения вызвают немалый интерес как объекты для изучения механизма формирования магнитоэлектрического взаимодействия и возможностей электрического управления локальным магнитным состоянием в структурах с квазиодномерным распределением магнитных катионов.

Исследование поляризованных спектров комбинационного рассеяния света было проведено при комнатной температуре (295 К) на спектрометре Horiba Jobin Yvon T64000 в геометрии рассеяния 90º. Спектрометр работал в режиме вычитания дисперсии со спектральным разрешением по входной щели 2 $см^{-1}$.

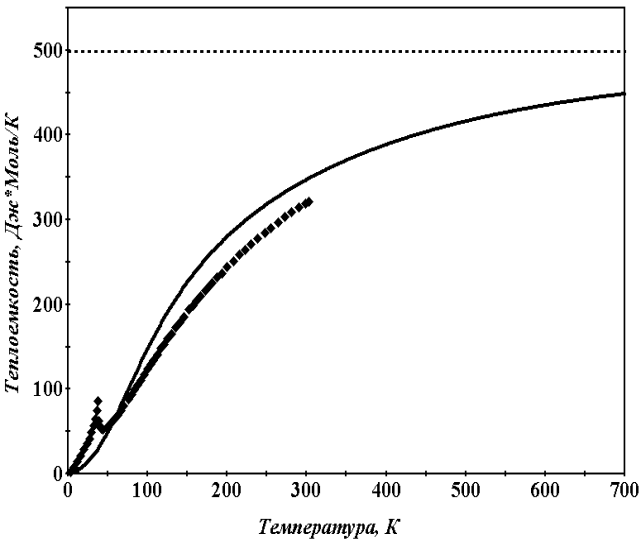
Для возбуждения спектра рассеяния использовался Ar^+-лазер (длина волны $\lambda = 514$ nm). Мощность излучения – 80 mW на образце, что соответствует плотности лазерного излучения 250 W/cm^2. Полученные частоты приведены в таблице.

Расчет динамики решетки, высокочастотной диэлектрической проницаемости и упругих свойств проведен в рамках неэмпирической модели ионного кристалла с учетом дипольной и квадрупольной поляризуемостей ионов.

Детали модели рассмотрены в работе [5]. Все расчеты сделаны с помощью экспериментальных значений параметров решетки. Для вычисленных частот проведена классификация по неприводимым представлениям.

В центре зоны Бриллюэна имеется 57 оптических мод и колебательное представление имеет вид $7A_1 + 12A_2 + 19E$ и, соответственно, 3 акустических моды $A_2 + E$. Не все моды центра зоны удалось получить экспериментально и классифицировать, поэтому прямого сравнения с рассчитанными данными провести не представляется возможным, однако, из таблицы можно видеть, что, вычисленные частоты, близкие по величине к экспериментальным, присутствуют.

Отличные от нуля компоненты тензора диэлектрической проницаемости составили следующие значения: $\varepsilon_{xx} = 4{,}02, \varepsilon_{yy} = 4{,}02, \varepsilon_{zz} = 2{,}82$, полученные значения модулей упругости – $C_{11} = 357$ ГПа, $C_{12} = 120$ ГПа, $C_{13} = 69$ ГПа, $C_{33} = 162$ ГПа, $C_{14} = 29$ ГПа, $C_{44} = 65$ ГПа.



Температурная зависимость решеточной теплоемкости (сплошная линия), экспериментальная кривая теплоемкости (ромбики), закон Дюлонга-Пти (прерывистая линия)

На основе расчета динамики кристаллической решетки была вычислена плотность фононных состояний и получена температурная зависимость решеточной теплоемкости (см. рисунок). Экспериментальная кривая теплоемкости рассматриваемого соединения, получена в работе [6].

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8365.

Частоты ($см^{-1}$) колебания решетки кристалла $HoFe_3B_4O_{12}$.

Эксперимент Раман	Расчет		
	A1	A2	E
11	151	59	31
84	253	131	133
122	353	174	171
160	452	204	203
181	784	218	222
199	807	224	238
229	1246	278	249
271		288	267
315		446	283
351		606	332
392		666	338
446		1283	426
474			443
590			465
634			665
675			795
737			1192
995			1247
1237			1305
1405			

Библиографические ссылки

1. Magnetoelectric interactions in rare-earth ferroborates / A. M. Kadomtseva, A. K. Zvezdin, A. P. Pyatakov et al. // Experimental and Theoretical Physics. 2007. Vol. 105. № 1. P. 116–119.

2. Mfgnetoelectric effect and spontaneous polarization in HoFe3(BO3)4 and Ho0,5Nd0.5Fe3(BO3)4 / R. P. Chaudhury, F. Yen. Lorenz B. et al. // Phys. Rev. B 80 (2009). 104424

3. Магнитоэлектрические и магнитиоупругие свойства редкоземельных ферроборатов / М. Кадомцева, Ю. Ф. Попов, Г. П. Воробьев и др. // Физика низких температур. 2010. № 6 (36). 640 с.

4. Magnetoelectricity in the system RA13(BO3)4 (R = Tb, Ho, Er, Tm / K.-C. Liang, R. P. Chaudhury, B. Lorenz et al. // Abstract of Low Temperature Conf. 2011. Benijne, China. CO234.

5. Максимов Е. Г., Зиненко В. И., Замкова Н. Г. Расчеты физических свойств ионных кристаллов из первых принципов // УФН. 2004. Т. 174, 11. 1145.

6. Low-temperature magnetic phase diagram of HoFe3(BO3)4 holmium ferroborate: a magnetic and heat capacity study / A. Pankrats1, G. Petrakovskii1, A. Kartashev et al. // Phys.Condens. Matter. 2009. № 21. P. 436001.

V. I. Zinenko, M. S. Pavlovskiy, A. S. Krylov

LATTICE DYNAMICS OF CRYSTAL $HoFe_3B_4O_{12}$

Crystal lattice vibrational frequencies in the center of the Brillouin zone have been determined with the Raman spectroscopy method. The lattice vibrational frequencies, elastic modulus, high frequency dielectric constant and temperature dependence of the lattice heat capacity have been calculated with the use of density functional method.

Keywords: lattice dynamics.

© Зиненко В. И., Павловский М. С., Крылов А. С., 2012

УДК 536.6

А. В. Карташев, Е. В. Богданов, Е. И. Погорельцев, Ю. В. Герасимова

ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА, МАГНЕТО- И БАРОКАЛОРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТЫ В КРИСТАЛЛЕ $La_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$*

Исследованы теплоемкости теплового расширения интенсивного магнетокалорического эффекта, а также исследованы восприимчивость к внешнему гидростатическому давлению кристалла $La_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$. Экспериментальные результаты проанализированы в рамках мегнетокалорической и барокалорической эффективности манганитов в окрестности ферромагнитного фазового перехода.

Ключевые слова: манганиты, магнитные фазовые переходы, теплоемкость, тепловое расширение, магнетокалорические и барокалорические эффекты.

Среди магнитных веществ семейство манганитов является одним из самых популярных объектов для исследований фазовых переходов, магнитоэлектрического взаимодействия, магнетокалорического эффекта (МКЭ) и других интересных и важных физических явлений. Тепловые свойства манганитов не были изучены так интенсивно. Например, нам не известны данные о тепловом расширении и фазовой диаграмме температуры-давления. Однако много работ посвящено исследованиям МКЭ [1–3]. Как правило, вместо прямых измерений, значения экстенсивного $\Delta S_{МКЭ}$ и интенсивного $\Delta T^{МКЭ}_{AD}$ МКЭ были определены из анализа температурной зависимости намагниченности M(T) [1; 4]:

$$\Delta S_{\mathrm{MCE}} = \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{p,H} dH; \qquad (1)$$

$$\Delta T_{\mathrm{AD}}^{\mathrm{MCE}} = -\frac{T}{C_{p,H}} \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_{p,H} dH. \qquad (2)$$

Прямые измерения интенсивного МКЭ проводились очень редко [5; 6], хотя известно, что наиболее правильным и надежным способом определения реальных значений интенсивного теплового эффекта является проведение прямых измерений ΔT_{AD} с помощью адиабатического калориметра. Недавно нами были успешно выполнены такие исследования на некоторых сегнетоэлектриках [7; 8] и довольно сложных твердых растворах $(La_{1-y}Eu_y)_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$ (y: 0,2; 0,6) [9; 10].

Особый интерес представляет изучение различных калорических эффектов и повышение эффективности материала путем одновременного использования различных внешних полей. Лишь несколько работ посвящено одновременному изучению барокалорического эффекта (БКЭ) и МКЭ в одном и том же магнитном материале, в частности Ni-Mn-In, испытывающем ферромагнитный фазовый переход в узком диапазоне температур [11; 12].

Несмотря на то, что многие из твердых растворов были созданы на основе $La_{0,7}Me_{0,3}MnO_3$ (Me: Pb, Ca, Sr), информации об их теплофизических свойствах недостаточно. По данным рентгеновского исследования, при комнатной температуре [13], $La_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$ (LPM) характеризуется ромбоэдрической симметрией (пр. гр. R-3c). Фазовый переход между парамагнитной и ферромагнитной фазой был обнаружен при $T_0 = 353$ К. Ранее, $\Delta S_{МКЭ}$ и $\Delta T^{МКЭ}$ в $La_{1-x}Pb_xMnO_3$ (x: 0,1, 0,2, 0,3) были оценены на порошковых образцах [5].

В работе выполнены калориметрические, дилатометрические исследования и дифференциально термический анализ (ДТА) под давлением на монокристаллических образцах LPM. На основании анализа экспериментальных данных об энтропии и фазовой диаграмме был определен БКЭ и сопоставлен с МКЭ.

Исследования теплоемкости кристаллов LPM в широком диапазоне температур от 2 до 800 К проводились двумя калориметрическими методами. Низкотемпературные исследования в области между 2 и 370 К были выполнены на PPMS. В области от 370 до 800 К теплоемкость измерялась на дифференциальном сканирующем калориметре.

Для изучения интенсивного МКЭ мы провели прямые измерения температуры при изменении магнитного поля, используя адиабатический калориметр [9]. Образец LPM, состоящий из нескольких кусочков монокристаллов, с общей массой 1,05 г, был помещен в нагреватель, который состоит из полированного алюминиевого контейнера с константановым проводом, помещенным на его внутренней поверхности. Платиновый термометр сопротивления позволял с высокой точностью отслеживать температуру системы образец-нагреватель. Разница температур между термометром и образцом контролировалась двойной медь-константановой термопарой.

Измерения интенсивного МКЭ были проведены в соответствии со следующей процедурой: сначала образец охлаждался (или нагревался) до некоторой начальной температуры. Чтобы добиться оптимального значения $|dT/dt| \le 3\times10^{-3}$ К/мин регулировалась температура образца. Включение магнитного поля H ведет к резкому росту температуры системы образец+нагреватель ΔT^{ON}_{EXP}. Затем достигается такая же температура, какая была до включения поля. Отключение магнитного поля сопровождается уменьшением температуры ΔT^{OFF}_{EXP} до ΔT^{ON}_{EXP}.

*Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., № 8379.

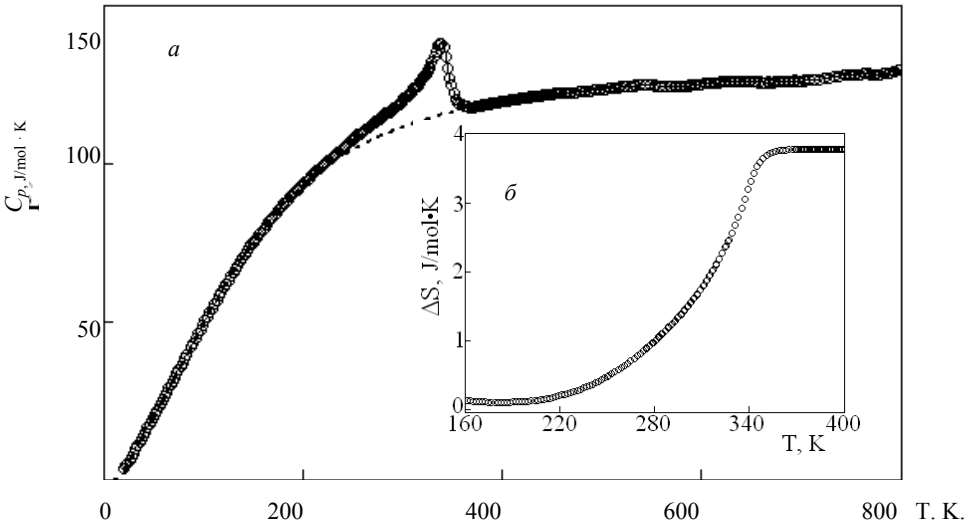


Рис. 1. Влияние гидростатического давления на фазовый переход LPM:
а – теплоемкость LPM как функция от температуры (штриховой линией показан решеточный вклад);
б – поведение энтропии фазового перехода

Температура в системе образец+нагреватель ΔT_{EXP}, полученная в экспериментах с магнитным полем, оказалось меньше, чем величина настоящего интенсивного МКЭ ($\Delta T^{МКЭ}{}_{AD}$). Причина в том, что изменение энергии образца, связанное с МКЭ, под воздействием магнитного поля в адиабатических условиях приводит к увеличению (или уменьшению) температуры как образца, так и нагревателя. Используя данные теплоемкости нагревателя Ch(T), можно определить теплоемкость образца C_S(T). Оба значения C_h(T) и CS(T), а также ΔT_{EXP} и $\Delta T^{МКЭ}{}_{AD}$ связанны следующим соотношением [9; 10]:

$$\Delta T_{AD}^{MCE} = \Delta T_{EXP}\left(1+\frac{C_h}{C_S}\right), \qquad (3)$$

которое позволяет нам получить информацию о действительном изменении температуры LPM при адиабатическом включении и выключении магнитного поля.

Измерения теплового расширения были проведены в температурном интервале 100–900 K, при помощи дилатометра NETZSCH DIL-402 C. Керамический образец в форме цилиндра (4 мм в диаметре и 5,17 мм в длину) был приготовлен из измельченных монокристаллов.

Влияние гидростатического давления на фазовый переход в LPM изучали на таком же образце, который ранее использовали для калориметрических исследований. Определяли температуру, связанную с аномалией теплоемкости, применяя дифференциальный термический анализ (ДТА). Монокристальный образец массой 0,234 г помещался в маленький медный контейнер, к которому приклеивался один из спаев медь-германиевой термопары. Второй спай приклеивался к кварцевому образцу, используемому в качестве эталонного вещества. Система помещалась во внутрь сосуда типа «пистон и цилиндр», соединенный с мультипликатором. Давление до 0,35 ГПа создавалось с помощью силиконового масла, употребляемого в качестве среды, передающей давление. Чтобы обеспечить достоверность результатов, измерения производились в циклах повышения и снижения давления (рис. 1).

Пик теплоемкости $C_p(T)$, обнаруженный при T_0 = 338,8 ± 0,5 K, согласуется с парамагнитным-ферромагнитным фазовым переходом (рис. 1, *а*).

Суммарная энтропия, связанная с ферромагнитным фазовым переходом, определена по выражению $S_0 = \int(\Delta Cp(T)/T)dT$ = 3,7 ± 0,3 Дж/моль·K. Ее температурная зависимость показана на рис. 1, *б*.

Соотношение между $\Delta T^{МКЭ}{}_{AD}$ и ΔT_{EXP}, описанное при помощи формулы (3), сохранялось при 2,1 для всех изученных полей (рис. 2). При изменениях магнитного поля от 1,1 до 5,4 kOe, во всех случаях максимальное значение $\Delta T^{МКЭ}{}_{AD}$ было получено при $T_{MAX} \approx$ 342 K (рис. 2, *а*). Соотношение (2) для интенсивного МКЭ показывает, что полученное несогласие может быть объяснено различными экстремумами функций $C_{p,H}(T)$ и $(\partial M/\partial T)_{p,H}$ [1]. Как было отмечено выше, измерения зависимости $\Delta T^{EXP}{}_{AD}$ (H) сопровождались сравнительно небольшим температурным дрифтом. Действительно, изменение температуры образца было меньше 0,07 K за 80 мин. Следовательно, можно рассматривать зависимости $\Delta T^{МКЭ}{}_{AD}(H)$ как изотермы (рис. 2, *б*). Никаких доказательств насыщения величины $\Delta T^{МКЭ}{}_{AD}$ от поля, по крайней мере в области изученных полей, нет.

БКЭ – наиболее частая эффективная характеристика всех термодинамических систем, включая твердые тела. Он определяется как адиабатное изменение

температуры $\Delta T^{\text{BCE}}_{\text{AD}}$ или изотермическое изменение энтропии ΔS_{BCE} при увеличении и уменьшении давления:

$$\Delta S_{\text{BCE}} = -\int_0^p \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p,H} dp; \quad (6)$$

$$\Delta T_{\text{AD}}^{\text{BCE}} = -\frac{T}{C_p, H}\int_0^p \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{p,H} dp. \quad (7)$$

Согласно формулам (6) и (7) оба значения зависят от теплового расширения материала и могут быть прямыми ($\Delta S_{\text{БКЭ}} < 0$, $\Delta T^{\text{БКЭ}}_{\text{AD}} > 0$) или обратными ($\Delta S_{\text{БКЭ}} > 0$, $\Delta T^{\text{БКЭ}}_{\text{AD}} < 0$) при $dp > 0$ в соответствии с положительным или отрицательным изменением объема вблизи точки фазового перехода.

Фазовая диаграмма давления-температуры для LPM была построена по результатам экспериментов в ДТА под давлением, которые обнаруживали аномалии теплоемкости, связанные фазовым переходом. Граница между парамагнитной и ферромагнитной фазазами описывается барическимо коэффициентом:

$$dT_0/dp = 1{,}75 \pm 0{,}25 \text{ K/кбар}.$$

Принимая во внимание зависимости $C_p(T)$ и $T_0(p)$, мы проанализировали БКЭ в LPM, используя подход, полученный в [14; 15], и успешно примененный для ферроэлектрических фазовых переходов второго рода [7; 8].

Основная идея этого метода в том, что на графике полной энтропии от температуры $S(T)$ аномальная энтропия ΔS смещается вдоль решеточной энтропии S_{L} с увеличением давления, на величину барического коэффициента dT_0/dp. Различие между температурами $\Delta T^{\text{БКЭ}}_{\text{AD}} = T_{p\neq0} - T_{p=0}$ и энтропиями $\Delta S_{\text{БКЭ}} = S_{p\neq0} - S_{p=0}$ под давлением и при $p = 0$, а также постоянной энтропии и давлении – это и есть, соответственно, интенсивный и экстенсивный БКЭ. Температурная зависимость $\Delta T^{\text{БКЭ}}_{\text{AD}}$ для LPM представлена на рис. 3, *а*.

Зависимость $\Delta T^{\text{БКЭ}}_{\text{AD}}$ под давлением T = const оказалась линейной (рис. 3, *б*). Так же, как и в случае $\Delta T^{\text{МКЭ}}_{\text{AD}}$ (рис. 2, *б*) интенсивный БКЭ не доходит до насыщения при увеличении внешнего давления, по крайней мере в области исследованных давлений.

Таким образом, кристаллы $La_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$, а также интенсивные МКЭ исследовали калориметрическими, дилатометрическими и ДТА-методами под давлением. Получена информация об энтропии фазового перехода и построена фазовая диаграмма темературы-давления. Интенсивные магнетокалорический и барокалорический эффекты линейно возрастают при увеличении магнитного поля и давления. LPM можно использовать как эффективный твердотельный хладагент в установках смешанного цикла на основе МКЭ и БКЭ.

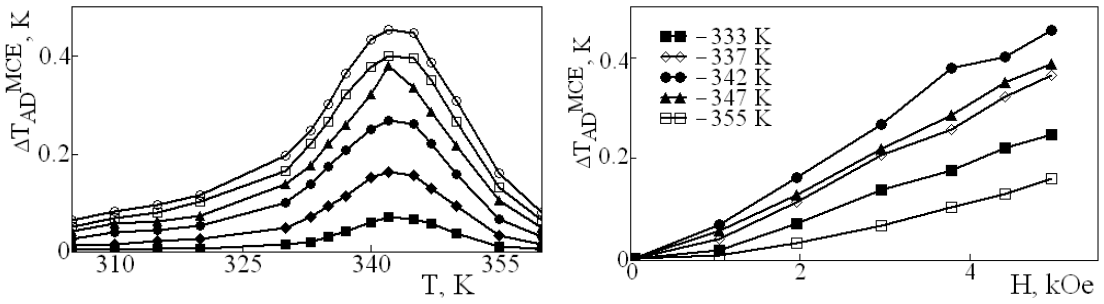


Рис. 2. Температурная зависимость интенсивного МКЭ:
а – для постоянных полей; *б* – максимальные значения $\Delta T_{\text{ad}}^{\text{МКЭ}}$ как функция поля для различных температур

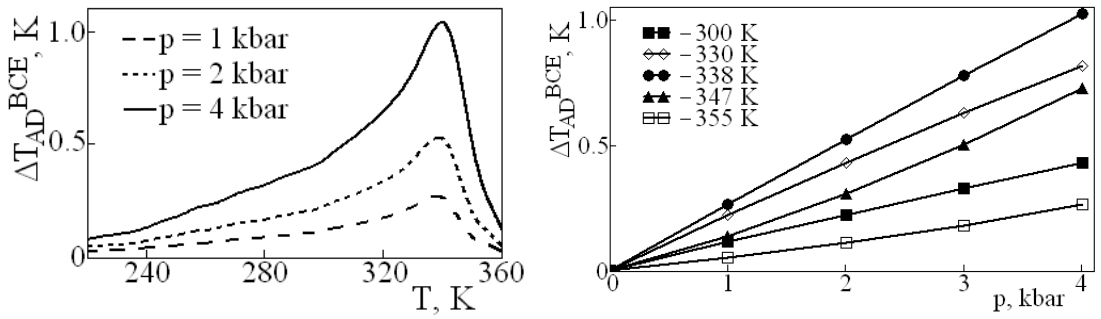


Рис. 3. Температурная зависимость интенсивного БКЭ:
а – для постоянных полей; *б* – максимальные значения $\Delta T^{\text{БКЭ}}_{\text{AD}}$ как функция давления для различных температур

Библиографические ссылки

1. Tishin A. M., Spichkin Y. I. The Magnetocaloric Effect and its Applications. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2003.

2. Large magnetocaloric effect in a $La_{0,7}Ca_{0,3}MnO_3$ single crystal / M. H. Phan, S. C. Yu, N. H. Hur et al. // Appl. Phys. 2004. V. 96. P. 1154–1159.

3. Tuning of magnetocaloric effect in a $La_{0,69}Ca_{0,31}MnO_3$ single crystal by pressure / Y. Sun, J. Kamarad, Z. Arnold et. al. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P. 102505–102508.

4. Magnetocaloric effect in $(La_{0,55}Bi_{0,15})Ca_{0,3}MnO_3$ perovskites / J. Guti´errez, J. R. Fern´andez, J. M. Barandiar´ et al. // Sensors and Actuators: A-Phys. 2007. Vol. 142. P. 549–553.

5. Magnetocaloric properties of $La_{1-x}Pb_xMnO_3$ (x = 0,1, 0,2, 0,3) compounds / S. G. Min, K. S. Kim, S. C. Yu et al // IEEE Trans. Magn. 2005. Vol. 41. P. 2760–2762.

6. Dinesen A. R., Linderoth S., Mørup S. Direct and indirect measurement of the magneto-caloric effect in $La_{0,67}Ca_{0,33-x}Sr_xMnO_{3 \pm \delta}$ // Phys.: Condens. Matter. 2005. Vol. 17. P. 6257–6260.

7. Flerov I. N., Mikhaleva E. A. Electrocaloric Effect and Anomalous Conductivity of the Ferroelectric NH_4HSO_4. // Phys. Solid State. 2008. Vol. 50. P. 478–484.

8. Фазовые переходы и калорические эффекты в сегнетоэлектрических твердых растворах гидросульфатов аммония и рубидия / Е. А. Михалева, И. Н. Флеров, В. С. Бондарев и др. // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. С. 478–484.

9. Adiabatic calorimetric study of the intense magnetocaloric effect and the heat capacity of $(La_{0,4}Eu_{0,6})_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$ / A. V. Kartashev, I. N. Flerov, N. V. Volkov, K. A. Sablina // Phys. Solid State. 2008. Vol. 50. P. 2115–2120.

10. Heat capacity and magnetocaloric effect in manganites $(La_{1-y}Euy)_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$ (y: 0,2; 0,6) / A. V. Kartashev, I. N. Flerov, N. V. Volkov, K. A. Sablina // J. of Magnetism and Magnetic Materials. 2010. Vol. 322. P. 622–627.

11. Medeiros L. G., Oliveira N. A., Troper A. Barocaloric and magnetocaloric effects in $La(Fe_{0,89}Si_{0,11})_{13}$. // Appl. Phys. 2008. Vol. 103 P. 113909–113914.

12. Giant solid-state barocaloric effect in the Ni-Mn-In magnetic shape-memory alloy / L. Ma˜nosa, D. Gonz´alez-Alons, A. Planes // Nat. Mater. 2010. Vol. 9. P. 478–481.

13. Intrinsic magnetic inhomogeneity of Eu substituted $La_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$ single crystals / N. Volkov, G. Petrakovskii, P. Boni et al. // Magnetism and Magnetic Materials. 2007. Vol. 309, Vol. 1. P. 1–6.

14. Barocaloric effect: The use of pressure for magnetic cooling in $Ce_3Pd_{20}Ge_6$ / Th. Str¨assle, A. Furrer, A. Donni, T. Komatsubara // Appl. Phys. 2002. Vol. 91. P. 8543–8546.

15. Barocaloric effect near the structural phase transition in the Rb_2KTiOF_5 oxyfluoride / M. V. Gorev, I. N. Flerov, E. V. Bogdanov et al. // Phys. Solid State. 2010. Vol. 52. P. 377–383.

A. V. Kartashev, E. V. Bogdanov, E. I. Pogoreltsev, Yu. V. Gerasimova

THERMAL PROPERTIES, MAGNETO- AND BAROCALORIC EFFECTS IN $La_{0.7}Pb_{0.3}MnO_3$ SINGLE CRYSTAL

The authors present results of investigations of heat capacity, thermal dilatation, intensive magnetocaloric effect and susceptibility to hydrostatic pressure of $La_{0.7}Pb_{0.3}MnO_3$ single crystal. Experimental data were analyzed within the frame of the magnetocaloric and barocaloric efficiency of manganites in the vicinity of ferromagnetic phase transition.

Keywords: m*anganites, magnetic phase transition, heat capacity, thermal expansion, magnetocaloric and barocaloric effects.*

© Карташев А. В., Богданов Е. В., Погорельцев Е. И., Герасимова Ю. В., 2012

УДК 629.7.017.1

А. В. Кацура, Г. Г. Крушенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЛЕНДАРНОГО ВРЕМЕНИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ БОЛТ-ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

В авиационном машиностроении для скрепления листовых конструкций летательных аппаратов (ЛА) широко применяются болт-заклепочные соединения с применением заклепок, изготовляемых из деформируемых алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: болт-заклепочное соединение, долговечность, сопротивление усталости, срок хранения.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния календарного времени на осевой натяг в заклепочных соединениях и на их остаточные усталостные характеристики с использованием образцов поперечного многоточечного двухсрезного болт-заклепочного стыкового соединения [1].

Выполнение заклепочного соединения завершается образованием замыкающих головок посредством пластического деформирования хвостовика стержня заклепки с сопутствующим обжатием собираемого пакета в местах постановки крепежа. Снятие технологической нагрузки сопровождается упругим пружинением стержня и пакета, что приводит к существенному уменьшению усилия сжатия.

Принимая во внимание механические свойства материала алюминиевых заклепок и соизмеримость жесткостей крепежа и соединяемых деталей, также можно прогнозировать ослабление с течением времени заклепочного соединения вследствие релаксации усилий сжатия [2].

Образец (рис. 1) изготовлен из двух листов, соединенных встык накладками. Пластины и накладки вырезаны вдоль проката из листа алюминиевого сплава Д16АТ толщиной 6 и 3 мм соответственно. При сборке пакета использованы болт-заклепки из стали 30ХГСА в двух вариантах исполнения. В первом варианте крепежа профиль рифленой части стержня болт-заклепок имел упорную накатку (образцы типа У), во втором – трапециевидную (образцы типа Т).

Соединение выполнено с нормированным гарантированным осевым натягом по штатной заводской технологии.

Статические испытания при осевом растяжении образцов выполнены на гидропульсаторе ГРМ-1 при скорости нагружения 4 000 кгс/мин. Усталостные испытания при циклическом растяжении проведены также на этой установке.

Величина максимальной нагрузки цикла нагружения соответствовала 30 % от средней разрушающей нагрузки каждого типа образцов при статическом растяжении ($P^{У}_{max}$ = 4 176 кгс – для образцов типа У$ $P^{Т}_{max}$ = 4 155 кгс – для образцов типа Т). Минимальная нагрузка цикла нагружения для всех типов образцов (700 кгс) выбрана по условиям стабильности режима нагружения и устойчивой работы гидропульсатора одностороннего действия вблизи нулевой нагрузки. Частота нагружения равна 330 циклов в минуту (6,6 Гц).

Градуирована испытательная машина по параметрам цикла нагружения с помощью тензометрирования. Во время испытаний до разрушения каждого образца режим нагружения контролировали по показаниям динамометров пульсатора и указателю вывода кулисы.

Исследовали влияние длительного срока хранения и термоэкспозиции на остаточную усталостную долговечность образцов.

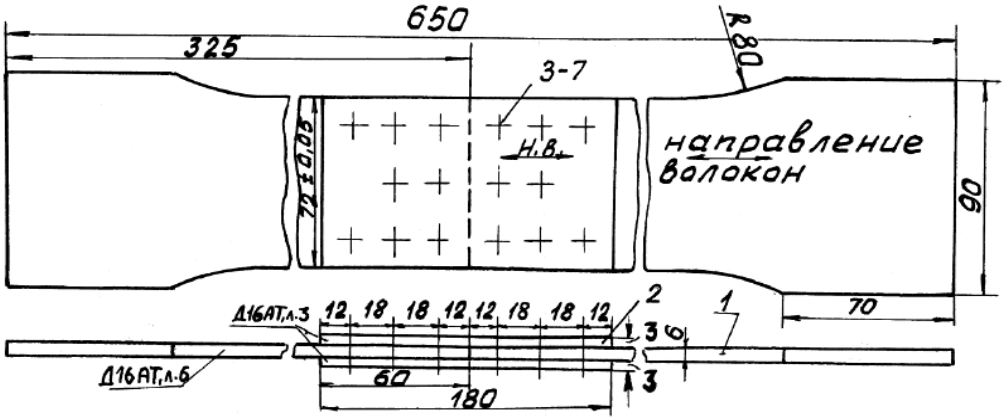


Рис. 1. Образец поперечного многоточечного двухсрезного болт-заклепочного стыкового соединения из сплава Д16АТ

Продолжительность выдержки образцов без нагрузки в лабораторных условиях при нормальной температуре составила 15 лет (131 500 ч).

После длительной эксплуатационной выдержки часть образцов перед циклическим нагружением прошла термоэкспозицию в течение 35 сут (840 ч) при температуре +120 ºС в термостате конвективного теплообмена.

Разрушили образцы в 80 % случаев по внешнему ряду болт-заклепок и только в 20 % по накладкам – внутреннему ряду.

В исходном состоянии образцы типа У по долговечности в 1,63 раза превосходят образцы типа Т. Однако в результате 15-летней выдержки этот показатель у них стал одинаковым (рис. 2). Но долговечность образцов типа У упала в 1,79 раза, или на 44 %, а образцов типа Т снизилась на 8 %, или в 1,08 раза, по сравнению с исходными образцами. Относительные долговечности следующее (см. рис. 3): $\bar{N} = N_{15}/N_0$; $\bar{N}_У = 0{,}56$; $\bar{N}_Т = 0{,}92$.

Можно предположить, что резкое снижение долговечности образцов типа У через 15 лет связано с уменьшением осевого натяга за счет снижения усилия сжатия пакета (релаксации остаточных натягов в пакете) [3].

Остаточные напряжения сжатия со временем уменьшаются, релаксируют, но временной процесс длителен, поэтому для получения быстрой качественной оценки уровня снижения напряжений проведен эксперимент с форсированным моделированием процесса релаксации посредством предварительной выдержки образцов при повышенной температуре в течение определенного периода времени с последующими испытаниями на усталость.

Термоэкспозиция образцов была проведена после 15-летней выдержки в лабораторных условиях при нормальной температуре для оценки степени релаксации осевого натяга. Результаты испытаний партии образцов, выдержанной в температурном поле при +120 ºС в течение 840 ч (термоэкспозиции), показывают (рис. 4, 5), что долговечность образцов типа У снизилась на 28 %, или в 1,37 раза по сравнению с долговечностью исходных образцов с 15-летней выдержкой, а долговечность образцов типа Т не изменилась.

Отношения среднелогарифмических значений долговечности партий образцов после термоэкспозиции и исходных после «отдыха» в нормальных лабораторных условиях в течение 15 лет показаны на рис. 6.

Учитывая, что при сборке образцов использованы болт-заклепки, выполненные из стали 30ХГСА, а элементы пакета изготовлены из алюминиевого сплава Д16АТ, можно заключить, что основная доля снижения долговечности вследствие уменьшения осевого натяга обусловлена релаксацией усилия в стержне заклепки, а не в элементах пакета в зоне постановки крепежа (рис 7). Причем причина потери выносливости образцов типа У кроется в конструктивных особенностях втулки и профиля «односторонний зуб-упор» накатки пластического замка «алюминиевая втулка – стальной стержень болт-заклепки» [4].

Анализ результатов испытаний позволяет сделать вывод о преимуществе применения в качестве крепежа болт-заклепок с трапециевидной нарезкой, по сравнению с болт-заклепкой, выполненной с упорной нарезкой профиля стержня. Осевой натяг в образцах типа Т в течение 15 лет хранения и после термоэкспозиции при 120 ºС в течение 840 ч (35 сут) не уменьшился, и запас прочности этих образцов достаточно велик, что обеспечивает стабильность усталостных характеристик соединения на весь срок эксплуатации. Однако при проектировании следует учесть заведомо более низкий исходный осевой натяг и, следовательно, более высокую податливость заклепочного шва, пониженную несущую способность и меньшую исходную долговечность соединения.

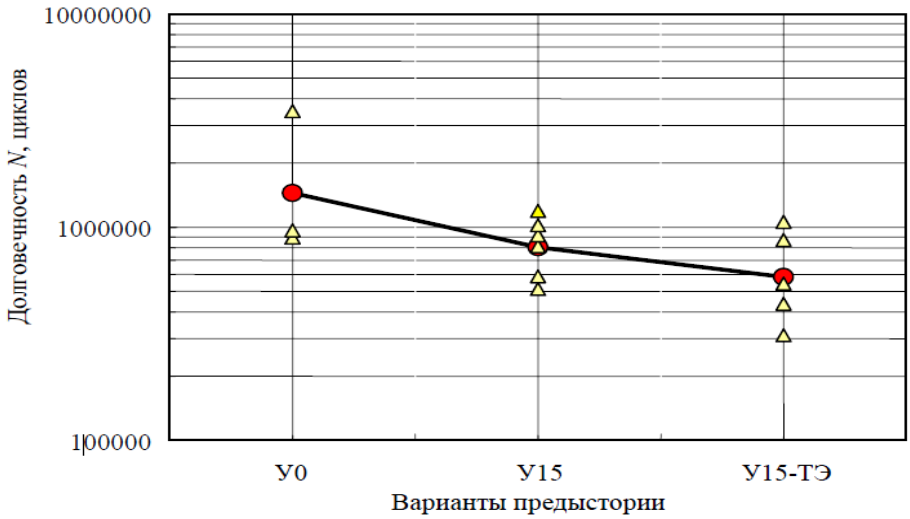


Рис. 2. Влияние «отдыха» (этапа хранения в лабораторных нормальных условиях в течение 15 лет) и последующей термоэкспозиции при T = 120 °С в течение 840 ч на усталостную долговечность образцов типа У поперечного многоточечного двухсрезного болт-заклепочного стыкового соединения, выполненного из сплава Д16АТ. Уровень нагружения К = 0,3 (f = 6,6 Гц)

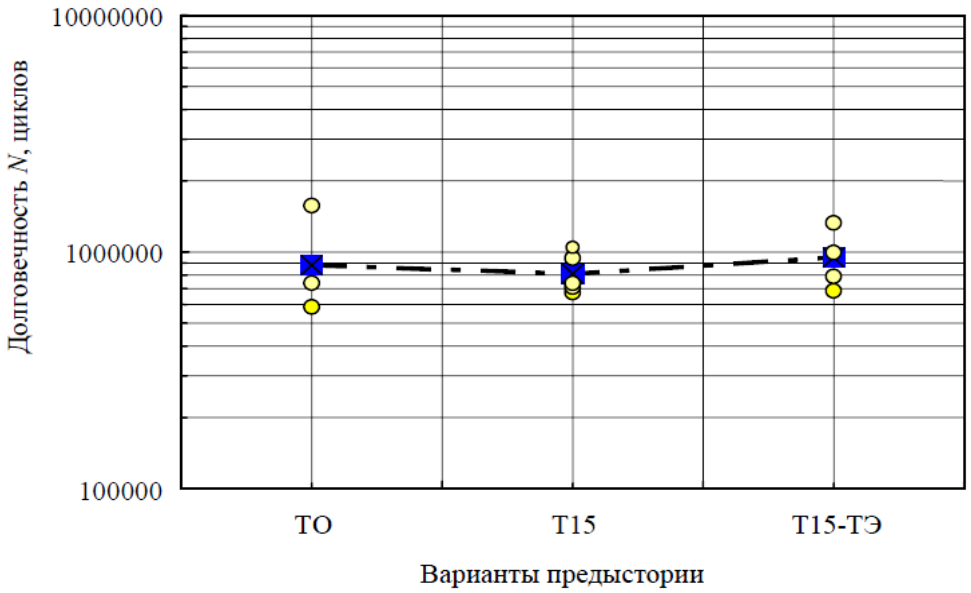


Рис. 3. Влияние «отдыха» (этапа хранения в лабораторных нормальных условиях в течение 15 лет) и последующей термоэкспозиции при T = 120 °С в течение 840 ч на усталостную долговечность образцов типа Т поперечного многоточечного двухсрезного болт-заклепочного стыкового соединения, выполненного из сплава Д16АТ. Уровень нагружения К = 0,3 (f = 6,6 Гц)

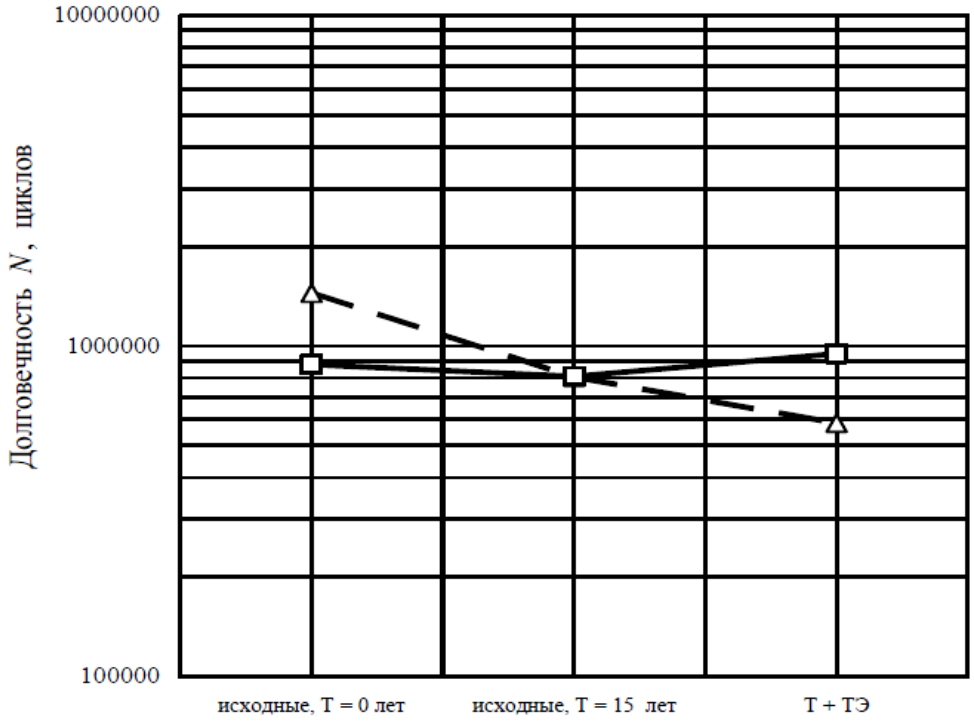


Рис. 4. Влияние «отдыха» (этапа хранения в лабораторных нормальных условиях в течение 15 лет) и последующей термоэкспозиции при T = 120 °С в течение 840 ч и варианта исполнения образца на усталостную долговечность образцов поперечного многоточечного двухсрезного болт-заклепочного стыкового соединения, выполненного из сплава Д16АТ: Δ – тип У; □ – тип Т. Уровень нагружения К = 0,3 (f = 6,6 Гц)

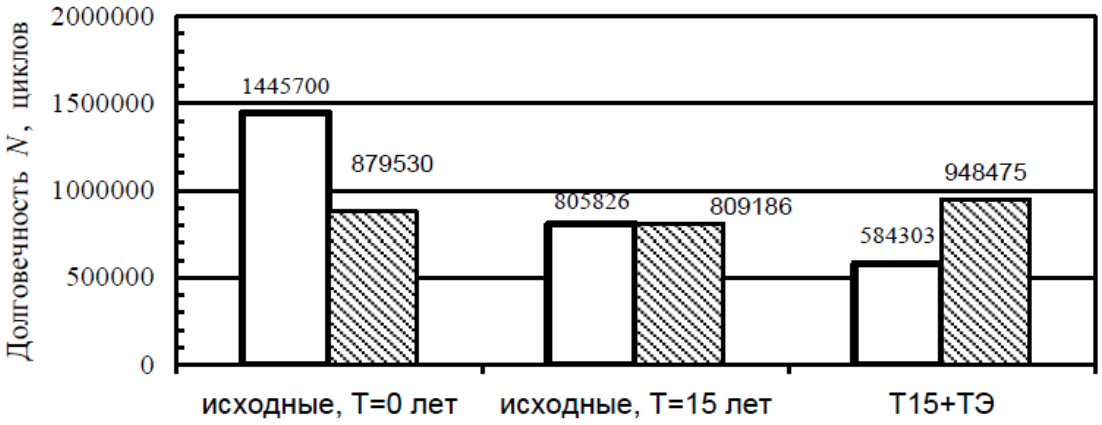


Рис. 5. Влияние «отдыха» (этапа хранения в нормальных лабораторных условиях в течение 15 лет) и последующей термоэкспозиции при T = 120 °С в течение 840 ч и типа образца на усталостную долговечность образцов поперечного многоточечного двухсрезного болт-заклепочного стыкового соединения, выполненного из сплава Д16АТ: ☐ – тип У, ▨ – тип Т. Уровень нагружения К = 0,3 (f = 6,6 Гц)

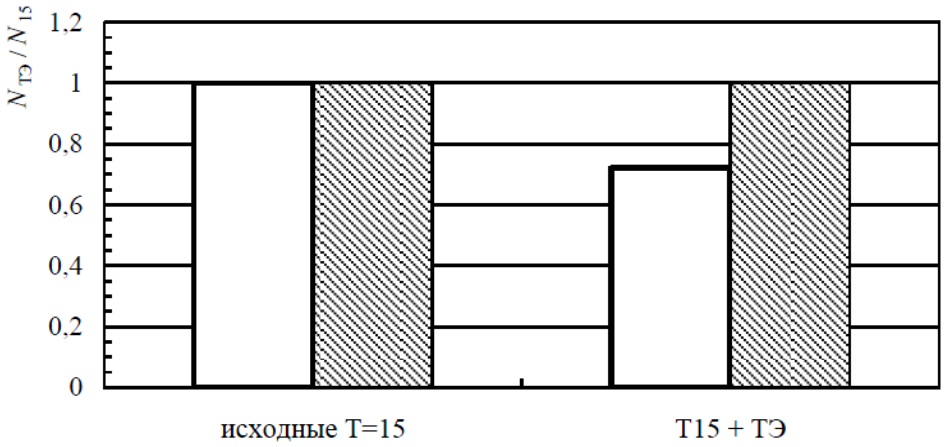


Рис. 6. Влияние термоэкспозиции и типа образца на относительную усталостную долговечность образцово- поперечного многоточечного двухсрезного болт-заклепочного стыкового соединения, выполненного из сплава Д16АТ после 15-летней выдержки в нормальных лабораторных условиях: ☐ – тип У; ▨ – тип Т. Уровень нагружения К = 0,3 (f = 6,6 Гц)

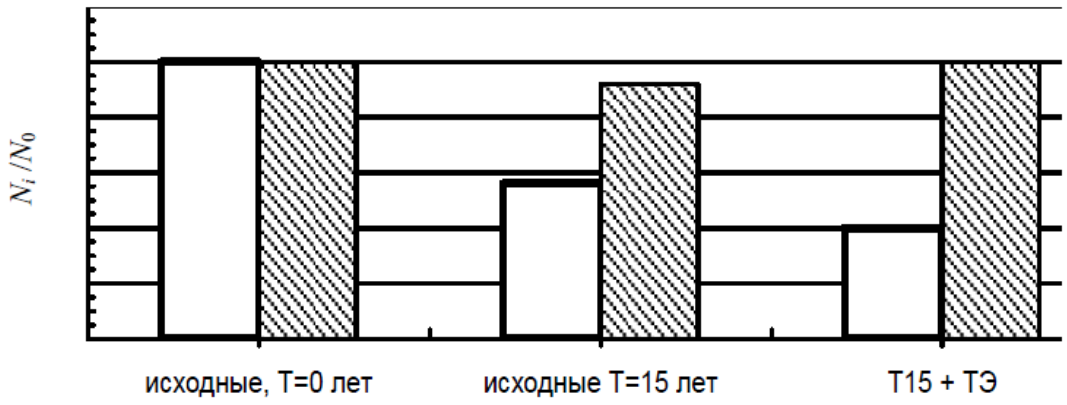


Рис. 7. Влияние предыстории и типа образца на относительную усталостную долговечность образцов поперечного многоточечного двухсрезного болт-заклепочного стыкового соединения, выполненного из сплава Д16АТ: ☐ – – тип У; ▨ – тип Т. Уровень нагружения К = 0,3 (f = 6,6 Гц)

Таким образом, снижение усталостной долговечности образцов болт-заклепочного стыкового соединения с упорной накаткой в результате теплового воздействия, последовавшего после 15-летней выдержки в нормальных условиях, свидетельствует о том, что в соединении еще сохранился осевой натяг.

Библиографические ссылки

1. Sathiya Naarayan S, Pavan Kumar, Satish Chandra. Implication of unequal rivet load distribution in the failures and damage tolerant design of metal and composite civil aircraft riveted lap joints // Engineering Failure Analysis. 2009. Vol. 16. Is. 7. P. 2255–2273.

2. Кузнецов А. А., Алифанов О. М., Ветров В. И. Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и сортамента. М. : Машиностроение, 1970.

3. Модели технологического рассеяния усталостной долговечности / А. Г. Колосов, В. Г. Лейбов, В. Л. Райхер, А. Ф. Селихов // Прочность авиац. конструкций : сб. ст. // ЦАГИ. М., 1998. Вып. 2631. С. 38–50.

4. Нестеренко, Б. Г., Нестеренко Г. И. Живучесть самолетных конструкций // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2007. № 119. С. 57–69.

A. V. Katsura, G. G. Krushenko

INFLUENCE OF CALENDAR TIME ON FATIGUE RESISTANCE OF BOLT-RIVETED JOINTS OF AIRCRAFTS

Bolted connections are mainly used in the assembly of massive power components and assemblies, with wide use of threaded rivet nuts made of aluminium alloys, which improves their mechanical properties.

Keywords: bolt-riveted joints, durability, fatigue resistance, shelf life.

© Кацура А. В., Крушенко Г. Г., 2012

УДК 539.374

Г. Г. Крушенко

ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНИКЕ

Описаны технологии, способы и средства получения и применения пористых металлических материалов в технике.

Ключевые слова: пористые металлические, применение пористых металлических материалов.

Литые металлические детали машиностроительного профиля в силу целого ряда причин, зависящих как от состава сплава, типа диаграммы состояния, к которому сплав относится, так и от несовершенства и нарушения технологий их производства, могут быть поражены газовой или усадочной, или газовоусадочной пористостью, что приводит к снижению их механических свойств и герметичности [1]. С целью предотвращения формирования пористости в отливках разработаны различные эффективные способы повышения качества расплава, а в случае невозможности их реализовать в жидком состоянии применяются технологии воздействия на отливки, блокирующие отрицательное воздействие пористости [2–4].

В то же время, несмотря на описанное выше отрицательное влияние присутствующих в отливках пустот, существуют и технологии получения из литейных сплавов, включая алюминиевые материалы, в которых, напротив, специально формируют пустоты/ячейки/поры. Такие материалы получили название «пенометаллы» (metallic foams – от способа их получения путем вспенивания расплава [5]) или «ячеистые металлы» – (cellular metals – от формы пустот (ячейки) [6]), а также «пористые металлы» (porous metal materials [7]).

Современное состояние производства «пено/поро/ячеистых» металлических материалов, их характеристики и применение представлено в обширной публикации известного в этой области специалиста J. Banhart (Fraunhofer-Institute for Manufacturing and Advanced Materials, Germany) [8].

Пенометаллы и другие пористые материалы с ячеистой структурой (рис. 1) [8] 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. 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 возмож-

ность формировать из ПМ объемные конструкции, изделия из этого материала применяют в различных отраслях машиностроения [9–11]: в автомобильной промышленности в виде конструктивных элементов (бамперы и др.), аэрокосмической отрасли в виде титановых и алюминиевых «сэндвичей», а также некоторых деталей турбин, судостроении для изготовления корпусов пассажирских судов

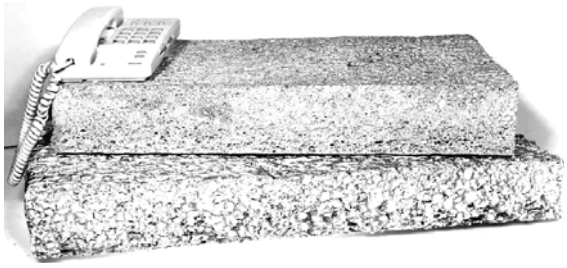


Рис. 1. Образцы пеноалюминия с разной плотностью и величиной ячеек, полученные с применением газовой инжекции (samples Hydro Aluminium, Norway)

Существует ряд технологий получения пенометаллов. Например, путем прямого введения газа (воздух, азот, аргон) в жидкий металл (рис. 2) [12].

По другой технологии ПМ получают введением в расплав реагентов-порофоров – (порофор – blowing agent – вещество, образующее пузырьки – порообразователь), вспенивающего вещества, обеспечивающего образование пор в металлическом материале. Например, при получении ПМ из Zn и сплава (Al – 4,0 %; Cu – 1,0 %; Zn –rem.) в качестве порофоров использовали соединенияTiH_2, MgH, ZrH_2, а из сплава (Al – 12,0 % Si) – TiH_2 [13], из сплава (Si – 9,0 %; Mg – 0,5 %; Cu – 0,2 %; Al – rem.) – $CaCO_3$, мрамор и TiH_2 [14–25], из сплава (Si – 12,0 %; Mg – 1,0 %; Ni – 2,5 %; Al – rem.) – CO_2 [15].

Разработаны и технологии, которые позволяют получать готовые металлоизделия с ячеистой структурой. Например [13], порошки цинка или сплава (Al – 4,0 %; Cu – 1,0 %; Zn – rem.) смешивают с порошками-порофорами TiH_2 или MgH, затем эту смесь вхолодную прессуют в заготовки, которые далее горячим прессованием прессуют в прекурсор, помещают его в форму и нагревают ее выше температуры плавления металла. При этом выделяющийся из соединений водород образует в жидком металле пену, которая заполняет полость формы. Затем, быстро охлаждая, фиксируют пористую ячеистую структуру. Подобная технология (рис. 3) [5] с использованием порошков алюминиевого и цинкового сплавов и порофоров TiH_2 и ZrH_2 описана в работе [16].

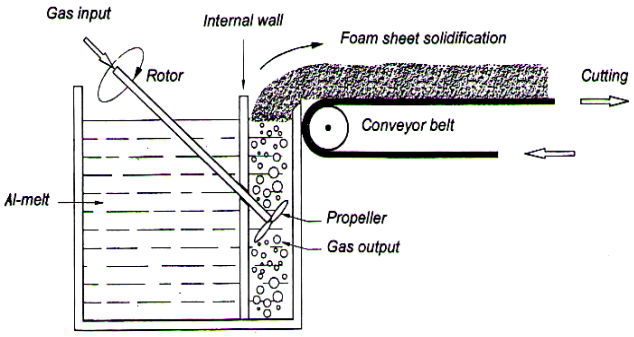


Рис. 2. Вспенивание металла прямым введением газа: gas input – впуск газа; rotor – вращающаяся трубка; propeller – импеллер; gas output – выход газа в расплав; Al-melt – алюминиевый расплав; internal wall – внутренняя стенка; foam sheet solidification – затвердевание пеноалюминия; conveyor belt – конвейерная лента; cutting – на отрезку

Согласно работе [5], на первой стадии получения ПМ в алюминиевый расплав при 680 ºС вводят 1,5 % кальция, затем его несколько минут перемешивают. При этом в расплаве образовываются оксид кальция CaO. алюминат кальция $CaAl_2O_4$ и, возможно, интерметаллид Al_4Ca, что приводит к сгущению металла. Затем его переливают в форму и вводят 1,6 % гидрида титана TiH_2, в результате чего выделяющийся из него водород вспенивает металл, который заполняет емкость. После охлаждения вспененного блока его удаляют из формы и нарезают на пластины.

Но при этом в производстве пенометаллов существует проблема стабилизации пены в жидком состоянии [5], однако она успешно решается в результате введения в расплав частиц с температурой плавления выше температуры плавления вспениваемого металла, что предотвращает слияние пузырьков.

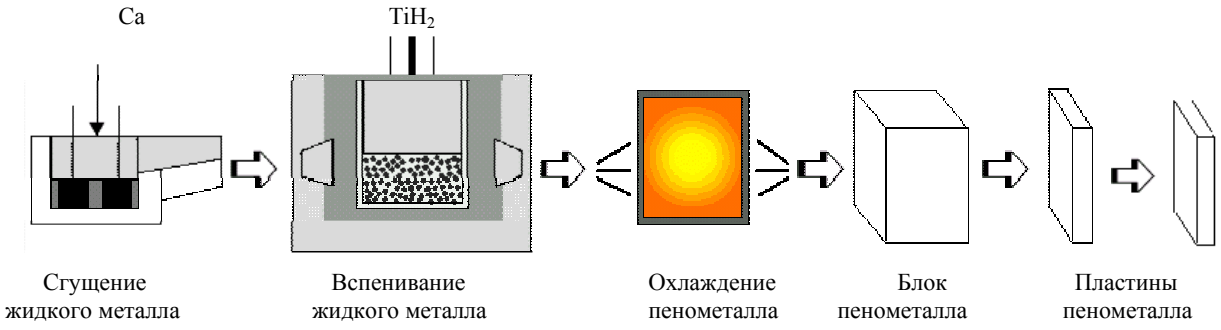


Рис. 3. Процесс получения пеноалюминия

При этом степень их влияния зависит от размера, смачиваемости и конфигурации фрактальных комплексов, формирующихся внутри и на поверхности перемычек. Так, в работе [17] показано, что наибольший стабилизирующий эффект при получении пеноалюминия дают наночастицы оксида алюминия Al_2O_3.

Исходя из анализа имеющейся информации на первом этапе нами была проведена работа [18] по получению пеноалюминия с использованием в качестве порофора крошки Саяногорского мрамора, по аналогии с работой [14], в которой для получения пенометаллических изделий применялся порошок белого мрамора (white marble). Согласно сертификату качества [http://www.bloks.lv/ru/sertifikat.htm], по минералогическому составу Саяногорские мраморы являются существенно кальцитовыми. Их средний химический состав находится в пределах: CaO – 52–55,2 %; S – 0,009–0,054 %; Mg – 0,30–1,50 %; P – 0,006–0,011 %; SiO_2 – 0,41–4,57 %; Fe_2O_3 – 0,012–0,119 %; Al_2O_3 – 0,06–0,25 %; и прочие потери при прокаливании – 41,17–43,75 %. Мраморную крошку предварительно измельчают дроблением до частиц размером около 100 мкм.

Технология получения пеноалюминия заключалась в выполнении следующих операций: расплавление алюминия марки А7 в тигельной печи сопротивления СНОЛ 1,6.2,5.1/9-И3 в шамотно-графитовом тигле → доведение температуры расплава до 800 ºС → выемка тигля из печи → засыпание на зеркало металла мраморного порошка в количестве 5 % масс от массы металла при одновременном его замешивании в расплав → установка тигля в печь → выдержка 10 мин при 800 ºС → выемка тигля и перемешивание расплава в течение 3-х мин → установка тигля в печь → выдержка 15 мин при 850 ºС → выемка тигля из печи → затвердевание пеноалюминия на воздухе непосредственно в тигле. После затвердевания металла полученную заготовку удаляют из тигля (рис. 4).

Преобладает сферическая форма пор, их размеры имеют интервал 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, рассчитывают как отношение массы вещества ко всему занимаемому им объему: чем ниже кажущаяся плотность, тем больше пустот в материале; она составляет 0,83 г/см^3, пористость ~ 70 %.

Рис. 4. Образец из пеноалюминия марки А7.
Размер 40 × 35 × 35 мм

Для сравнения на рис. 5 приведена фотография образца из алюминиево-магниевого сплава (Mg – 0,48 %; Si – 1,77 % + Al – ост.). Средняя величина ячеек – 0,9 мм; средняя толщина стенок – 0,6 мм; относительная плотность – 0,29 [19].

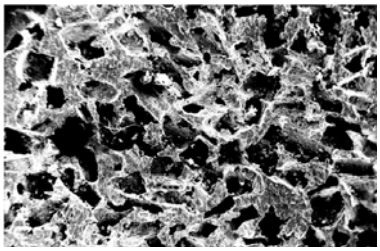


Рис. 5. Структура образца из вспененного Al-Mg-Si сплава.
Увеличение × 40

Из-за специфики структуры пенометаллов качество изделий из них оценивается по прочности при испытаниях на сжатие [20], прогиб [21] или пробой [22]. При этом механические свойства пенометаллов определяются количеством, размерами, формой и характером распределения пор по объему. Но так как процесс порообразования не поддается управлению технологическими параметрами, то невозможно получить пеноизделия с одинаковыми размерами пор (рис. 6) [5] и равномерным распределением в объеме металла, а следовательно, и изделия с близкими характеристиками механических свойств также нельзя получить.

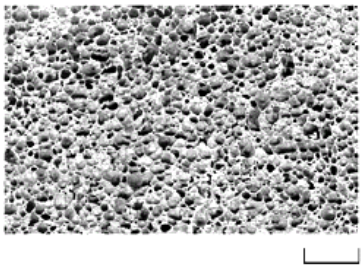


Рис. 6. Типичная структура пенометалла

Тем не менее представляется возможным спрогнозировать свойства ПМ с использованием математически точного метода случайных секущих [23] для подсчета количества и размеров пор, что можно определить на шлифе пеноматериала. В результате оценки пористости на нескольких сечениях образцов можно оценить количество, размеры и распределение пор в объеме металла.

На втором этапе с использованием полученных данных с применением метода конечных элементов в программном пакете MSC NASTRAN [24] можно выполнить численное моделирование механических свойств пористых металлов с закрытыми порами [25]. При моделировании испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг в качестве исследуемого образца пористого металла принималась модель элементарного объе-

ма в виде куба со сферическими порами. Были рассмотрены три типа образцов с разным количеством пор. Испытаниям на растяжение, сжатие и сдвиг подвергались 15 образцов. В результате численных экспериментов были получены математические зависимости модуля упругости, модуля сдвига и модуля объемного сжатия от количества пор и их размера. На основе анализа полученных результатов был сделан вывод о том, что они могут быть использованы при моделировании деформирования пористых тел с закрытыми сферическими порами при заданной пористости.

Библиографические ссылки

1. Porosity reduction and mechanical properties in die engine blocks / M. A. Irfan, D. Schwam, A. Karve, R. Ryder // Materials science and engineering. 2012. Vol. A 535. P. 108–114.

2. Gunasegaram D. R., Farnsworth D. J., Nguyen T. T. Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design experiments // Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. P. 1209–1219.

3. Спасский А. Г. Основы литейного производства. М. : Металлургиздат, 1950. 318 с.

4. Impregnation improves casting quality // Vacuum. 1953. Vol. 3. Issue 1. P. 94.

5. Banhart J. Manufacturing routes for metallic foams // J. of metals, 2000. Vol. 52. P. 22–27.

6. Saenz E, Baranda P. S., Bonhomme J. Porous and cellular materials for structural applications // Materials of Symp. Proc., 1998. Vol. 521. P. 83.

7. Fractal dimension of pore-structure of porous metal materials made by stainless steel powder / H. P. Tang [et al.] // Powder Technology. 2012. Vol. 217. P. 383–387.

8. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams // Progress in Materials Science. 2001. Vol. 46. P. 559–632.

9. Aluminium foams as a filler for leading edges: Improvements in the mechanical behavior under bird strike impact tests / J. A. Reglero, M. A. Rodriguez-Perez, E. Solorzano, J. A. de Saia // Materials and design. 2011. Vol. 32. № 2. P. 907–910.

10. Авдеенко А. М., Крупин Ю. А. Сильнопористые структуры – новый класс конструкционных материалов // Тяжелое машиностроение. 2008. № 7. С. 18–21.

11. Ершов М. Ю., Лепешкин И. А. Вспененный алюминий в автомобилестроении // Автомобильная промышленность. 2010. № 10. С. 36–39.

12. Asholt P. Metal foams and porous metal structures // Intern. Conf. (14–16 June 1999). P. 133.

13. Kovacik J., Simancik F. Comparison of zinc and aluminium foam behaviour // Kovove materially. 2004. Vol. 42. № 2. P. 79–90.

14. Manufacturing of Al-Mg-Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent / L. E. G. Cambronero, J. M. Ruiz-Roman, F. A. Corpas, J. M. Ruiz Prieto // J. of material processing technology. 2009. Vol. 209. Issue 4. P. 1803–1809.

15. Пат РФ 2046151 C1 C22C 1/08. Способ получения пенометалла / Норск Хюдро, В. Вальтер, Б. Киркеваг. № 5011037/02; заявл. 11.07.1990; опубл. 20.10.1995.

16. Banhart J., Baumeister J. Deformation characteristics of metal foams // J. of materials science. 1998. Vol. 33. № 5. P. 1431–1440.

17. 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.

18. Крушенко Г. Г., Редькин В. Е., Ардамин В. А. Технологии получения и применение пенометаллов в технике // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники: материалы VI Всерос. научно-техн. конф. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. С. 116–118.

19. Иванов Д. О., Аксенов А. А., Иванов И. А. Исследование и моделирование пеноалюминия, полученного из вторичного алюминиевого сырья методом механического легирования // Известия вузов. Цветная металлургия. 2007. № 6. С. 56–61.

20 Ершов М. Ю., Лепешкин И. А. Вспененный алюминий в автомобилестроении // Автомобильная промышленность. 2011. № 10. С. 36–39.

21. Kapil Mohan, Tick Hon Yip, Shridar Idapalapati, Zhong Chen / Impact response foam core sandwich structures // Materials science and engineering A. 2011. Vol. 529. P. 94–101.

22. Салтыков С. А. Стреометрическая металлография. М. : Металлургия, 1976. 270 с.

23. Рычков С. П. MSC. visualNASTRAN для Windows. М. : НТ Пресс, 2004. 552 с.

24. Золотухин А. В., Садовский В. М. Численное моделирование свойств пористых металлов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов. В 2 т. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. Т. 1. С. 138–139.

G. G. Krushenko

MANUFACTURE AND APPLICATION OF POROUS METALLIC MATERIALS IN ENGINEERING

The author describes methods and means of manufacture and application of porous metallic materials in engineering

Keywords: porous metal materials, application porous metallic materials

© Крушенко Г. Г., 2012

УДК 538.913

А. С. Крылов, С. Н. Софронова, Е. М. Колесникова, С. В. Горяйнов, А. Г. Кочарова

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ОКСИФТОРИДЕ $K_3WO_3F_3$*

Проводилось исследование колебательных спектров оксифторида $K_3WO_3F_3$ методом комбинационного рассеяния света при различных температурах и в условиях высокого гидростатического давления, а также был выполнен неэмпирический расчет динамики решетки в рамках обобщенной модели Гордона–Кима. Исследования показали, что в криолите $K_3WO_3F_3$ в результате фазовых переходов при $T_1 = 452$ K и $T_2 = 414$ K сегнетоэлектрическая фаза реализуется за счет смещения атомов калия из положения равновесия, а не за счет упорядочения анионов в октаэдре $[WO_3F_3]^{3-}$.

Ключевые слова: динамика решетки, оксифториды, комбинационное рассеяние света.

Перовскитоподобные соединения – это соединения, в структурах которых содержится важнейшие черты перовскита: каркасы, слои или квадратные сетки из связанных вершинами октаэдров MX_6. Это свойство сохраняется, например, в эльпасолитах, так называемых упорядоченных перовскитах, $A_2A'BX_6$, где октаэдры $A'X_6$ и BX_6 чередуются во всех трех измерениях, а также в криолитах A_3BX_6, где катион A занимает две позиции с $Z_A = 12$ и $Z_A = 6$, а каркас построен из октаэдров $A'X_6$ и BX_6 [1].

Оксифториды с общей формулой $A_2A'MO_xF_{6-x}$ (A, A' = NH_4, Na, K, Rb, Cs; M = W, Mo, Ti, Nb, Ta; x = 1, 2, 3 и зависит от валентности центрального атома M) являются перовскитоподобными кристаллами и принадлежат к типу криолита (A = A') либо к типу эльпасолита (A≠A'), для x = 1, 3. Все октаэдры O_xF_{6-x}, за исключением trans- MO_2F_4 (D_{4h}), не обладают центром симметрии. Интересен тот факт, что по данным рентгеноструктурных исследований, оксифториды с x = 1, 3 в высокотемпературной фазе обладают кубической симметрией с пространственной группой $Fm\bar{3}m$ (O_{5h}) (Z = 4) [2]. При охлаждении представители семейства оксифторидов испытывают один или несколько фазовых переходов с понижением симметрии сегнетоэлектрической или сегнетоэластической природы.

Объектом исследования настоящей работы является оксифторид $K_3WO_3F_3$, который принадлежит к вышеупомянутому классу кристаллов эльпасолитов–криолитов $A_2A'MO_3F_3$ (A, A' = Na, K, Rb, Cs; M = W, Mo).

Как известно из литературных источников [3–6], в криолите $K_3WO_3F_3$ реализуется два последовательных фазовых перехода при $T_1 = 452$ K и $T_2 = 414$ K сегнетоэлектрической и сегнетоэластической природы соответственно. Структура высокотемпературной фазы, как и у большинства представителей данного семейства, кубическая, с симметрией $Fm\bar{3}m$ [3], несмотря на низкую симметрию анионного октаэдра $[WO_3F_3]^{3-}$ (mer-состояние с ромбической симметрией C_{2v}, либо fac-состояние с тригональной симметрией C_{3v}, в зависимости от расположения атомов F/O в октаэдре). Кубическая симметрия кристалла в высокотемпературной фазе макроскопически реализуется за счет разупорядочения атомов анионов F/O по всему кристаллу.

В работе [7] исследовались структурные изменения при фазовых переходах в кристалле криолита $K_3WO_3F_3$. Была установлена следующая последовательность структурных изменений:

$$Fm\bar{3}m \xrightarrow[(\eta_1,0,0)]{} I4mm \xrightarrow[(\eta_1,\eta_2,0)]{} Cm$$

Авторы работы [7] предположили, что фазовые переходы в криолите $K_3WO_3F_3$ реализуются за счет упорядочения атомов анионов в октаэдре. Поэтому на основании полученных данных о симметрии фаз, с использованием теоретико-группового анализа, была построена модель упорядочения атомов F/O [7]. Необходимо отметить, что в результате фазовых переходов наблюдаются заметные смещения атомов K из положения равновесия, причем сверхструктурных рефлексов обнаружено не было, т. е. нет увеличения объема элементарной ячейки [7]. В работе [6] были исследованы термодинамические свойства исследуемого в настоящей работе криолита. Было обнаружено, что фазовые переходы при $T = 452$ K и $T = 414$ K сопровождаются малым изменением энтропии ($\Delta S_1 = 0{,}52R$, $\Delta S_2 = 0{,}35R$). Согласно авторам данной работы, структурные искажения в криолите $K_3WO_3F_3$ связаны с малым смещением атомов.

Основной задачей данной работы является определение роли различных структурных элементов кристалла $K_3WO_3F_3$ в реализации фазовых переходов, имеющих место в данном соединении. Необходимо определить, за счет чего в кристалле в низкотемпературной фазе реализуется макроскопический дипольный момент: за счет упорядочения атомов F/O либо за счет смещения атомов из положений равновесия (такая ситуация наблюдается в классическом сегнетоэлектрике $BaTiO_3$ [8; 9]).

Исследование спектров КР. Спектры КР поликристаллического образца $K_3WO_3F_3$ были получены с помощью КР спектрометра Horiba Jobin Yvon T64000 и Фурье-раман спектрометра Brucker RFS100/S в спектральном диапазоне 20–1 200 $см^{-1}$ и 110–3 500 $см^{-1}$, соответственно, в геометрии рассеяния назад.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-31205 мол_а, № 11-02-98002, № 12-02-00056), Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8379.

Спектральное разрешение: 0,3 $см^{-1}$ и 1 $см^{-1}$. В качестве источника возбуждения использовалось излучение Ar^+ лазера с длиной волны $\lambda = 514{,}5$ nm и мощностью 20 mW T64000; излучение Nd:YAG лазера с длиной волны 1,06 мкм и мощностью 250 mW для RFS100/S.

Эксперимент при высоком гидростатическом давлении (до 8,5 ГПа) был проведен при комнатной температуре в ячейке высокого давления с алмазными наковальнями [10]; диаметр отсека для образца равен 0,25 мм, толщина – 0,1 мм. Давление измерялось с точностью до 0,05 ГПа по смещению линий люминесценции рубидия. Неориентированный микрокристалл рубидия был помещен в ячейку рядом с образцом $K_3WO_3F_3$ размером 70… 80 мкм. Высокообезвоженная смесь этанол/метанол спиртов была использована как давление и как передаточная среда. Спектры КР были получены в геометрии рассеяния назад на спектрометре Horiba Jobin Yvon T64000 под микроскопом (рис. 1).

Количественная информация о параметрах спектральных линий была получена с помощью разложения экспериментальных спектров по контурам с использованием контура Фойгхта и дисперсионных контуров для индивидуальных линий.

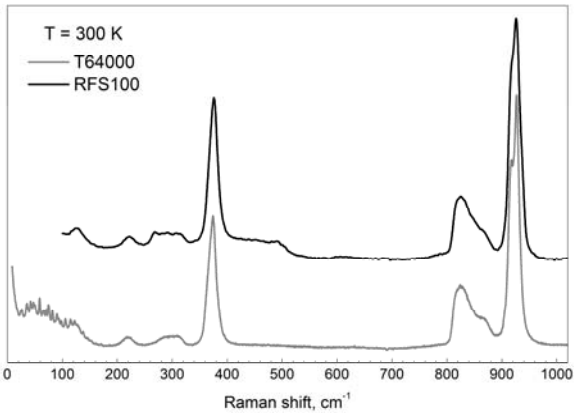


Рис. 1. Спектр КР оксифторида $K_3WO_3F_3$ при температуре $T = 300$ K

В диапазоне 750–1 000 $см^{-1}$ (III) спектр содержит валентные колебания W–O октаэдра $[WO_3F_3]^{3-}$. Для того чтобы проинтерпретировать данные результаты, мы использовали результаты квантово-химического анализа для двух возможных конфигураций октаэдра $[WO_3F_3]^{3-}$ с симметрией C_{3v} (fac-) и C_{2v} (mer-) [11].

Линии КР спектра, которые наблюдаются ниже 500 $см^{-1}$ (I и II), связаны с валентными колебаниями W–F, и с деформационными колебаниями ионов WO_3. Экспериментальные частоты колебаний хорошо согласуются с расчетными данными [11] для fac-конфигурации (C_{3v}). В спектре присутствуют все предсказанные интенсивные линии, расчетный спектр отличается от экспериментального только небольшим сдвигом каждой линии в низкочастотную область в среднем на 40 $см^{-1}$. Поэтому можно сделать вывод, что октаэдр $[WO_3F_3]^{3-}$ в кристалле преимущественно находится в fac-конфигурации.

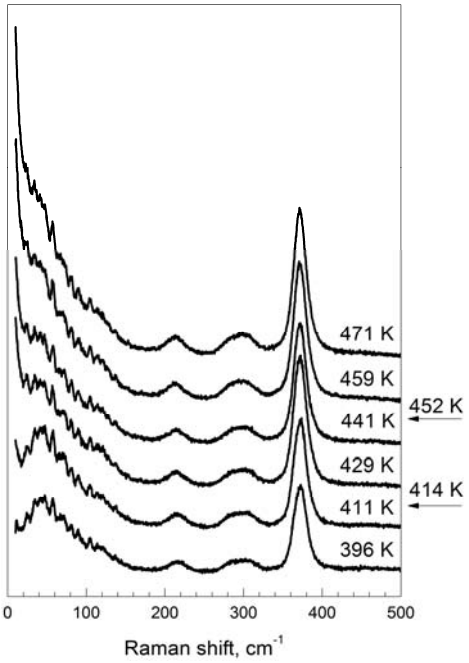


Рис. 2. Температурная трансформация низкочастотной части спектра КР

К сожалению, нам не удалось зарегистрировать низкочастотную часть спектра, так как регион ниже 100 $см^{-1}$ не доступен для КР-Фурье спектрометра RFS100/S, а в случае КР спектрометра T64000, данная область спектра содержит ротационные колебания воздуха, которые налагаются на спектр образца. Несмотря на это (рис. 2) отчетливо видно, что при $T > 414$ K в спектре КР криолита $K_3WO_3F_3$ наблюдается центральный пик, который характерен как для фазовых переходов типа порядок-беспорядок, так и для фазовых переходов типа смещения [12]. Характер спектральных изменений, происходящих при обоих фазовых переходах, указывает на то, что оба обнаруженных фазовых перехода являются переходами второго рода, что согласуется с работой [6].

Частота наиболее интенсивной линии (921 $см^{-1}$) в экспериментальном спектре КР при комнатной температуре практически совпадает с расчетной частотой (915 $см^{-1}$) полносимметричного колебания связи W–O для fac-конфигурации октаэдра $[WO_3F_3]^3$ (рис. 3). Едва заметное расщепление линий происходит после фазового перехода $T_1 = 452$ K. Данное колебание в кубической фазе не вырождено, следовательно, в результате первого фазового перехода в кристалле появляется два различных типа связи W–O. Это явление можно проинтерпретировать по-разному: либо увеличился объем элементарной ячейки, по крайней мере в два раза, либо имеет место искажение F/O октаэдра. Но так как по данным рентгеноструктурных исследований, увеличения объема элементарной ячейки не происходит, мы придерживаемся гипотезы об искажении анионного октаэдра. При фазовом

переходе T_2 = 414 K наблюдаются более сильные изменения в спектре. При дальнейшем охлаждении образца в спектре, полученном с помощью RFS100/S, появляется новая линия на 935 см$^{-1}$, хотя в спектре, полученном на T64000, данной линии обнаружено не было (рис. 4).

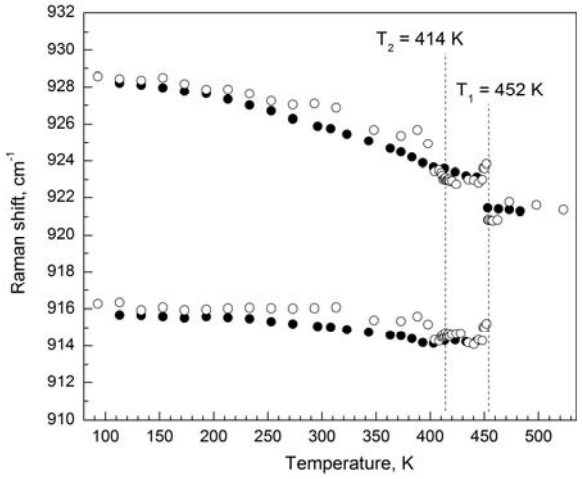


Рис. 3. Температурная трансформация спектра КР в диапазоне колебаний связи W–O

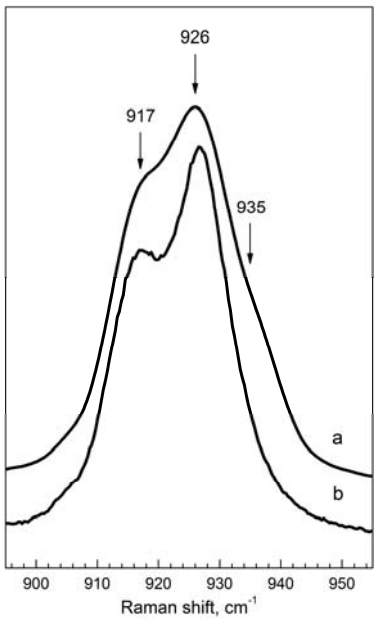


Рис. 4. Спектр КР при T = 300 K: *a* – RFS100/S; *b* – T64000

Дальнейшие исследования, вплоть до температуры 100 K, не выявили никаких аномалий в спектре.

В упорядоченных эльпасолитах при гелиевых температурах ширины линий полносимметричных колебаний анионного октаэдра стремятся к величинам ~1…3 см$^{-1}$ [13–15]. Полносимметричное колебание 921 см$^{-1}$ существует во всех фазах исследуемого кристалла, поэтому исследование поведения ширины линии данного колебания с температурой может служить параметром, связанным со степенью упорядочения октаэдров $[WO_3F_3]^{3-}$. Поскольку при гелиевых температурах ширина линии колебания W–O, равная ≈6 см$^{-1}$, в кристалле $K_3WO_3F_3$ в несколько раз превосходит ширину линий полностью упорядоченных эльпасолитов, то полного упорядочения октаэдра не происходит (рис. 5).

Путем линейной экстраполяции было найдено давление 3,2 ГПа, при котором происходит фазовый переход в новую фазу высокого давления. При более высоких давления также были найдены некоторые аномалии (рис. 6), но мы не располагаем достаточным количеством экспериментальных точек для того, чтобы обозначить в точности вторую критическую точку; возможно, она должна быть в диапазоне от 6 до 8 ГПа. Необходимо отметить, что наблюдается значительное уширение высокочастотной линии. Эта величина составляет примерно 10 см$^{-1}$. При декомпрессии кристалл переходит в исходное состояние через ту же последовательность фазовых переходов. Все изменения КР спектра, которые мы наблюдали до 8,5 ГПа, обратимы и могут быть воспроизведены на различных образцах одной и той же кристаллизации в пределах экспериментальной ошибки (≈ 0–05 ГПа). *Расчет динамики решетки в рамках обобщенного метода Гордона–Кима*. Ранее [16] был проведен расчет динамики решетки в рамках обобщенного метода Гордона–Кима [17] полностью упорядоченного криолита $K_3WO_3F_3$ в fac- и mer- конфигурациях. Расчет показал, что состояние с fac-ориентацией октаэдра более выгодно, чем mer-ориентацией.

Расчет динамики решетки в рамках обобщенного метода Гордона-Кима [17], представленный в данной работе, был проведен на минимальных параметрах решетки и атомных смещений, полученных из условия минимума полной энергии в работе [16] (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные структурные параметры оксифторида $K_3WO_3F_3$ в кубической фазе

Параметр решетки, Å	$Fm\bar{3}m$
	a_0 = 8,76024
Координаты атомов, [a, b, c]	W [0; 0; 0] K_1 [0.5; 0.5; 0.5] K_2 [0.25; 0.25; 0.25] O/F [0.292; 0; 0] O/F [0; 0.292; 0] O/F [0; 0; 0.292] O/F [0.708; 0; 0] O/F [0; 0.708; 0] O/F [0; 0; 0.708]

Вследствие разупорядочения каждый октаэдр в элементарной ячейке может находиться в 20 равновероятных состояниях (8 состояний с тригональной симметрией C_{3v}, и 12 состояний с ромбической C_{2v}). Авторами работ [18] экспериментально было показано, что анионный октаэдр $[WO_3F_3]^{3-}$ преимущественно обладает тригональной симметрией (fac-состояние). На основании этого в расчете, для удобства, будут учитываться только fac-состояния.

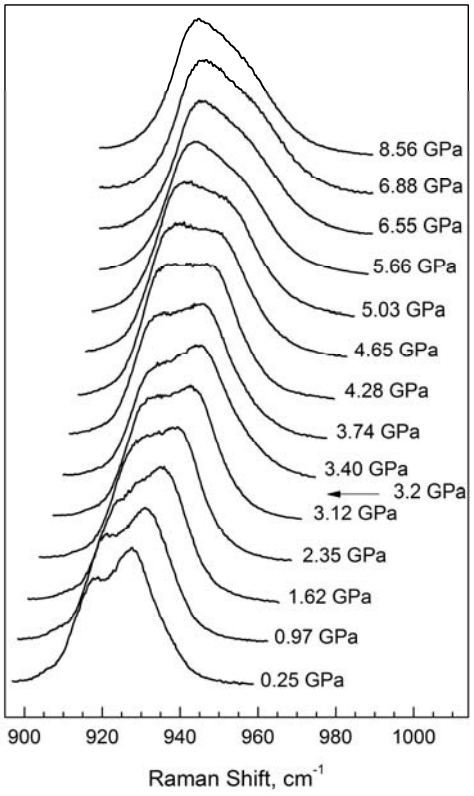


Рис. 5. Трансформация спектра в диапазоне колебаний связи W–O в условиях высокого гидростатического давления (T = 300 K)

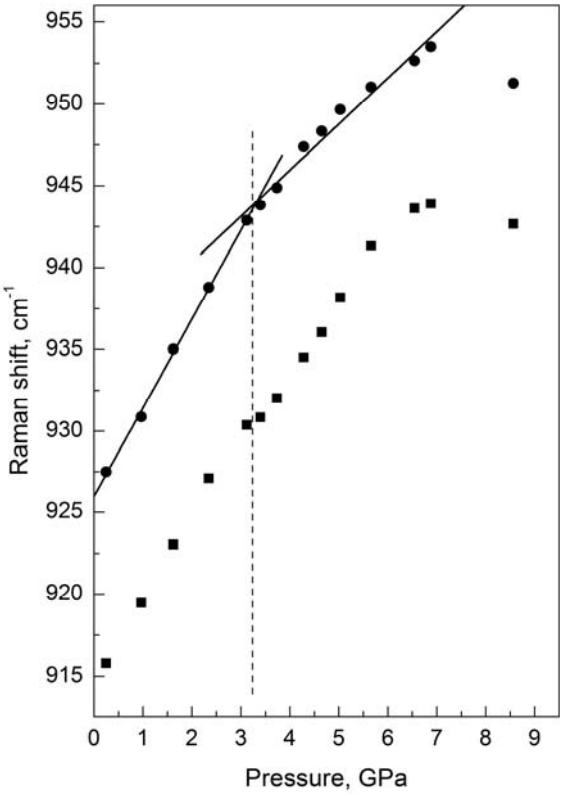


Рис. 6. Зависимость положений центров линий от давления в диапазоне колебаний связи W–O (T = 300 K)

Таблица 2

Нестабильные моды спектра колебаний атомов криолита $K_3WO_3F_3$ кубической и искаженной фаз

№ моды	$Fm\bar{3}m$ (Z = 4)	Искаженная фаза (Z = 4)
ω_1	85i(2)	68i(2)
ω_2	84i(2)	68i(2)
ω_3	84i(2)	68i(2)
ω_4	69i(2)	51i(2)
ω_5	24i(2)	22i(2)
ω_6	23i(2)	21i(2)
ω_7	23i(2)	21i(2)

Как уже было сказано, в высокотемпературной кубической фазе атомы анионов F/O разупорядочены по кристаллу. Чтобы смоделировать аналогичную ситуацию в теории, была выбрана кубическая элементарная ячейка типа эльпасолита-криолита, содержащая четыре формульные единицы (Z = 4).

Чтобы смоделировать «усреднение» в кубической фазе $Fm\bar{3}m$, мы вычисляли динамические матрицы (собственные значения которых и являются частотами колебаний) 4096 структур, в которых перебирались все возможные ориентации октаэдра в fac- состоянии (4 октаэдра в элементарной ячейке, и каждый может находиться в 8 равновероятных ориентациях). Затем мы усредняли динамические матрицы и определяли частоты колебания (табл. 2).

Спектр частот колебаний атомов содержит нестабильные «мягкие» моды колебаний. Согласно работе [7], фазовые переходы, реализующиеся в оксифториде $K_3WO_3F_3$, происходят без увеличения объема элементарной ячейки. В рассчитанном спектре кубической фазы такой ситуации соответствует «мягкая» мода ω_4. Собственный вектор данной «мягкой» моды хорошо согласуется с экспериментальными атомными смещениями, полученными в [7]. Затем мы сместили атомы по собственному вектору полученной «мягкой» моды и выполнили расчет динамики решетки. Результаты данного расчета представлены в табл. 2.

Согласно полученным данным видим, что после смещения атомов по собственному вектору «мягкой» моды кристалл остался нестабильным, несмотря на небольшое «ужесточение», что может свидетельствовать о существовании других фазовых переходов, связанных как с центром зоны Бриллуэна, так и с граничными точками.

Исследования показали, что в криолите $K_3WO_3F_3$ в результате фазовых переходов при T_1 = 452 K и T_2 = 414 K упорядочения атомов F/O в анионных октаэдрах $[WO_3F_3]^{3-}$ не происходит. Данный вывод авторы сделали на основании результатов, полученных из КР спектров, и результатов неэмпирического расчета динамики решетки, проведенного в настоящей работе. Наиболее вероятен тот факт, что сегнетоэлектрическая фаза в криолите $K_3WO_3F_3$ реализуется за счет смещения атомов калия из положения равно-

весия. При температуре фазового перехода T_2 = 414 K в спектрах КР исследуемого соединения был обнаружен центральный пик. Характер спектральных изменений свидетельствует о том, что данный фазовый переход является фазовым переходом второго рода.

Библиографические ссылки

1. Aleksandrov K. S., Beznosikov B. V. Hierarchies of perovskite-like crystals // Physics of the Solid State. 1997. Vol. 39. P. 695–715.

2. Phase transitions in elpasolites (ordered perovskites) / I. N. Flerov, M. V. Gorev, K. S. Aleksandrov et al. // Materials science and engineering. 1998. Vol. 24. P. 81–151.

3. Dehnicke Von K., Pausewang G., Rüdorff W. Die IR-Spectren der Oxofluorokomplexe $TiOF_5^{3-}$, VOF_5^{3-}, $NbO_2F_4^{3-}$, $MoO_3F_3^{3-}$ und $WO_3F_3^{3-}$ // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 1969. Vol. 366. № 1–2. P. 64–72.

4. Study of phase transitions in $A_3MO_3F_3$ compounds (A = K, Rb, Cs; M = Mo, W) / G. Péraudeau, J. Ravez, P. Haggenmuller, H. Arend // Solid State Comn. 1978. Vol. 27. P. 591–593.

5. Raman scattering in ferroelectric materials with composition $A_2BMO_3F_3$ (A, B = K, Rb, Cs for $r_{A+} \geq r_{B+}$ and M = Mo, W) / M. Couzi, V. Rodriquez, J. P. Chaminade et al. // Ferroelectrics. 1988. Vol. 80. P. 109–112.

6. Effect of cationic substitution on ferroelectric and ferroelastic phase transitions in oxyfluorides $A_2A'WO_3F_3$ (A, A': K, NH_4, Cs) / V. D. Fokina, I. N. Flerov, M. V. Gorev et al. // Ferroelectrics. 2007. Vol. 347. P. 60–64.

7. Структурные изменения при фазовых переходах в оксифториде $K_3WO_3F_3$ / М. С. Молокеев, С. В. Мисюль, В. Д. Фокина и др. // ФТТ. 2011. Т. 53. № 4. С. 778–783.

8. Струков Б. А., Леванюк А. П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. М. : Наука, 1983.

9. Фазовые переходы в кристаллах галоидных соединений ABX_3 / Александров К. С., Анистратов А. Т., Безносиков Б. В., Федосеева Н. В. Новосибирск : Наука, 1981.

10. Goryainov S. V., Belitsky I. A. Raman spectroscopy of water tracer diffusion in zeolite single-crystals // Phys. Chem. Minerals. 1995. Vol. 22 P. 443.

11. Dynamic disorder in ammonium oxofluorotungstates $(NH_4)_2WO_2F_4$ and $(NH_4)_3WO_3F_3$ / E. I. Voit, A. V. Voit, A. A. Mashkovskii et al. // Journal of structural chemistry. 2006. Vol. 47. № 4 P. 642–650.

12. Малиновский В. К., Пугачев А. М., Суровцев Н. В. Центральный пик в кристалле титаната стронция в окрестности фазового перехода из тетрагональной в кубическую фазу // ФТТ. 2012. Т. 54. С. 871–873.

13. Baldinozzi G., Sciau Ph., Bulou A. Analysis of the phase transition sequence of the elpasolite (ordered perovskite) Pb_2MgTeO_6 // J. Phys.: Condens. Matter. 1997. Vol. 9. P. 10531–10544.

14. Lattice dynamics and Raman scattering spectrum of elpasolite Rb_2KScF_6: Comparative analysis / S. N. Krylova, A. N. Vtyurin, A. Bulou et al. // Physics of the Solid State. 2004. Vol. 46. P. 1311–1319.

15. Raman spectra and phase transitions in Rb_2KInF_6 elpasolite / A. S.Krylov, S. N.Krylova, A. N.Vtyurin et al. // Crystallography Reports. 2011. Vol. 56. P. 18–23.

16. Sofronova S. N., Kolesnikova E. M. Nonempirical calculations of $K_3WO_3F_3$ cryolite lattice dynamics // Ferroelectrics. 2011. Vol. 416. P. 85–89.

17. Lattice dynamics calculation of the ionic crystals with ion dipole and quadrupole deformations: perovskite structure oxides / N. G. Zamkova, V. I. Zinenko, O. V. Ivanov et al. // Ferroelectrics. 2003. Vol. 283. P. 49–60.

18. A Raman scattering study of the phase transition in the $(NH_4)_3WO_3F_3$ oxyfluoride / A. S. Krylov, Yu. V. Gerasimova, A. N. Vtyurin et al. // Physics of the Solid State. 2006. Vol. 48. P. 1356–1362.

A. S. Krylov, S. N. Sofronova, E. M. Kolesnikova, S. V. Goryaynov, A. G. Kocharova

INVESTIGATION OF STRUCTURE PHASE TRANSITIONS IN OXYFLUORIDE $K_3WO_3F_3$

The article presents investigation of vibrational spectra of oxyfluoride $K_3WO_3F_3$ by Raman technique at different temperatures and under high hydrostatic pressure; the nonempirical lattice dynamics calculation was carried out in framework of generalized Gordon–Kim model. It was shown, that ferroelectric phase in cryolite $K_3WO_3F_3$ is realized due to displacements of potassium atoms from equilibrium state, as a result of phase transitions at T_1 = 452 K and T_2 = 414 K, but is not due to ordering of anions atoms in octahedron $[WO_3F_3]^{3-}$.

Keywords: lattice dynamics, oxyfluorides, Raman scattering.

© Крылов А. С., Софронова С. Н., Колесникова Е. М., Горяйнов С. В., Кочарова А. Г., 2012

УДК 538.913

А. С. Крылов, С. Н. Софронова, Е. М. Колесникова, Л. И. Исаенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РЕШЕТКИ ОКСИФТОРИДА $Rb_2KMoO_3F_3$*

Получены полные спектры КР оксифторида $Rb_2KMoO_3F_3$ в температурном диапазоне 7–260 K. При температуре T ≈ 185 K был обнаружен структурный фазовый переход, рассчитана динамика решетки «разупорядоченного» кристалла $Rb_2KMoO_3F_3$, в спектре которого присутствуют «мягкие» моды колебаний.

Ключевые слова: динамика решетки, оксифториды, комбинационное рассеяние света.

Эльпасолит $Rb_2KMoO_3F_3$ принадлежит к большому классу кристаллов эльпасолитов-криолитов с общей формулой $A_2BMO_3F_3$ (A, B = NH_4, Na, K, Rb, Cs; M = Mo, W). В зависимости от отношения ионных радиусов R_A и R_B, а также от атома M, высокотемпературная кубическая фаза $Fm\bar{3}m$ данных соединений может оставаться стабильной вплоть до температуры жидкого гелия [1–6] или искажаться в результате одного [1–5; 7] или двух фазовых переходов [1–6; 8–10]. Например, несмотря на близкие значения ионных радиусов атомов (R_{Mo} = 0,073 nm) и W (R_W = 0,074 nm), эльпасолит $Rb_2KMoO_3F_3$ испытывает фазовый переход [11], а эльпасолит $Rb_2KWO_3F_3$ не испытывает никаких фазовых превращений и остается кубическим вплоть до температуры жидкого гелия [12]. Необходимо отметить, что высокотемпературная кубическая фаза в данных соединениях реализуется благодаря разупорядочению атомов F/O по кристаллу. В зависимости от расположения атомов анионов F/O, локальная симметрия анионного октаэдра $[MO_3F_3]^{3-}$ может быть либо mer- (симметрия C_{2v}), либо fac- (симметрия C_{3v}) конфигурации. Авторами работы [13] было показано, что анионный октаэдр находится в fac- конфигурации.

Недавно выяснилось [11], что оксифторид $Rb_2KMoO_3F_3$ испытывает структурный фазовый переход типа порядок-беспорядок при T = 195 K, далекий от трикритической точки в режиме нагрева образца. Однако структуру низкотемпературной фазы решить не удалось ввиду двойникования образцов ниже температуры фазового перехода.

Целью настоящей работы является представление результатов экспериментальных и теоретических исследований динамики решетки эльпассолита $Rb_2KMoO_3F_3$ с помощью метода комбинационного рассеяния света и в рамках обобщенной модели Гордона–Кима для того, чтобы попытаться описать механизм фазового перехода в данном кристалле.

Исследование спектров КР оксифторида $Rb_2KMoO_3F_3$. Спектры КР неориентированного кристалла оксифторида $Rb_2KMoO_3F_3$ были получены с помощью КР-спектрометра Horiba Jobin Yvon T64000. В эксперименте был использован образец 1,5×1,5×1,5 мм № 7, описанный в работе [11]. В качестве источника возбуждения применялось излучение Ar^+ лазера с длиной волны λ = 514,5 нм. Мощность на образце составляла 7 мВт.

Для того чтобы извлечь количественную информацию о спектральных параметрах из экспериментальных данных, спектры были разложены на отдельные линии. В диапазоне низких частот (< 150 $см^{-1}$) в качестве модельной формы линии была использована модель затухающего гармонического осциллятора [14]. Выше 150 $см^{-1}$ был использован контур Лоренца [15] (рис. 1).

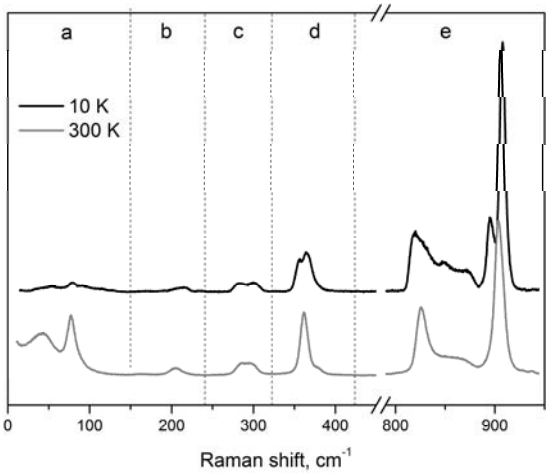


Рис. 1. Спектр КР оксифторида $Rb_2KMoO_3F_3$ при комнатной температуре (T = 300 K) и при T = 10 K:
а – диапазон решеточных колебаний; *б* – диапазон колебаний O–Mo–F; *в* – диапазон колебаний O–Mo–O; *г* – диапазон валентных колебаний Mo–F; *е* – диапазон валентных колебаний Mo–O [1])

Ранее [16] высокочастотная часть спектра, содержащая полносимметричные колебания связи Mo–O анионного октаэдра, была получена с низким разрешением (2 $см^{-1}$), и аппроксимирована только одним контуром Лоренца.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-31205 мол_а, № 11-02-98002, № 12-02-00056), Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8379.

В данной работе эта часть спектра была прописана с лучшим разрешением (0,7 $см^{-1}$), и анализ данной области спектра показал, что в этом диапазоне, в кубической высокотемпературной фазе присутствует две линии (рис. 2), хотя это колебание в кубической фазе не вырождено.

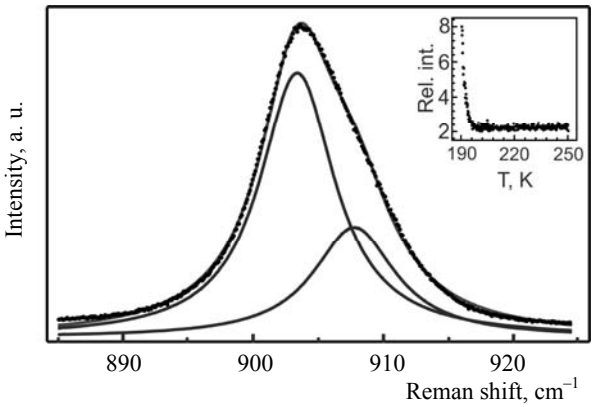


Рис. 2. Часть спектра, содержащая полносимметричное колебание Mo–O, разложенная на два контура Лоренца (на вставке – температурная зависимость относительной интенсивности данных линий)

При температуре $T \approx 185$ K происходит фазовый переход кристалла $Rb_2KMoO_3F_3$ (рис. 3). Исходя из существенных изменений спектральных параметров, данный фазовый переход является переходом первого рода. Основные изменения происходят в области полносимметричных колебаний Mo–O и Mo–F, а также в области решеточных колебаний, где число линий удваивается, указывая на увеличение объема элементарной ячейки, как минимум, в два раза.

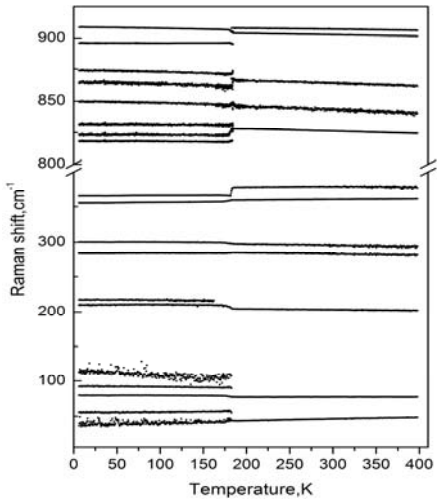


Рис. 3. Температурная трансформация спектра КР оксифторида $Rb_2KMoO_3F_3$

Хорошо виден резкий скачок в поведении частот в окрестности фазового перехода (рис. 4). Причем частота колебания Mo–O увеличивается ниже температуры фазового перехода (рис. 4, *а*), а частота колебания Mo–F, наоборот, уменьшается (рис. 4, *б*). Данные зависимости были аппроксимированы с учетом трех- и четырех-фононного взаимодействий, которые возникают вследствие ангармонизма решетки в отсутствия фазовых превращений [17]. Согласно [18], сдвиг частоты $\Delta\omega$ полносимметричного высокочастотного колебания (разница экспериментальных и теоретических значений) пропорциональна квадрату параметра порядка. Полученная зависимость (рис. 4, *в*) демонстрирует типичное поведение параметра порядка при фазовом переходе первого рода, далеком от трикритической точки.

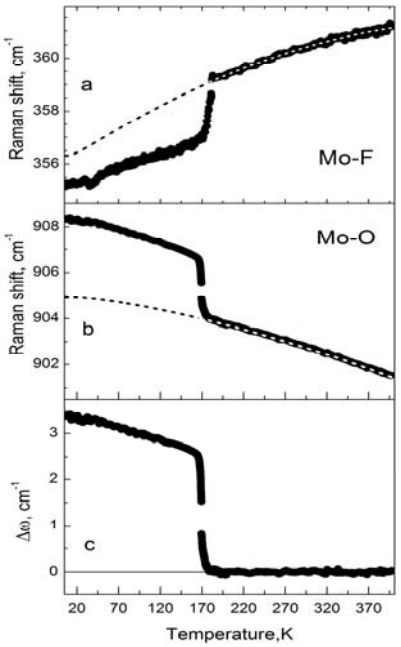


Рис. 4. Температурные зависимости частот полносимметричных колебаний Mo–F и Mo–O: *а*, *б* – теоретические аппроксимации; *в* – разница между экспериментальной частотой колебания Mo–O и теоретической

Ширины полносимметричных колебаний Mo–O и Mo–F также испытывают аномалии в окрестности фазового перехода (рис. 5). Полученные температурные зависимости ширин линий не характерны для твердого тела. Наблюдается ярковыраженное аномальное λ-образное поведение ширины линии полносимметричного колебания Mo–O и, в меньшей степени, полносимметричного колебания Mo–F. Такие аномальные зависимости указывают на то, что обнаруженный фазовый переход является фазовым переходом типа порядок-беспорядок, и отражают критические флуктуации параметра порядка в окрестности точки фазового перехода [19].

В упорядоченных эльпасолитах при гелиевых температурах ширины полносимметричных колебаний анионного октаэдра стремятся к значениям ~1–3 $см^{-1}$ [20–22]. Полносимметричное колебание 908 $см^{-1}$ в данном случае является параметром, связанным со степенью упорядочения октаэдра $[MoO_3F_3]^{3-}$.

Таблица 1

Собственные вектора «мягких» мод колебаний (*Z* = 4)

Атом	Координаты (*a*; *b*; *c*)	«Мягкие» моды и соответствующие собственные векторы							
		141*i*(2)	141*i*(2)	139*i*(2)	98*i*(2)	60*i*(2)	59*i*(2)	44*i*(2)	33*i*(2)
Rb	(0,25; 0,25; 0,.25)	(*x*;–*y*;0)	(–*x*;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)	(–*x*;0;0)	(0;0;0)
Rb	(0,25; 0,25; 0,75)	(*x*;–*y*;0)	(–*x*;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;0;0)
Rb	(0,25; 0,75; 0,25)	(–*x*;*y*;0)	(*x*;*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)	(–*x*;0;0)	(0;0;0)
Rb	(0,25; 0,75; 0,75)	(–*x*;*y*;0)	(*x*;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;0;0)
Rb	(0,75; 0,25; 0,25)	(–*x*;*y*;0)	(*x*;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;0;0)
Rb	(0,75; 0,25; 0,75)	(–*x*;*y*;0)	(*x*;*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)	(–*x*;0;0)	(0;0;0)
Rb	(0,75; 0,75; 0,25)	(*x*;–*y*;0)	(–*x*;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;0;0)
Rb	(0,75; 0,75; 0,75)	(*x*;–*y*;0)	(–*x*;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)	(–*x*;0;0)	(0;0;0)
K	(0,5 ;0,5; 0,5)	(–*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;–*y*;*z*)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)
K	(0; 0; 0,5)	(–*x*;*y*;*z*)	(–*x*;–*y*;–*z*)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)
K	(0; 0,5; 0)	(*x*;–*y*;*z*)	(*x*;*y*;–*z*)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)
K	(0,5; 0; 0)	(*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;*y*;*z*)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)
Mo	(0; 0; 0)	(–*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;–*y*;*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)
Mo	(0,5; 0,5; 0)	(–*x*;*y*;*z*)	(–*x*;–*y*;–*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)
Mo	(0,5; 0; 0,5)	(*x*;–*y*;*z*)	(*x*;*y*;–*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)
Mo	(0; 0,5; 0,5)	(*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;*y*;*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0,208; 0; 0)	(*x*;–*y*;*z*)	(*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0; 0,208; 0)	(*x*;–*y*;*z*)	(*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0; 0; 0,208)	(*x*;–*y*;*z*)	(*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0,708; 0,5; 0)	(*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;*y*;*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0,5; 0,708; 0)	(*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;*y*;*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0,5; 0,5 ;0,208)	(*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;*y*;*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0,708; 0; 0,5)	(–*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;–*y*;*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0,5; 0,208; 0,5)	(–*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;–*y*;*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0,5; 0; 0,708)	(–*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;–*y*;*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0,208; 0,5; 0,5)	(–*x*;*y*;*z*)	(–*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0; 0,708; 0,5)	(–*x*;*y*;*z*)	(–*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0; 0,5; 0,708)	(–*x*;*y*;*z*)	(–*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0,792; 0; 0)	(*x*;–*y*;*z*)	(*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0; 0,792; 0)	(*x*;–*y*;*z*)	(*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0; 0; 0,792)	(*x*;–*y*;*z*)	(*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0,292; 0,5; 0)	(*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;*y*;*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0,5; 0,292; 0)	(*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;*y*;*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0,5; 0,5; 0,792)	(*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;*y*;*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;*y*;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0,292; 0; 0,5)	(–*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;–*y*;*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0,5; 0,792; 0,5)	(–*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;–*y*;*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0,5; 0; 0,292)	(–*x*;*y*;–*z*)	(–*x*;–*y*;*z*)	(–*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;–*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0,792; 0,5; 0,5)	(–*x*;*y*;*z*)	(–*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(–*x*;0;0)
O/F	(0; 0,292; 0,5)	(–*x*;*y*;*z*)	(–*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;–*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)
O/F	(0; 0,5; 0,292)	(–*x*;*y*;*z*)	(–*x*;–*y*;–*z*)	(*x*;0;0)	(*x*;0;0)	(0;*y*;0)	(0;–*y*;0)	(0;0;*z*)	(*x*;0;0)

Ширина линии данного колебания ≈ 6 см$^{-1}$ при гелиевых температурах. Так как это значение в несколько раз превышает значения ширин линий полностью упорядоченных эльпасолитов, можо предположить, что полного упорядочения анионных октаэдров в исследуемом соединении не происходит даже при гелиевых температурах.

Расчет динамики решетки в рамках обобщенной модели Гордона–Кима. Для расчета динамики решетки эльпасолита $Rb_2KMoO_3F_3$ был использован обобщенный метод Гордона–Кима [23].

В высокотемпературной кубической фазе атомы F/O разупорядочены по всему кристаллу. Вследствие этого беспорядка, каждый октаэдр может равновероятно находиться в 20 различных состояниях (8 состояний с тригональной симметрией и 12 состояний с орторомбической симметрией C_{2v}).

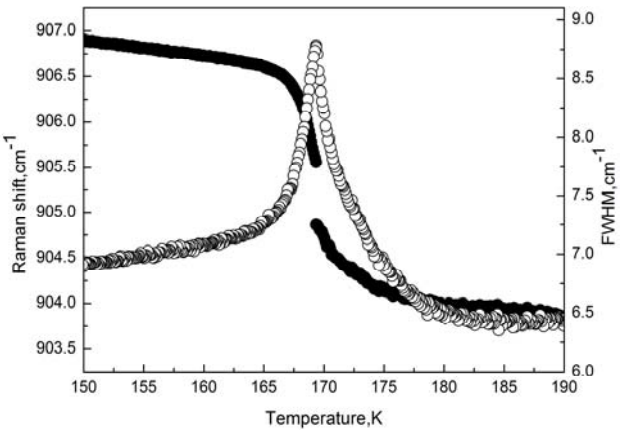


Рис. 5. Температурные зависимости частоты и ширины полносимметричного колебания Mo–O (белые кружки – ширина; черные кружки – частота)

В работе [13] было показано, что октаэдр $[MoO_3F_3]^{3-}$ преимущественно обладает тригональной симметрией (fac-конфигура-ция), поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только fac-конфигурации октаэдра.

Как уже было сказано, атомы анионов F/O разупорядочены по кристаллу в высокотемпературной кубической фазе. Для моделирования аналогичной ситуации в теории, была выбрана кубическая элементарная ячейка типа эльпасолита-криолита, содержащая четыре формульные единицы (Z = 4).

Чтобы смоделировать «усреднение» в кубической фазе $Fm\bar{3}m$, мы вычисляли динамические матрицы (собственные значения которых и являются частотами колебаний) 4096 структур, в которых перебирались все возможные ориентации октаэдра в fac- состоянии (4 октаэдра в элементарной ячейке, и каждый может находиться в 8 равновероятных ориентациях). Затем мы усредняли динамические матрицы и определяли частоты колебания.

Параметр решетки сохранялся кубическим, и определялся из условия минимума полной энергии (a_{cub} = 8,427 Å). Расчетный спектр «мягких» мод содержит частоты, принадлежащие как центру зоны Бриллуэна, так и ее граничным точкам. Поэтому в исследуемом кристалле возможны фазовые переходы с увеличением объема элементарной ячейки. Смещения атомов, соответствующие собственным векторам «мягких» мод представлены в табл. 1.

Таким образом, в кристалле эльпасолита $Rb_2KMoO_3F_3$ был обнаружен фазовый переход типа порядок-беспорядок при температуре $T \approx 185$ K в режиме охлаждения образца. Исходя их теоретических и экспериментальных результатов, можно предположить, что данный фазовый переход связан с изменениями в молекулярном октаэдре $[MoO_3F_3]^{3-}$ и может сопровождаться увеличением объема элементарной ячейки. В настоящее время вопрос об упорядочении F/O октаэдров и их роли при структурном фазовом переходе остается открытым. Необходимы дальнейшие исследования для определения симметрии низкотемпературной фазы и для понимания природы обнаруженного фазового превращения.

Библиографические ссылки

1. Raman scattering in ferroelectric materials with composition $A_2BMO_3F_3$ (A, B = K, Rb, Cs for $r_{A+} \geq r_{B+}$ and M = Mo, W) / M. Couzi, V. Rodriquez, J. P. Chaminade et al. // Ferroelectrics. 1988. Vol. 80. P. 109–112.

2. Effect of cationic substitution on ferroelectric and ferroelastic phase transitions in oxyfluorides $A_2A'WO_3F_3$ (A, A': K, NH_4, Cs) / V. D. Fokina, I. N. Flerov, M. V. Gorev et al. // Ferroelectrics. 2007. Vol. 347. P. 60–64.

3. Study of phase transitions in $A_3MO_3F_3$ compounds (A = K, Rb, Cs; M = Mo, W) / G. Péraudeau, J. Ravez, P. Haggenmuller, H. Arend // Solid State Comn. 1978. Vol. 27. P. 591–593.

4. A new family of ferroelectric materials with composition $A_2BMO_3F_3$ (A, B = K, Rb, Cs for $r_{A+} \geq r_{B+}$ and M = Mo, W) / J. Ravez, G. Péraudeau, H. Arend et al. // Ferroelectrics. 1980. Vol. 26. P. 767–769.

5. Péraudeau G., Ravez J., Arend H. Etude des transitions de phases des composes $Rb_2KMO_3F_3$, $Cs_2KMO_3F_3$ et $Cs_2RbMO_3F_3$ (M = Mo, W) // Solid State Comn. 1978. Vol. 27. P. 515–518.

6. Raman spectroscopic study of the phase transitions in the $Cs_2NH_4WO_3F_3$ oxyfluoride / A. S. Krylov, A. N. Vtyurin, V. D. Fokina et al. // Physics of the Solid State. 2006. Vol. 48. № 6. P. 1064–1066.

7. Raman scattering study of temperature and hydrostatic pressure phase transitions in Rb_2KTiOF_5 crystal / A. S. Krylov, S. V. Goryainov, A. N. Vtyurin et al. // J. Raman Spectrosc. 2011. Vol. 43. No. 4. P. 577–582.

8. Exploration on anion ordering, optical properties and electronic structure in $K_3WO_3F_3$ elpasolite / V. V. Atuchin, L. I. Isaenko, V. G. Kesler et al. // J. of solid state chemistry. 2012. Vol. 187. P. 159–164.

9. Vibrational spectroscopy studies of temperature phase transitions in $K_3WO_3F_3$ / A. A. Ekimov, A. S. Krylov, A. N. Vtyurin et al. // Ferroelectrics. 2010. Vol. 401. P. 168–172.

10. Les transitions de phase de l'oxyfluorure $Rb_3MoO_3F_3$ / G. Péraudeau, J. Ravez, A. Tressaud et al. // Solid State Comn. 1977. Vol. 23. P. 543–546.

11. Термодинамические свойства и структура оксифторида $Rb_2KMoO_3F_3$ и $K_2NaMoO_3F_3$ / Е. И. Погорельцев, Е. В. Богданов, М. С. Молокеев и др. // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. № 6. С. 1136–1145.

12. Heat capacity and structure of $Rb_2KMeO_3F_3$ (Me: Mo, W) elpasolites / A. V. Kartashev, M. S. Molokeev, L. I. Isaenko et al. // Solid state science. 2012. Vol. 14. P. 166–170.

13. Udovenko A. A., Laptash N. M. Orientational disorder in crystals of $(NH_4)_3MoO_3F_3$ and $(NH_4)_3WO_3F_3$ // Acta crystallographica. 2008. B64. P. 305–311.

14. Temperature-dependent Raman scattering study of multiferroic $MnWO_4$ / L. H. Hoang, N. T. M. Hien, W. S. Choi et al. // Raman Spectrosc. 2009. Vol. 41. P. 1005–1010.

15. Малиновский В. К., Пугачев А. М., Суровцев Н. В. Исследование сегнетоэлектрического фазового перехода в кристалле DKDP методом низкочастотного комбинационного рассеяния света // Физика твердого тела. 2008. Т. 50**.** № 6. С. 1090–1095.

16. Исследование динамики решетки оксифторида $Rb_2KMoO_3F_3$ методом комбинационного рассеяния света / А. С. Крылов, Е. М. Меркушова, А. Н. Втюрин, Л. И. Исаенко // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. № 6. С. 1191–1196.

17. Ramkumar C., Jain K. P., Abbi S. C. Raman scattering probe of anharmonic effects due to temperature and compositional disorder in III-V binary and ternary alloy semiconductors // Phys. Rev. B: Condens. Matter. 1996. Vol. 53. № 20. P. 13672–13681.

18. Petzelt J., Dvořák V. Changes of infrared and Raman spectra induced by structural phase transitions: I. General considerations // J. Phys. C: Solid State Phys. 1976. Vol. 9. P. 1571–1586.

19. Isotropic Raman line shapes near gas–liquid critical points: The shift, width, and asymmetry of coupled and uncoupled states of fluid nitrogen / M. Musso, F. Matthai, D. Keutel, K.–L. Oehme // J. Chem. Phys. 2002. Vol. 116. № 18. P. 8015–8027.

20. Baldinozzi G., Sciau Ph., Bulou A. Analysis of the phase transition sequence of the elpasolite (ordered perovskite) Pb_2MgTeO_6 // J.Phys.: Condens.Matter. 1997. Vol. 9. P. 10531–10544.

21. Lattice dynamics and Raman scattering spectrum of elpasolite Rb_2KScF_6: Comparative analysis / S. N. Krylova, A. N. Vtyurin, A. Bulou et al. // Physics of the Solid State. 2004. Vol. 46. P. 1311–1319.

22. Raman spectra and phase transitions in Rb_2KInF_6 elpasolite / A. S. Krylov, S. N. Krylova, A. N. Vtyurin et al. // Crystallography Reports. 2011. Vol. 56. P. 18–23.

23. Lattice dynamics calculation of the ionic crystals with ion dipole and quadrupole deformations: perovskite structure oxides / N. G. Zamkova, V. I. Zinenko, O. V. Ivanov et al. // Ferroelectrics. 2003. Vol. 283. P. 49–60.

A. S. Krylov, S. N. Sofronova, E. M. Kolesnikova, L. I. Isaenko

INVESTIGATION OF LATTICE DYNAMICS OF OXYFLUORIDE $Rb_2KMoO_3F_3$

In the work the complete Raman spectra of oxyfluoride $Rb_2KMoO_3F_3$ in the temperature range 7–260 K were obtained. The structural phase transition at $T \approx 185$ K was found. The lattice dynamics of disordered crystal was simulated, the calculated spectra contain the «soft» modes of oscillations.

Keywords: lattice dynamics, oxyfluorides, Raman scattering.

© Крылов А. С., Софронова С. Н., Колесникова Е. М., Исаенко Л. И., 2012

УДК 621.791

Р. А. Мейстер, В. В. Богданов, С. А. Готовко, А. Р. Мейстер

ВЛИЯНИЕ КОНДЕНСАТОРНОГО УМНОЖИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ ДУГИ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

При сварке на прямой и обратной полярности в углекислом газе проволоками диаметром 1,2 мм обеспечивается формирование швов при силе тока 12 А и более. На минимальных напряжениях разбрызгивание не наблюдается. При токах 12–20 А визуально фиксируется перенос металла в дуге без взрывных явлений.

Ключевые слова: минимальный ток, углекислый газ, плавящийся электрод, прямая и обратная полярность, осциллографирование, видеосъемка, перенос металла в дуге.

Получили распространение однофазные выпрямители с конденсаторным умножителем напряжения, которые применяются для ручной дуговой сварки и сварки в защитных газах [1]. Данные выпрямители чаще применяют в условиях малых предприятий, при ремонте автомобилей, сантехнических устройств и др. Ограничения, которые накладываются действующими стандартами на величину максимального тока из питающей сети напряжением 220 В в бытовых условиях (15 А) вынуждают уменьшать сварочный ток до 140 А [2]. Данные выпрямители просты по устройству, легко ремонтируются и, в сравнении с инверторными, обеспечивают уменьшение высших гармоник в питающей сети [3]. При сварке проволоками диаметром 0,8 и 1,2 мм в углекислом газе дуга горит устойчиво при силе тока 12–20 А, что позволяет сваривать сталь толщиной 0,5 мм и более [4].

Для однофазных выпрямителей рекомендуют разнообразные схемотехнические решения [2], при этом отмечается положительное влияние конденсаторов на перенос металла в дуге [5]. Но сведений об оптимальных схемотехнических решениях и сварочно-технологических свойствах выпрямителей с конденсаторным умножителем напряжения мало [5]. Успешно работающие выпрямители ВС-600 российского и украинского производства являются простейшими по устройству, но эти источники не обеспечивают формирование швов при токе менее 50 А, и зажигание осуществляется с нескольких касаний изделия вылетом.

В данной работе сравнивались сварочные свойства выпрямителя ВС-600 (г. Каховка) и двухфазного выпрямителя. Для умножения напряжения применялись электролитические конденсаторы емкостью 2 000 мкФ. Индуктивность дросселя со ступенчатым регулированием составляла 0,5–1,2 мГн. При питании выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжением 380 В от двух фаз возможно увеличение сварочного тока до 300–400 А без перегрузки питающей сети, но напряжение холостого хода в сравнении с однофазным питанием увеличивается не в 2,82, а в 2 раза [1].

Оценка сварочно-технологических свойств осуществлялась согласно ГОСТ 25616–83. Электрические параметры режимов фиксировались цифровым осциллографом С9-8. За переносом капель металла наблюдала цифровая камера с частотой 60 кадров/с при подсветке угольной дугой. Валики наплавлялись омедненными проволоками Св-08Г2С диаметром 0,8 и 1,2 мм на обратной и прямой полярности.

Установлено, что при питании дуги выпрямителем ВС-600 без конденсаторного умножителя напряжения на прямой полярности проволокой диаметром 1,2 мм не обеспечивается устойчивое зажигание дуги со стабильным формированием швов. При включении на прямую полярность конденсаторного умножителя хорошо формируются швы при следующих режимах: $U_{хх}$ = 27 В (с конденсаторами – в два раза больше), $V_п$ = 53,75 м/ч, $I_д$ = 23 А, $U_д$ = 22 В, $V_{св}$ = 4,6 м/ч; $V_п$ = 91,5 м/ч, $I_д$ = 45 А, $U_д$ = 23 В, $V_{св}$ = 4,6 м/ч.

По данным [6; 7], сварка на прямой полярности практически не применяется из-за неудовлетворительного формирования швов и повышенного разбрызгивания. Положительное влияние конденсаторов на устойчивое горение дуги показано в работе [8]. На приведенных выше режимах разбрызгивание минимальное. Валик, наплавленный в данных условиях на образец толщиной 2 мм, показан на рис. 1.

Рис. 1. Наплавленный валик
($I_д$=45 А, $U_д$=23 В, $V_{св}$=4,6 м/ч)

На рис. 2 показано, что на обратной полярности с отключенными конденсаторами ухудшается зажигание дуги и формирование швов (рис. 2, *а*), а также начало шва, наплавленного с конденсаторным умножителем напряжения проволокой диаметром 1,2 мм (рис. 2, *б*).

Для проволоки диаметром 0,8 мм на обратной полярности без конденсаторов формирование швов ухудшается (рис. 3).

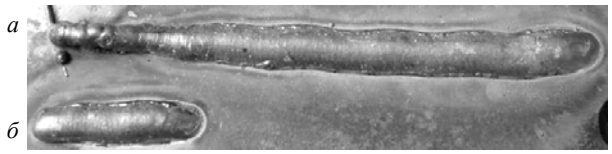


Рис. 2. Наплавленные валики ($V_п$ = 53,75 м/ч, $I_д$ = 32 А, $U_д$ = 22 В, $V_{св}$ = 4,6 м/ч):
а – без конденсаторов; *б* – конденсаторы включены

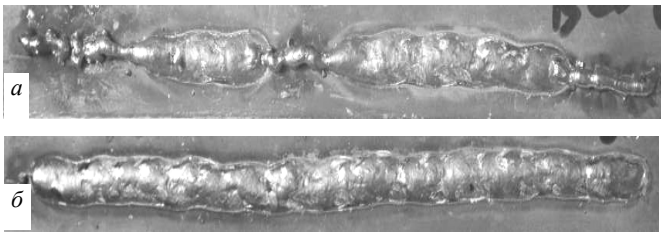


Рис. 3. Валики, наплавленные при $V_п$ = 205 м/ч, $I_д$ = 70 А, $U_д$ = 23 В, $V_{св}$ = 11,5 м/ч:
а – без конденсаторов; *б* – с конденсаторами

Полное проплавление без вытекания ванны обеспечивается при питании дуги от выпрямителя с двухфазным питанием 380 В на прямой полярности проволокой диаметром 0,8 мм при толщине образца 0,7 мм (рис. 4).

Рис. 4. Валик, наплавленный при $V_п$ = 205 м/ч, $I_д$ = 42,5 А, $U_д$ = 24 В, $V_{св}$ = 7,7 м/ч

Хорошее формирование швов наблюдается на обратной полярности при силе тока 20–95 А (рис. 5). Процесс протекает с короткими замыканиями дугового промежутка при частоте переноса 10–11 капель в секунду.

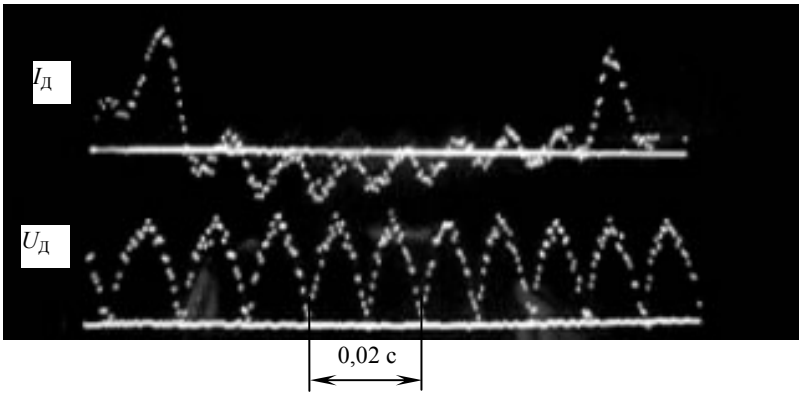


Рис. 5. Осциллограмма горения дуги при $V_п$ = 53,75 м/ч, $I_д$ = 37,5 А, $U_д$ = 26 В, $V_{св}$ = 4,4 м/ч

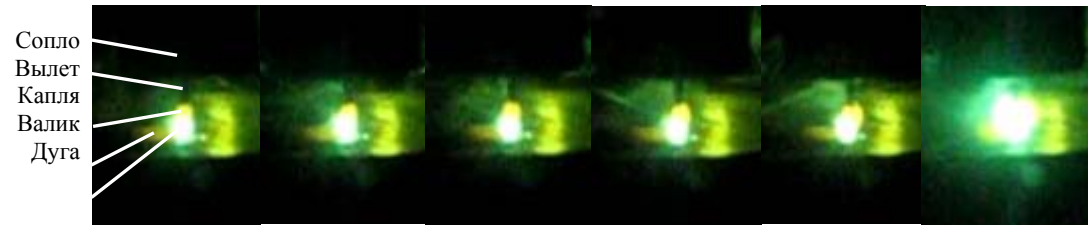


Рис. 6. Горение дуги ($I_д$ = 16,2 А, $U_д$ = 24 В, вылет 10–12 мм)

Горение дуги на прямой полярности с подсветкой угольной дугой при сварке проволокой диаметром 1,2 мм в углекислом газе представлено на рис. 6.

Судя по осциллограммам и видеограммам (рис. 5, 6) процесс горения дуги происходит с короткими замыканиями.

Без конденсаторов ухудшается зажигание дуги и наблюдаются длительные короткие замыкания. С конденсаторным умножителем напряжения в исследованной области режимов (до 100 А) формирование швов обеспечивается без заметного разбрызгивания.

По-видимому, передача энергии от дросселя и конденсаторов и повышенное напряжение холостого хода увеличивают разрывную длину дуги и саморегулирование.

Фиксируется перенос каплями крупного размера с частотой ~1 капля за 0,6 с (см. рис. 6). Судя по видеограммам, процесс протекает с короткими замыканиями. Разбрызгивание на данном режиме практически отсутствует.

При этом обеспечивается полное проплавление образца без вытекания ванны. При токах 12–20 А визуально фиксируется перенос металла в дуге без взрывных явлений.

Таким образом, конденсаторы улучшают устойчивость горения дуги при трехфазной и двухфазной схеме выпрямления. На прямой и обратной полярности обеспечивается формирование швов током 16 А и более.

Библиографические ссылки

1. Мейстер Р. А., Мейстер А. Р. Сварочные свойства однофазных выпрямителей: монография. Красноярск : Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2012.

2. Лебедев В. А., Романюк В. С. Однофазные источники сварочного тока для механизированной сварки в углекислом газе // Сварочное производство. 2004. № 1. С. 38–43.

3. Рымар С. В., Жерносеков А. М., Сидорец В. Н. Влияние однофазных источников питания сварочной дуги на электрическую сеть // Автоматическая сварка. 2011. № 12. С. 9–15.

4. Мейстер Р. А., Мейстер А. Р. Особенности зажигания и горения дуги на малых токах в углекислом газе // Сварочное производство. 2012. № 7. С. 30–32.

5. Экспериментальное исследование источников сварочного тока для полуавтомата с питанием от однофазной сети 220 В / В. А. Лебедев, А. В. Мотрий, А. Д. Глущенко, Н. И. Постолатий // Сварочное производство. 2006. № 12. С. 9–12.

6. Ленивкин В. А., Дюргеров Н. Г., Варуха Е. Н. Повышение устойчивости дуги при сварке плавящимся электродом прямой полярности в защитных газах // Сварочное производство. 1981. № 12. С. 28–30.

7. Березовский Б. М. Математические модели дуговой сварки : в 3 т. Т. 3. Давление дуги, дефекты сварных швов, перенос электродного металла. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2003.

8. Устойчивые режимы горения дуги на малых токах в углекислом газе / Р. А. Мейстер, М. А. Лубнин, С. А. Готовко, А. Р. Мейстер // Вестник СибГАУ. 2012. № 2 (42). С. 137–140.

R. A. Meyster, V. V. Bogdanov, S. A. Gotovko, A. R. Meyster

INFLUENCE OF CAPACITOR VOLTAGE MULTIPLIER ON ARC BURNING STABILITY IN THE CARBON DIOXIDE

During welding with forward and reverse polarity in carbon dioxide with wires of 1,2 mm diameter, formation of welded seams of of 12 amps or more , is provided. Spraying at the minimal voltages is not observed. Metal transfer in the arc without the explosive phenomena is fixed visually at currents 12–20 A.

Keywords: minimal current, carbon dioxide, consumable electrode, straight and reverse polarity, oscillography, video shooting, metal transfer in the arc.

© Мейстер Р. А., Богданов В. В., Готовко С. А., Мейстер А. Р., 2012

УДК 621.396.677

А. И. Оборина, И. В. Трифанов, Б. Н. Исмаилов, И. В. Стерехов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРУБ ВОЛНОВОДОВ КВЧ-ДИАПАЗОНА

Показаны результаты исследований технологических параметров при изготовлении труб волноводов из сплава 32НКД методом дорнования.

Ключевые слова: волновод, инструмент-дорн, величина обжатия, усадка, шероховатость поверхности.

Волновод – это искусственный или естественный канал, способный поддерживать распространяющиеся вдоль него волны, поля которых сосредоточены внутри канала или в примыкающей к нему области. В канале волновода обеспечивается полная экранировка электромагнитного поля. Энергия передается электромагнитным полем, находящимся между проводниками, а не током, текущим по самим проводникам. Роль проводников при этом сводится к роли устройств, направляющих электромагнитную энергию. В СВЧ-КВЧ диапазонах металлические волноводы имеют неоспоримые преимущества перед другими линиями передач.

Достоинства волноводов следующие:

– волновод обладает наибольшей простотой и жесткостью конструкции;

– волновод не имеет потерь на излучение, так как электромагнитное поле целиком заключено внутри трубы, если толщина стенок превышает глубину проникновения поля в металл,;

– потери в стенках волновода должны быть меньше, чем в проводниках обычных линий, например коаксиальных;

– пробивная прочность волновода выше, чем у коаксиальной или двухпроводной линии при максимальной напряженности электрического поля.

Основными недостатками волноводов СВЧ-диапазона является большие масса и габариты, трудности сопряжения с активными полупроводниковыми приборами, а также узкополосность. Ширина полосы составляет около 40 % средней частоты. Ограничения связаны с сильной дисперсией и возникновением условий для распространения других типов колебаний при высоких частотах.

В связи с освоением миллиметрового диапазона волн большое внимание уделяется разработке технологии изготовления волноводов КВЧ-диапазона круглого и прямоугольного сечения. Волноводы КВЧ-диапазона имеют меньшие габаритомассовые характеристики и поперечные размеры каналов, по сравнению с волноводами СВЧ-диапазона. К ним предъявляются более высокие требования по обеспечению точности канала 0,01 мм, снижению шероховатости рабочей поверхности Ra 0,16–0,2 мкм, повышению характеристик токопроводящего скин-слоя, которые являются частотнозависимыми, а также к температурной стабильности размеров (температурный коэффициент линейного расширения ТКЛР $(1…2)\cdot10^{-6}$ (1/ºС) должен быть минимальным).

Использование сплава 32НКД с низким ТКЛР для изготовления волноводов КВЧ-диапазона является актуальным. При изготовлении труб волноводов КВЧ – диапазона круглого сечения методом дорнования возникает некоторые технологические проблемы, которые взаимосвязаны и влияют на качество выпускаемых изделий (рис. 1) [1].

Качество труб волноводов может быть оценено точностью и шероховатостью канала волновода, а также низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР $(1…2)\cdot10^{-6}$ (1/ºС).

Из причинно-следственной диаграммы следует, что при изготовлении труб волноводов круглого сечения из сплава 32НКД конструкция инструмента-дорна, его геометрические и прочностные характеристики оказывают большое влияние на точность, шероховатость поверхности канала и температурный коэффициент линейного расширения. На температурный коэффициент линейного расширения труб волноводов из сплава 32НКД также существенно влияют степень деформации, режимы межоперационной термообработки и микроструктура после проведения дорнования и межоперационного отжига для снятия напряжений и стабилизации микроструктуры. Степень деформации определяется величиной обжатия заготовки трубы волновода, усилием протягивания, а также конструкцией инструмента-дорна и его геометрическими и прочностными характеристиками.

На точность канала трубы волновода большое влияние оказывают величины обжатия трубы-заготовки и усадки канала волновода (рис. 2) [1].

Ширина контакта рабочего конуса инструмента-дорна с заготовкой $L_ф$ из-за изгиба ее стенок оказывается существенно меньше геометрической ширины Lr. Геометрическую ширину вычисляют по формуле

$$L_r = a/2\sin\alpha, \quad (1)$$

где a – обжатие зубом, α – угол рабочего конуса инструмента.

Для обеспечения требуемого качества рабочей поверхности каналов труб волноводов необходимо обеспечить определенный уровень контактных давлений в зоне деформирования со стороны инструмента-дорна. Контактные давления исследовали для той же номенклатуры труб, что и при исследовании усилий дорнования.

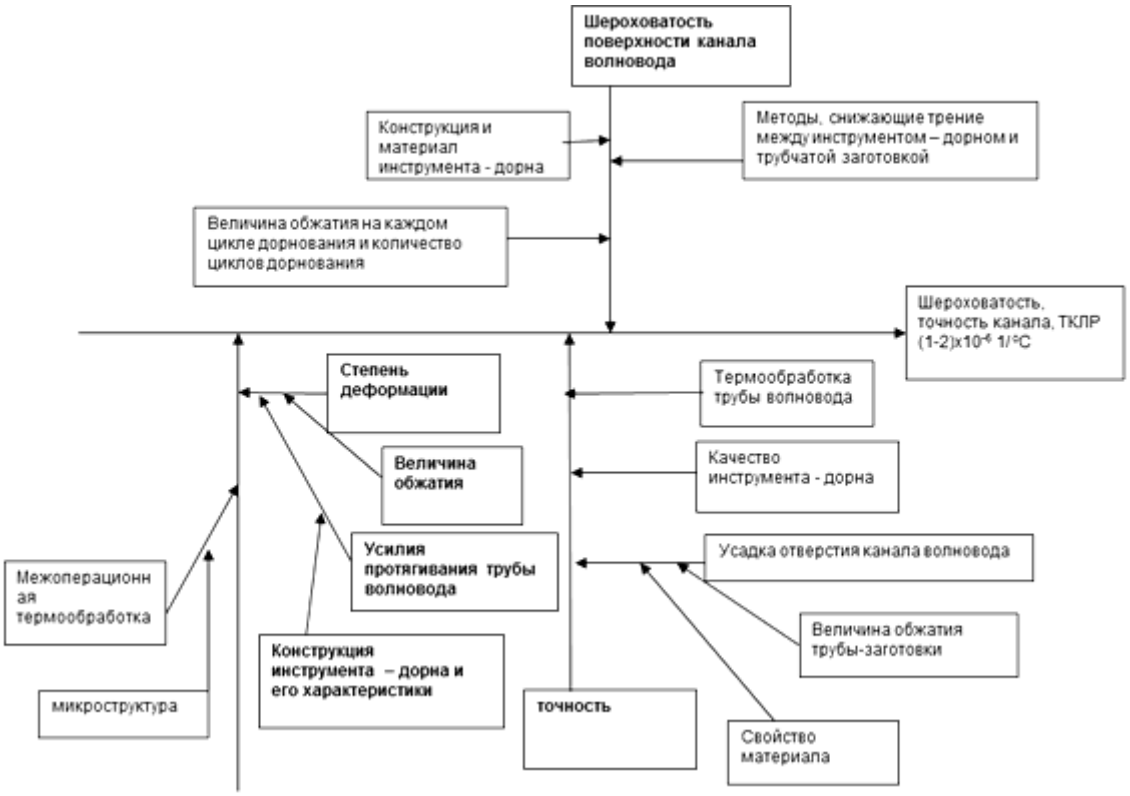


Рис. 1. Причинно-следственная диаграмма процесса изготовления и обеспечения качества труб волноводов

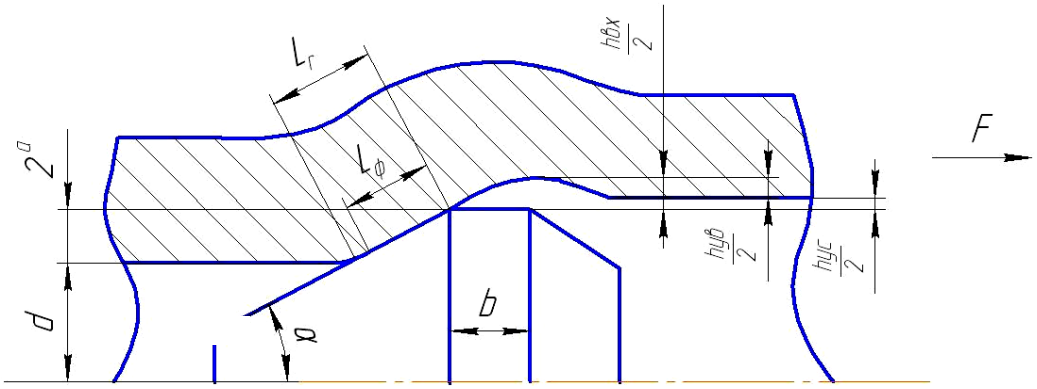


Рис. 2. Схема взаимодействия инструмента-дорна с трубчатой заготовкой

Средние контактные давления на рабочем конусе находят по следующей формуле [2]:

$$P = \frac{F}{\Pi d_c L_ф (\sin\alpha + f\cos\alpha)}, \qquad (2)$$

где F – усилие дорнования; d_c – диаметр рабочего конуса посреди ширины контакта; $L_ф$ – фактическая ширина контакта рабочего конуса инструмент-дорна; α – половина угла рабочего конуса инструмента-дорна; f – коэффициент трения между инструментом-дорном и трубчатой заготовкой.

Правомерность приравнивания усилия дорнования к усилию на рабочем конусе подтверждается результатами измерения усилия дорнования в зависимости от ширины b (рис. 2) цилиндрической ленточки инструмента – дорна. В работе [1] показано, что влияние ширины ленточки b на усилие дорнования F является слабым. Поэтому силами трения на ленточке при $b \le 3$ мм (рис. 2) можно пренебречь, приняв действующие на рабочем конусе усилие, равным усилию дорнования. При $D/d \le 3$ для тонкостенных труб волноводов заготовка в процессе дорнования может подвергаться сквозной пластической деформации. Материал заготовки в контактном слое находиться в условиях, близких к объемному сжатию. В остальной части заготовки напряженно-деформированное состояние приближается к состоянию трубы, подвергнутой воздействию равномерного внутреннего давления.

При дорновании средние контактные давления определяются величиной обжатия (а) (рис. 2), механическими свойствами материала заготовок и практически не зависят от диаметра канала трубы волновода. При малых обжатиях контактные давления могут достигать (6…9) $\delta_т$ предела текучести материала заготовки [1]. Для снижения шероховатости рабочей поверхности трубы волновода до требуемых параметров этого вполне достаточно. С увеличением обжатия контактные давления падают, а в области малых обжатий интенсивно возрастают. Это объясняется тем, что с повышением обжатия фактическая ширина контакта рабочего конуса инструмента-дорна с заготовкой растет быстрее, чем усилие дорнования F (рис. 3) [2].

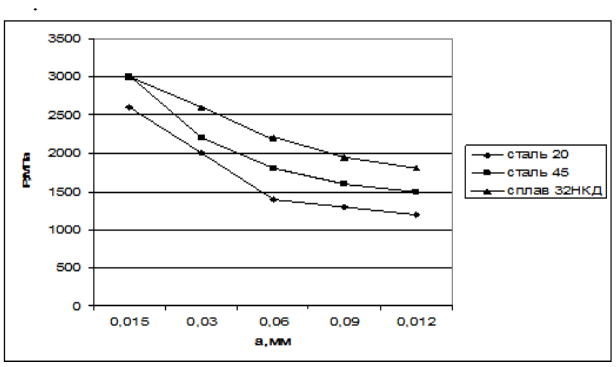


Рис. 3. Зависимость средних контактных давлений от обжатия (а) при дорновании отверстия

Эти зависимости носят нелинейный характер и показывают, что наибольшие средние контактные давления наблюдаются в области а = 0,012–0,015 мм. Для всех марок сталей эти наибольшие контактные давления при малых обжатиях используют на финишных операциях при изготовлении каналов малого сечения для обеспечения наименьшей шероховатости поверхности. Важным технологическим параметром для повышения качества труб волноводов являются усилия дорнования F (рис. 4).

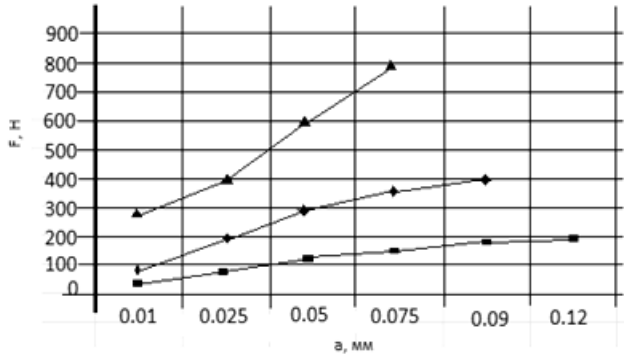


Рис. 4. Зависимость усилия дорнования каналов твердосплавным инструментом:
1 – медь М1, Ø – 3мм; 2 – медь М1, Ø – 1,4 мм;
3 – сплав 32 НКД, Ø – 3,4 мм

Полученные результаты показывают, что усилия дорнования при выбранных параметрах обжатия и толщины стенки трубчатой заготовки позволяют обрабатывать тонкостенные трубчатые заготовки с толщиной стенки h = 0,5–1,4 мм.

Усилия дорнования необходимо использовать для оценки прочности хвостовика инструмента-дорна, расчета инструмента-дорна, непосредственно трубчатой заготовки, подбора вида смазки, а также контактных давлений и других параметров. На основе экспериментальных исследований была получена зависимость для расчета усилий дорнования:

$$F = c\text{HB}d^x a^y = 1{,}235 d^{0{,}57} a^{1{,}345}\text{HB}, \qquad (3)$$

где c – коэффициент; НВ – твердость материала; d – диаметр канала трубчатой заготовки; а – величина обжатия трубчатой заготовки.

Согласно формуле 3, следует, что наибольшее влияние на увеличение F оказывают твердость материала обрабатываемой трубчатой заготовки и величина обжатия.

Дорнование труб волноводов может сопровождаться как положительной, так и отрицательной усадкой (разбивкой) отверстия ($h_{ус}$) [1] в зависимости от соотношения между неконтактной деформации $h_{вк}$ за рабочим конусом инструмента-дорна и упругим восстановлением материала заготовки $h_{ув}$.

При D/d < 3 дорнование отверстий может проводиться с большим обжатием, например, обработка заготовок из горячекатаных и холодно-деформированных труб D/d = 1,2–1,6 может производиться с суммарным обжатием а = (0,1–0,2)d и сопровождаться значительным изменением размеров заготовок. Точность диаметра отверстия канала может быть повышена в несколько раз (с 16–17 до 8–11 квалитетов) [1]. При высоких требованиях к точности отверстия труб волноводов (JT6-JT7) необходима их предварительная обработка резанием, например, расточка, зенкерование или развертывание. При реализации данного метода половина угла рабочего конуса инструмента-дорна α может составлять 5–6°, коэффициент трения f = 0,2–0,3, шероховатость рабочей поверхности $R_a \le 0{,}03$ мкм. При таких параметрах дорнование тонкостенных трубчатых заготовок целесообразно проводить путем их осевого растяжения за счет усилия дорнования F и протягивания самой заготовки относительно инструмента-дорна, неподвижно закрепленного в станке. Такая технологическая схема в сочетании с применением специальных установочных приспособлений позволяет обеспечить надежное базирование заготовки, снизить до минимума перекосы и изгиб хвостовика инструмента-дорна, закрепленного неподвижно.

Для изготовления каналов малого сечения требуется обеспечить высокую точность ±0,01 мм и шероховатость R_a 0,2…0,16 мкм [1]. Одним из эффективных методов обеспечения требуемого качества является выбор параметров дорнования а, F, α, f. Величина усадки отверстия H при дорновании от зависит от величины обжатия заготовки α и отношения δ_{02}/E, где δ_{02} – предел текучести материала заготовки; E – модуль упругости. Чем больше δ_{02}/E, тем больше усадка, что подтверждают полученные экспериментальные

зависимости. Кроме того, на усадку влияет величина обжатия и диаметр труб волновода:

$$H = f(\alpha, \delta_{02}/E, d), \quad (4)$$

где H – величина усадки, α – величина обжатия заготовки, d – диаметр заготовки.

Величину усадки необходимо учитывать при назначении допусков на диаметры отверстий высокоточных труб волноводов круглого сечения. По экспериментальным данным была получена зависимость усадки H от параметров δ_{02}/E, d, a в качестве регрессионной модели принято следующее соотношение:

$$H = b_0 + b_1 d + b_2(\delta_{02}/E) + b_3 a + b_4 d^n + b_5 d(\delta_{02}/E) + b_6 d a + b_7(\delta_{02}/E)^2 + b_8(\delta_{02}/E) + b_9 a^2. \quad (5)$$

После применения пакета статистического анализа, результаты которого представлены в табл. 1–3, определены по величинам критерия Стьюдента и равенству знаков последних двух столбцов табл. 3 значимые члены – в формуле (5), и получена величина усадки в натуральных значениях факторов:

$$H = 2d^2 + 4{,}308(\delta_{02}/E)^2 - 0{,}091\alpha^2. \quad (6)$$

На величину усадки труб волноводов, изготавливаемых из сплава 32НКД, наибольшее влияние оказывают свойства материала – отношение предела прочности к модулю упругости δ_{02}/E.

Таблица 1

Регрессионная статистика

Множественный R	0,9890
R-квадрат	0,9781
Нормальный R -квадрат	0,7986
Стандартная ошибка	0,6037
Наблюдение	20

На основании проведенных исследований можно сделать вывод: механика пластического деформирования в процессе деформирующего протягивания труб волноводов должна строиться по определенной технологической схеме. Дорнование каналов труб необходимо осуществлять за несколько переходов инструментами-дорнами с возрастающими диаметрами. При первом протягивании целесообразно использовать 30–40 % суммарного обжатия при дорновании, последующие переходы осуществляют с малыми обжатиями, при которых обеспечивается высокий уровень контактных давлений, что позволит получить высокое качество поверхности (низкую шероховатость и отсутствие трещин), а также требуемую точность канала. После трех циклов дорнования рекомендуется обжигать заготовки в среде аргона при температуре 800 °С. При обжатии на финишных операциях a = 0,05–0,01; R_a поверхности трубы волновода снижается на несколько порядков: от исходного R_a 1,8 до R_a 0.08 для сплава 32НКД после четырех циклов дорнования, а точность достигает JT7, ТКЛР $(1\ldots2)\cdot10^{-6}$ 1/°С.

Библиографические ссылки

1. Скворцов В. Ф., Арляков А. Ю. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра : моногр. Томск : Изд-во ТПУ, 2005.

2. Исследование параметров взаимодействия инструмента-дорна и заготовки при изготовлении каналов малого сечения / И. В. Трифанов [и др] // Вестник СибГАУ. Красноярск. 2007. Вып. 4 (17). С. 126–127.

3. Трифанов И. В., Стерехов И. В. Особенности повышения качества при изготовлении каналов волноводов малого сечения дорнованием // Решетневские чтения : материалы XI Междунар. науч. конф. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2007. С. 205–206.

Таблица 2

Дисперсионный анализ

Показатель	*df*	*SS*	*MS*	*F*	Значимость *F*
Регрессия	9	195,06	21,67	76,46	$4{,}9410^{-8}$
Остаток	12	4,37	0,36	–	–
Итого	21	199,44	–	–	–

Таблица 3

Регрессионный анализ

Показатель	Коэффициент	Стандартная ошибка	Статистика	Нижнее 95 %	Верхнее 95 %
Y-пересечение	–3,943	4,163	–0,947	–13,015	5,128
$d(b_1)$	–8,28	4,290	–1,930	–17,631	1,064
$\Delta_{02}/E(b_0)$	0	0	65535	0	0
$A(b_3)$	1,14	0,699	1,636	–0,379	2,66
$d^2(b_4)$	2	0,917	2,179	0,00035	3,99
$d\delta_{02}/E(b_s)$	0	0	65535	0	0
$da(b_6)$	–0,027	0,082	–0,334	–0,2078	0,152
$(\delta_{02}/E)2(b_7)$	4,308	0,532	8,092	3,148	5,469
$(\delta_{02}/E)a(b_8)$	0,251	0,358	0,703	–0,528	1,031
$a^2(b_9)$	–0,091	0,027	–3,362	–0,150	–0,0032

A. I. Oborina, I. V. Trifanov, B. N. Ismailov, I. V. Sterekhov

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF QUALITY DURING MANUFACTURE OF PIPES OF WAVEGUIDES OF EXTREMELY-HIGH FREQUENCY BAND

Results of researches of technological parameters during manufacture of pipes of waveguides from 32NKD alloy by method of mandreling.

Keywords: waveguide, tool – mandrel, value of pressing, shrinkage, surface roughness.

© Оборина А. И., Трифанов И. В., Исмаилов Б. Н., Стерехов И. В., 2012

УДК 537.6; 537.9

С. И. Попков, С. В. Семенов, А. В. Шабанов, Н. В. Волков, Н. В. Михашенок

ПОЛУЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ $LA_{0,75}CA_{0,25}MNO_3$*

Методом оптической зонной плавки отработаны режимы роста и синтезированы монокристаллы $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$. Рентгеноструктурные исследования, рентген-флюоресцентный анализ, а также проведенные исследования намагниченности и сопротивления указывают на то, что получены высококачественные монокристаллы.

Ключевые слова: монокристалл манганита, оптическая зонная плавка.

Замещенные оксиды марганца или манганиты $R_{1-x}A_xMnO_3$ (R – трехвалентные редкоземельные ионы La^{3+}, Nd^{3+}, Pr^{3+}, Sm^{3+} и др., A – двухвалентные ионы Ca^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+}, Pb^{2+}) до сих пор остаются предметом интенсивных исследований, поскольку данные материалы обладают богатой фазовой диаграммой и их физические свойства оказываются чувствительны к различным внешним воздействиям, таким как магнитное и электрическое поле, транспортный ток, оптическое облучение [1–6]. Это делает материалы на основе манганитов перспективными для практических применений в устройствах спинтроники. Такое многообразие свойств объясняется примесным фазовым расслоением в системах на субмикронном масштабе [5; 6], которое обычно реализуется в виде сосуществования проводящей ферромагнитной и диэлектрической фазы с локализованными носителями. Присущий манганитам эффект колоссального отрицательного магнитосопротивления объясняется увеличением доли проводящей ферромагнитной фазы под действием магнитного поля [1; 5; 6]. Основное состояние замещенных манганитов определяется такими факторами, как катионные радиусы атомов в позициях R, а также их разупорядочением [1]. Оно может быть как ферромагнитным металлическим, так и антиферромагнитным с зарядовым упорядочением, как, например, в системах $Pr_{0,65}(Ca_xSr_{1-x})_{0,35}MnO_3$ [7] и $La_{0,7-x}Nd_xPb_{0,3}MnO_3$ [8]. Такое изменение основного состояния в манганитах при допировании связано с конкуренцией различных взаимодействий, имеющих очень близкие значения по энергии, что позволяет системе находиться в состоянии фазового расслоения, при котором возможно сосуществование двух фаз с различными магнитными и электронными свойствами. Именно это и позволяет легко менять свойства системы при внешних воздействиях.

Цель данной работы заключается в отработке методики выращивания высококачественных кристаллов на примере системы $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$. Кроме того, необходимо составить характеристику на полученные монокристалл.

Синтез. Рост кристаллов был осуществлен в печи оптической зонной плавки FZ-T-4000-H (Crystal systems, Япония). Скорость роста составляла 5 мм в час, диаметр полученного стержня ~5 мм, длина ~ 9 см, мощность галогенных ламп 4 × 1 000 Вт, печи FZ-T-4000-H – 72 % от максимального значения (что приблизительно соответствует температуре плавления данного состава t_m ~ 2200–2300 °C). В нашем синтезе мы использовали в качестве газовой среды воздух, который продувался через зону плавления со скоростью 1 л/мин. При таком режиме стабильный монокристалл $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ начал стабильно расти с 6 см. Прекурсорами к поликристаллическому стержню, из которого получался монокристалл являлись следующие составы: MnO_2 (99,9 % metal basis), $CaCO_3$ (99,5 % metal basis) и La_2O_3 (99,995 % metal basis), которые смешивались и перетирались до однородного состояния. Полученная смесь гидростатически прессовалась в цилиндрические стержни диаметром 5–8 мм и 50–120 мм длиной. Стержни спекались на воздухе при температуре 1450 °C в течение 10 ч.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 8365.

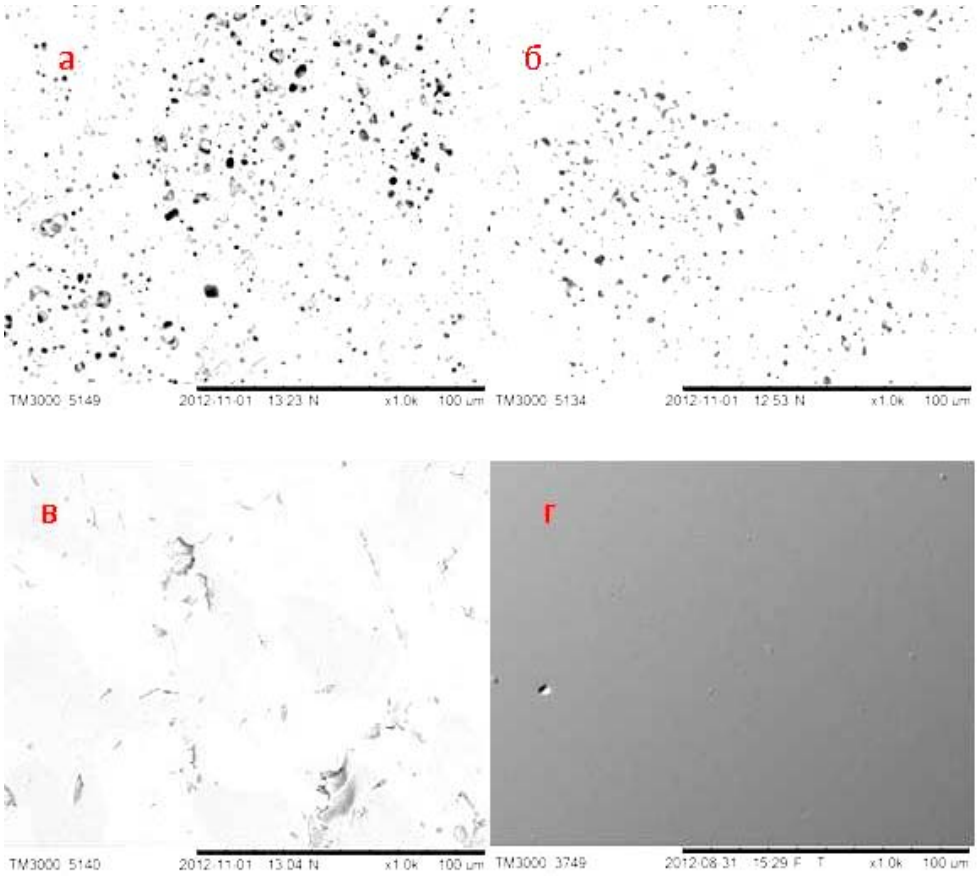


Рис. 1. Сканирующая электронная микроскопия перпендикулярных срезов образца на различных этапах роста:
а – начальная выращенная заготовка; *б*, *в* – промежуточные этапы роста;
г – конечный этап стабильного роста

Морфология образца по мере роста меняется: из исходного поликристалла, обладающего пористой структурой, в конечном итоге синтезируется однородный монокристалл (рис. 1). Рентгено-флюоресцентный анализ (РФА) среза показал, что соотношение элементов соответствует химической формуле $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$.

Монокристаллы $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ обладают ромбической структурой. Таким образом, в процессе синтеза был получен высококачественный монокристалл диаметром 0,5 см, длиной 3 см, пригодный для дальнейших исследований.

Измерения температурных зависимостей сопротивления образца R(T), температурных и полевых зависимостей намагниченности M(T) и M(*H*) при значениях внешнего магнитного поля до 9 Т проводились на установке PPMS – 6000 (Quantum Design) (рис. 2). По данным РФА, одним из основных параметров, характеризующих различие данных срезов образцов (см. рис. 1), является отношение Ca/Mn в соединении $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$. Оказалось, что данное отношение меняется по мере роста монокристалла. Таким образом, по мере роста кристалла наблюдается перераспределение кальция по длине стержня и достижение его равновесного содержания при стабильном росте монокристалла (срез (*г*)), что соответствует исходной закладке элементов.

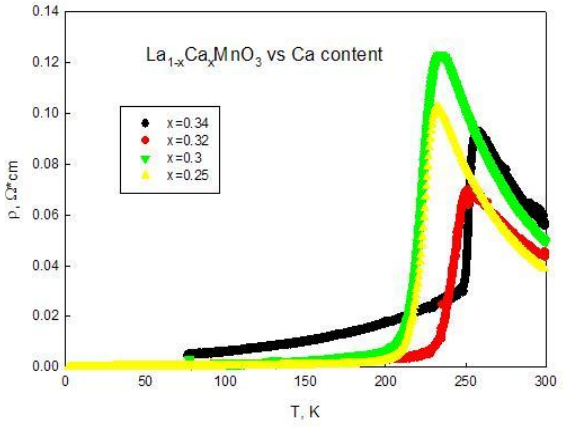


Рис. 2. Зависимости ρ(T) для $La_{1-x}Ca_xMnO_3$ от содержания кальция x = 0,25; 0,3; 0,32; 0,34

Также на рис. 2 видно, что температура перехода металл-диэлектрик монотонно уменьшается с уменьшением концентрации кальция, что полностью согласуется с фазовой диаграммой системы $La_{1-x}Ca_xMnO_3$ [5]. Следует отметить, что одним из критериев, характеризующих качество синтезируемых образцов замещенных манганитов лантана, является амплитуда изменения сопротивления после перехода металл-диэлектрик (рис. 3).

Максимальное уменьшение сопротивления после перехода металл-диэлектрик (практически на три порядка) демонстрирует образец с x = 0,25. Такое значение соответствует лучшим кристаллам, синтезируемым в мире. Именно этот образец и исследуется в дальнейшем.

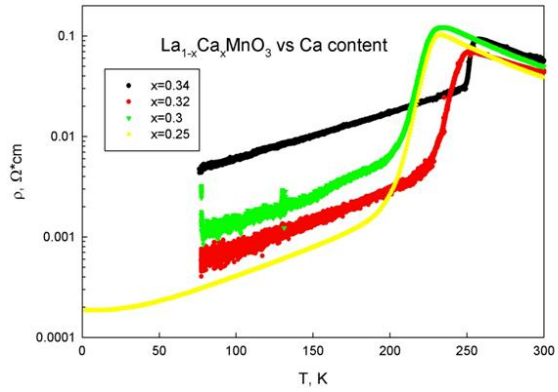


Рис. 3. Зависимости ρ(T) в координатах ln(ρ) – T

Для проведения магнитотранспортных исследований из синтезированного монокристаллического стержня был выпилен прямоугольный образец с размерами 2 × 2 × 5 мм^3, на котором проводились транспортные измерения и получены зависимости удельного электросопротивления ρ(T) при различных значениях внешнего магнитного поля H = 0 и 9 Тесла (рис. 4). Зависимости ρ(T, H) имеют типичный для замещенных манганитов лантана вид, характеризуются переходом металл-диэлектрик, и отрицательным магнитосопротивлением (MR). Значение MR = [(ρ(0T) – ρ(9T))]/ ρ(0T) при T = 232 К (температура перехода металл-диэлектрик) составляет 97 %.

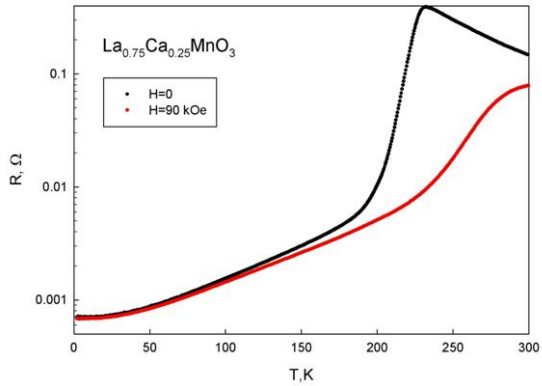


Рис. 4. Зависимости R(T) монокристалла $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ во внешних магнитных полях H = 0, 90 кЭ

При измерении монокристалла $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ была получена температурная зависимость намагниченности, измеренная во внешнем магнитном поле H = 10 кЭ, которая является типичной для ферромгнетика (температура Кюри T_C = 240 К) (рис. 5). Эта температура близка к температуре перехода металл-диэлектрик и составляет T_{MI} = 232 K. Такое расхождение T_C и T_{MI} типично для качественных монокристаллов замещенных манганитов лантана.

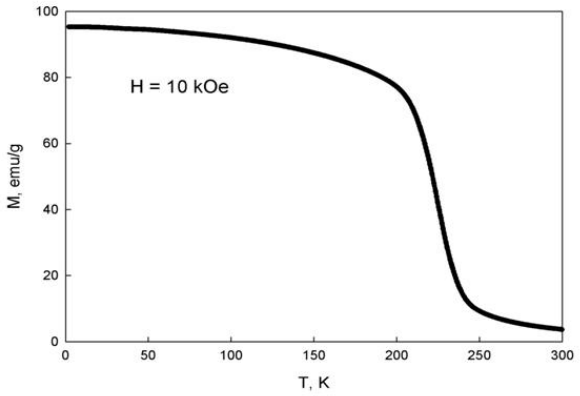


Рис. 5. Зависимость M(T) монокристалла $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$, снятая во внешнем магнитном поле, H = 10 кЭ

Таким образом, в ходе работ по синтезу оксидных монокристаллов методом оптической зонной плавки отработаны режимы роста и синтезированы высококачественные монокристаллы состава $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$. Рентгеноструктурные исследования, рентген-флюоресцентный анализ, а также проведенные исследования намагниченности и сопротивления указывают на то, что получены высококачественные монокристаллы.

Библиографические ссылки

1. Intrinsic inhomogeneity in a $(La_{0,4}Eu_{0,6})_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$ single crystal: Magnetization, transport, and electron magnetic resonance studies / N. Volkov, G. Petrakovskii, K. Patrin et al. // Phys. Rev. 2006. B 73. P. 104401.

2. Visualization of the Local Insulator-Metal Transition in $Pr_{0,7}Ca_{0,3}MnO_3$ / M. Fiebig, K. Miyano, Y. Tomioka, Y. Tokura // Science. 1998. Vol. 280. P. 1925.

3. Current switching of resistive states in magnetoresistive manganites / A. Asamitsu, Y. Tomioka, H. Kuwahara, Y. Tokura // Nature. 1997. Vol. 388. P. 50–52.

4. T. Wu, J.F. Mitchell Creation and annihilation of conducting filaments in mesoscopic manganite structures // Phys. Rev. 2006. B Vol. 74. P. 214423.

5. Tokura Y. Colossal magnetoresistive oxides (Advances in Condensed Matter Science) // New York Taylor & Francis Ltd. 2000.

6. Нагаев Э. Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитосопротивлением // УФН Т. 1996. 166. № 8. С. 833.

7. Bandwidth-control-induced insulator-metal transition in $Pr_{0,65}(Ca_{1-y}Sr_y)_{0,35}MnO_3$ and $Pr_{0,7}Ca_{0,3}MnO_3$ / H. Yoshizawa, R. Kajimoto, H. Kawano // Phys. Rev. 1997. B. Vol. 45. P. 2729.

8. Effect of rare-earth-site cations on the physical properties of $La_{0,7-y}Nd_yPb_{0,3}MnO_3$ single crystals / N. Ghosh, S. Elizabeth, H. L. Bhat et al. // Phys. Rev. 2004. B. Vol. 70. P. 184436.

S. I. Popkov, S. V. Semenov, A. V. Shabanov, N. V. Volkov, N. V. Mikhashenok

SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF HIGH-QUALITY SINGLE CRYSTALS $LA_{0,75}CA_{0,25}MNO_3$

Growth modes of single crystals $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ are developed with optical floating zone technique. X-ray, RFA, magnetization and resistivity studies performed on the crystals point out that high-quality single crystals are obtained.

Keywords: single crystal of manganite; optical floating zone technique.

© Попков С. И., Семенов С. В., Шабанов А. В., Волков Н. В., Михашенок Н. В., 2012

УДК 29.19.22

В. Н. Саунин, С. В. Телегин

МАГНИТОЖЕСТКИЕ ПЛАЗМОНАПЫЛЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ SM–CO-СПЛАВОВ

Предложен способ получения магнитожестких покрытий методом плазменного напыления на основе Sm-Co сплавов, полученных электродуговым методом. Исследовано влияние технологических параметров процесса напыления и термообработки на структуру и магнитные свойства покрытий.

Ключевые слова: сплав Sm-Co, коэрцитивная сила, плазмотрон, напыление.

Магнитожесткие материалы характеризуются высокими значениями остаточной индукции B_r, коэрцитивной силы H_c, а также максимальной магнитной энергией. Кроме этого, магнитные свойства должны быть стабильными во времени [1] и при воздействии окружающей среды, а именно: механических нагрузках [2], радиации, наличии внешних магнитных полей или ферромагнитных масс, температуры [3–5].

Редкоземельные элементы могут с переходными металлами и незаполненной электронной 3d-оболочкой образовывать соединения, названные интерметаллическими. При комнатной температуре они являются ферромагнетиками и характеризуются очень сильным магнитным полем – остаточной индукцией почти вдвое большей, чем у ферритов, высоким значением размагничивающего поля (коэрцитивной силой) и магнитной энергией, уровень которой превосходит все максимальные значения, известные еще до появления этих соединений. Они имеют чрезвычайно высокую магнитокристаллическую анизотропию с полями, достигающими 300 кЭ, и намагничиванием до насыщения, близкого к 12 000 Гс.

Сплав RCo_5-системы (редкоземельный металл-кобальт) из числа многих интерметаллических соединений имеет гексагональную структуру с низкой симметрией, высокую магнитную кристаллографическую анизотропию, сравнительно высокую температуру Кюри и высокое значение намагниченности насыщения. Магнитные моменты редкоземельных металлов и кобальта действуют параллельно, поэтому в качестве материалов для постоянных магнитов желательно применять соединения кобальта (RCo_5) с редкоземеньными металлами: иттрием, лантаном, церием, празеодимом, самарием и другими металлами.

Магнитные характеристики постоянных магнитов, полученных литьем из интерметаллических соединений, зависят:

– от состава сплава;

– чистоты входящих в него элементов;

– влияния входящих в него элементов;

– способа плавки и использованной атмосферы;

– стабилизирующей термической обработки (оптимальная температура стабилизирующего отжига, продолжительность отжига, атмосфера в печи, критическая скорость охлаждения), температуры и продолжительности отпуска;

– структуры сплава.

Перечисленные факторы определяют сложность поставленной задачи установления оптимальных условий тем более, что взаимозависимость факторов не поддается расчету.

Фирма Philips изготовила магнит из стандартного соединения $SmCo_5$ с характеристиками: B_r = 8,7 кГс, H_c = 8,4 кЭ,

$$(BH)_{max} = 18{,}5 \text{ МГс·Э}.$$

Если при изготовлении порошковых магнитов на основе соединений RCo_5 обеспечить высокую плотность, то стабильность характеристик этих магнитов повышается.

У сплавов редкоземельных элементов с кобальтом большая спонтанная намагниченность достигается лишь в тех соединениях, у которых подрешетки редкоземельного элемента и кобальта дают ферромагнитное упорядочение. Для оптимального использования большой спонтанной намагниченности в постоянном магните необходимо создать совершенную текстуру высокой плотности, что достигается специальными способами прессования и спекания.

Дислокации, точечные дефекты, включения других фаз, неизбежно присутствующих в реальных материалах, при большой магнитострикции могут оказывать определяющее влияние на коэрцитивную силу. Поэтому одна из важных задач состоит в выборе технологических приемов, обеспечивающих создание структуры дефектов кристаллического строения, соответствующих максимальной коэрцитивной силе.

Энергия постоянных магнитов на основе сплавов $SmCo_5$ в настоящее время подошла к теоретическому пределу. Однако коэрцитивная сила получаемых спеканием магнитов не превышает 15…20 кЭ. Низкие значения коэрцитивной силы можно объяснить дефектами порошков, возникающими от окисления трещин при помоле и ростом размеров кристаллов в процессе спекания и термообработки, которые приводят к низким значениям точки Кюри сплава, что значительно снижает стабильность постоянных магнитов при температуре 100…300 ºС.

Следовательно, для повышения стабильности постоянных магнитов во время эксплуатации при повышенных температурах необходимы высокие значения коэрцитивной силы.

При плазменном напылении постоянных магнитов можно получить покрытия с низким уровнем окисления (менее 0,2 %) и мелкокристаллической структурой, а следовательно, с высокими значениями стабильности магнитных характеристик.

Для формирования постоянных магнитов на основе порошков сплавов переходных металлов и редкоземельных элементов нами предложен и реализован метод плазменного напыления, который позволяет получать покрытия толщиной от 50 мкм до 10 мм и выше на поверхности деталей сложной геометрической формы, состоящей из различных материалов (металлических, керамических, термопластиковых, углепластиковых, на тканой основе). В процессе выполнения исследований по плазменному напылению сплавов Sm–Co впервые в России получены изотропные магниты с уникальным значением коэрцитивной силы около 60 кЭ [6].

Приготовление порошков осуществлялось в лабораторных условиях из сплавов, полученных электродуговой плавкой в среде инертных газов (аргон, гелий и их смеси). В качестве катода применялся неплавящийся электрод, выполненный из торированного вольфрама, установленного в медный водоохлаждаемый корпус. Тигель-анод изготавливался из меди, внутренняя полость которого представляла собой полусферу, и охлаждался водой, что обеспечивало образование направленной кристаллизации слитка от периферии к центру. Полученный слиток весил 100 г и легко разрушался при грубом помоле. Для повышения однородности проводилась повторная плавка слитка, прошедшего грубый помол, с добавлением корректирующего модификатора, обеспечивающего заданный химический состав.

Грубый помол осуществлялся на гидравлическом прессе в контейнере, представляющем собой пуансон и матрицу, усилие разрушения слитка составляло 50 т. Внутренняя полость контейнера перед прессованием заполнялась аргоном. Полученный брикет разрушался в керамической ступке. Разрушение брикета, грубый помол и предварительный просев порошка через сито с ячейкой 1 мм проводились в боксе для работы с радиоактивными материалами в среде аргона.

Тонкий помол порошка до фракции 10 мкм осуществлялся на вибростенде в герметичном стакане, заполненном аргоном, с набором металлических шаров различного диаметра: от 5 до 15 мм. Выгружали порошок из стакана, отделяли его от шаров, затем загружали в герметичную рабочую полость питателя в боксе. Таким образом, на всех технологических переходах приготовления порошка исключался его контакт с атмосферным кислородом.

Полученные порошки с размером от 1 до 10 мкм – тяжелые, неаэрируемые, коагулируют между собой, напоминая консистентную смазку. Такие порошки трудно дозировать и транспортировать по типовым пневмопроводам. Поэтому существующие устройства на различных принципах подачи (аэрационные, вибрационные, шнековые, роторные и др.) не могут обеспечить точное дозирование и приготовление однородной пылегазовой смеси.

Для осуществления возможности формирования образцов постоянных магнитов плазменным методом из таких порошков была разработана и создана оригинальная конструкция электромеханического питателя [7] для прецизионного дозирования малого количества порошка весом до 100 г. В предложенной конструкции питателя порошок принудительно вытесняется с вращением из полости приемной камеры через зазор в мембране в полость смесительной камеры, где равномерно смешивается с транспортирующим газом. Смесительная камера непосредственно стыкуется с аксиальным транспортирующим каналом плазмотрона.

Для напыления были подготовлены порошки с различным содержанием самария (33, 37, 39, 40, 42 вес. %) в исходном сплаве.

Плазменное напыление порошков осуществлялось в камере в среде отработанных инертных газов на наружную поверхность водоохлаждаемого цилиндрического кольца диаметром 16 мм и высотой 20 мм из алюминиевого сплава. Толщина напыленного слоя составляла 2 мм (табл. 1).

Основа отделялась от покрытия на токарном станке.

Морфология покрытия изучалась на металлографическом микроскопе JANEVERT с автоматизированным комплексом по обработке изображений IBAS-2000. Плотность образцов измерялась методом гидростатического взвешивания. Рентгенографические исследования проводились автоматизированным дифрактометром ДРОН-3 на образцах в виде порошка фракцией 1 мкм, приготовленных из слитка и напыленного покрытия. В рентгенографических исследованиях использовалось нефильтрованное излучение железного катода.

Таблица 1

Параметры процесса напыления

Параметр	Единица измерения	Значение
Напряжение катод-анод U	В	67
Ток дуги I	А	200
Мощность дугового разряда плазмотрона W	кВт	13,4
Расход порошка $q_п$	г/с	1
Размер частиц порошка $q_{чп}$	мкм	1…10
Расход плазмообразующего газа аргона $q_а$	л/с	1,5
Расход транспортирующего газа гелия $q_г$	л/с	2
Дистанция напыления L	мм	80
Скорость взаимного перемещения вдоль оси вращения V	мм/об	3
Скорость вращения образца ω	об/мин	60
Расход охлаждающей жидкости $q_ж$	л/мин	6

Таблица 2

Магнитные характеристики сплавов

Весовое содержание Sm в сплаве, %	Коэрцитивная сила H_c, э	Намагниченность насыщения σ_m, г·см^3/г	Остаточная намагниченность σ_r, г·см^3/г
33	10	36	26
37	6	61	37
39	12	44	33
40	55	39	33
42	33	35	26

Образцы для магнитных измерений на вибромагнитометре размером 2 × 2 × 2 вырезались из покрытия методом электроэрозионной обработки с последующей огранкой и обкаткой на шлифовальном круге, превращаясь в шарики диаметром 1,8…2 мм. Перед измерением размагничивающей части петли гистерезиса на вибромагнитометре [8] образец, помещенный в кювету, намагничивался в импульсном магнитном поле 200 кЭ, ориентировался легкой осью и фиксировался парафином.

Термообработка образцов осуществлялась в герметичной керамической трубке с установленным во внутренней полости нагревательным элементом. Серия из 5…6 образцов помещалась в танталовый контейнер, который устанавливался в кювету, выполненную так же из тантала, и засыпался геттером сплава Sm–Co, с повышенным содержанием самария (67 %). Кювета закреплялась на конце соломки, в отверстиях которой проходили электроды термопары, ее спай имел тепловой контакт с корпусом контейнера. Через отверстия в соломке во внутреннюю полость кюветы подавался гелий. Кювета размещалась в центральной части кольцевого нагревательного элемента. Подачей гелия вытеснялся воздух из полости трубки, затем включался нагревательный элемент, и автоматическая система обеспечивала заданную температуру и время отжига. После отжига внутренняя полость контейнера резко захолаживалась гелием.

Из исходных порошков с различным химическим составом были напылены покрытия по параметрам, представленным в табл. 1, и приготовлены образцы.

Исследованная структура покрытия характерна для монолитной, не содержащей включений и микропор. Плотность образцов составляла 99,9 % от литого сплава.

В процессе напыления с высокой температурой плазменной струи, при которой происходит расплавление порошка, наиболее летучий компонент сплава Sm испаряется, поэтому результатом сформированного плазмонапыленного покрытия будет химический состав, структура образцов и соответствующие им магнитные характеристики (табл. 2): коэрцитивная сила, намагниченность насыщения и остаточная намагниченность.

Известно, что фаза $SmCo_5$ с гексагональной структурой обладает наибольшими значениями магнитной анизотропии и коэрцитивной силы. По всей вероятности, в напыленном образце с исходным содержанием Sm в сплаве 40 вес % и коэрцитивной силой 55 кЭ, будет максимальное количество фазы $SmCo_5$. Коэрцитивная сила исходного сплава близка к нулю. И, следовательно, можно предположить, что в процессе затвердевания расплава образуется в основном фаза Sm_2Co_7.

Для подтверждения этих предположений сделали рентгеноструктурный анализ порошка исходного сплава и плазмонапыленного покрытия.

На рентгенограмме для порошка исходного сплава с содержанием 40 вес. % Sm (рис. 1) наблюдался явно выраженный узкий рефлекс при 2θ = 53°, соответствующей фазе Sm_2Co_7 и расположенными на склонах плечами фазы $SmCo_5$, что характерно для неоднородного кристаллического сплава.

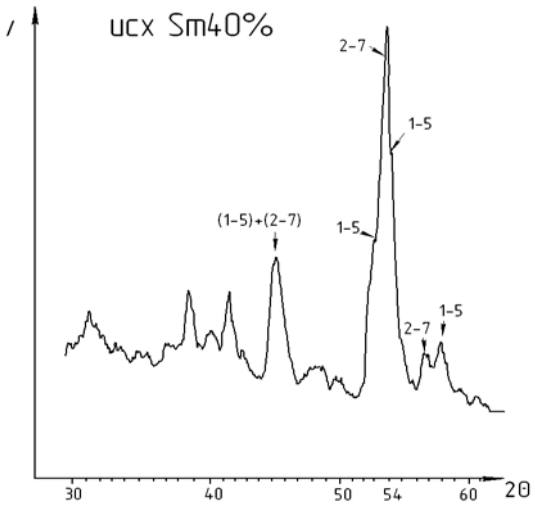


Рис. 1. Рентгенограмма порошка исходного сплава:
1–5 – $SmCo_5$; *2–7* – Sm_2Co_7

Как следует из анализа дифрактограмы, наиболее интенсивные линии фаз Sm_2Co_7 и $SmCo_5$ находятся в углах 2θ от 35 до 60°, причем самые сильные линии этих соединений лежат очень близко друг к другу. Это вызвано тем, что структуры этих соединений родственны, и межплосткостные расстояния близки. Наложение самых интенсивных линий различных фаз затрудняет проведение фазового анализа и снижает его точность. Однако линии, соответствующие отражению от базисных и призматических плоскостей этих соединений, не перекрываются, и это позволяет заметить присутствие второй фазы, если ее количество превышает 5…10 %.

Дифрактограмма напыленного покрытия приведена на рис. 2. Обработка дифрактограммы показала, что содержание самария в напыленном покрытии составляет примерно 37 %, следовательно 3 % Sm испарилось при термосиловом взаимодействии плазменной струи и напыляемого порошка. Преобладающее количество, приблизительно 2/3 объема напыляемого покрытия, соответствует фазе $SmCo_5$, а оставшееся количество объема принадлежит фазе Sm_2Co_7.

Следовательно, предположение о том, что высокое значение коэрцитивной силы будет у покрытия из исходного сплава с 40 вес. % Sm, оказалось верным.

Результаты исследования стабильности магнитных характеристик плазмонапыленного покрытия от температуры термообработки приведены на рис. 3.

Видно, что значения коэрцитивной силы не изменяются до температуры 500 ºС, остаточная намагниченность при этом незначительно повышается, а намагниченность насыщения повышается с 40 до 53 гс·см^3/г. Такое поведение магнитных характеристик сохраняется в диапазоне до 500 ºС при многократных повторяющихся режимах термообработки, что свидетельствует о высокой термостабильности магнитных свойств плазмонапыленных изотропных постоянных магнитов.

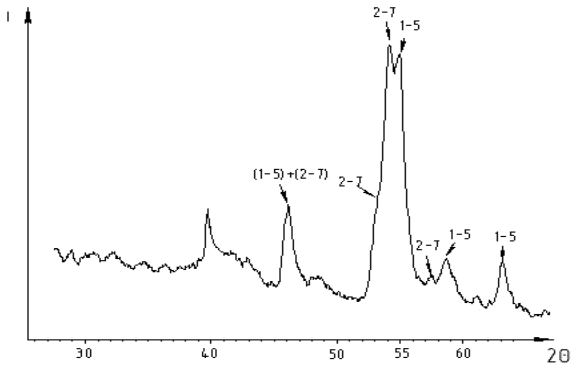


Рис. 2. Рентгенограмма напыленного покрытия:
1–5 – $SmCo_5$; *2–7* – Sm_2Co_7

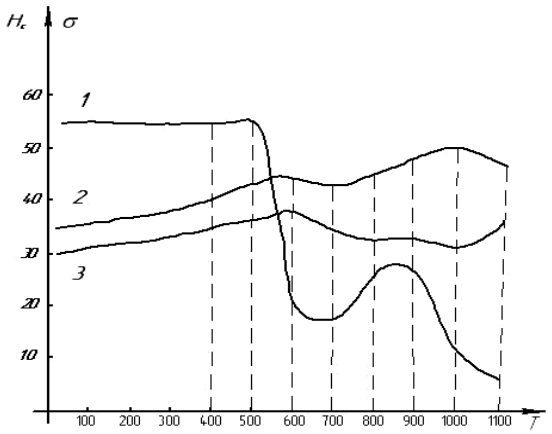


Рис. 3. Зависимости магнитных характеристик от температуры:
1 – коэрцитивная сила; *2* – остаточная намагниченность;
3 – намагниченность насыщения

Размагничивающий участок петли гистерезиса таких магнитов близок к прямоугольной, а максимальная магнитная энергия W_{max} достигает значений 9,6 Мгс·Э.

Проведенные исследования позволили получить плазмонапыленные изотропные высокостабильные постоянные магниты с высокой коэрцитивной силой до 60 кЭ, остаточной индукцией $4 \cdot 10^3$ Гс и температурной стабильностью остаточной намагниченности 0,000 1 %/град, позволяющей работать в устройствах от –100 до 500 ºС, при малых толщинах (с большим размагничивающим фактором) и отсутствии клеевой технологии их крепления на поверхностях магнитопроводов сложной геометрической формы. Такой магнит был напылен на торец ротора гироскопа толщиной 1 мм.

Напыленный ротор прошел весь комплекс испытаний в составе гироскопа и рекомендован к использованию в серийных приборах.

Такие магниты могут найти широкое применение в конструкциях малогабаритных двигателей постоянного тока, бортовой измерительной аппаратуре, а так же различных устройствах, предназначенных для исследования космического пространства.

Библиографические ссылки

1. Саунин В. Н., Жилин Г. П., Лаптей Д. А. Аппаратура для исследования нестабильности постоянных магнитов дифференциально-баллистическим методом // Измерительная техника. 1973. № 5. С. 62–63.

2. Саунин В. Н., Жилин Г. П., Лаптей Д. А. Магнитоупругий гистерезис высококоэрцитивных сплавов // Постоянные магниты : материалы VII Всесоюз. конф. Суздаль, 1979. С. 85–88.

3. Саунин В. Н., Жилин Г. П., Лаптей Д. А. Температурный гистерезис в сплавах альнико // Научное приборостроение для физических исследований. Ч. 2. Красноярск, 1975. С. 135–139.

4. Саунин В. Н., Жилин Г. П., Лаптей Д. А. Температурный магнитный гистерезис дисперсионно-твердеющих сплавов // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Физика. 1976. № 10. Томск. С. 26–32.

5. Саунин В. Н., Жилин Г. П., Лаптей Д. А. Температурный гистерезис постоянных магнитов из сплавов типа альнико // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Физика. 1979. № 7. Томск. С. 35–38.

6. Саунин В. Н., Лепешев А. А. Магнитные свойства плазмонапыленных покрытий на основе сплавов самарий-кобальт. М. : [б. и.], 1985. 3 с. Сер. Применение газотермических покрытий в машиностроении.

7. А. с. 1656774 A1 SU Кл. B 65 G 53/40, 1982. Устройство для подачи порошка в плазмотрон / В. Н. Саунин, А. А. Лепешев. № 4795374/02 ; заявл. 25.12.1989 ; зарег. 15.02.1991.

8. А. с. 1626231 SU Кл. G 01 R 33/12, 1982. Вибрационный магнитометр / В. Н. Саунин. № 4413872/21 ; заявл. 20.04.1988 ; опубл. 07.02.1991, Бюл. № 5.

V. N. Saunin, S. V. Telegin

HARD MAGNETIC PLASMA-SPRAYED COVERINGS ON THE BASIS OF SM–CO ALLOYS

The authors describe a process of production of hard magnetic coatings by plasma spraying method, based on Sm-Co alloys obtained by the electric arc method. The influence of technological parameters of spraying process and heat treatment on the structure and magnetic properties of the coatings is investigated.

Keywords: Sm-Co alloy, coercive force, plasmatron, dusting.

© Саунин В. Н., Телегин С. В., 2012

Раздел
4

ЭКОНОМИКА

УДК 332.145

Т. Э. Акбулатов

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫМИ РАСХОДАМИ НА СОЦИАЛЬНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ НАСЕЛЕНИЯ

Разработана концептуальная модель управления государственными расходами на социальное обслуживание населения на основании равенства предельных расходов на ее содержание и обеспечение транспортной доступности.

Ключевые слова: инфраструктура, социальное обслуживание, предельные расходы, транспортная доступность, субсидия.

Социальное обслуживание населения есть составляющая региональной политики любого государства, которая должна включать в себя не только выстраивание и расширение сети объектов социальной инфраструктуры, но и обеспечение ее транспортной доступности для обслуживаемых групп населения. Последнее особенно актуально в отношении отдаленных слабонаселенных территорий Севера России, где низкая плотность населения обусловливает недостаточный объем спроса и, как следствие, высокую удельную стоимость содержания социальных объектов, а выстраивание схемы оказания услуг за пределами населенного пункта приводит к необходимости организации достаточного по пропускной способности и ценовой доступности межпоселенческого транспортного сообщения. В силу больших расстояний и неразвитости сети наземного транспорта подобные расходы могут быть сопоставимы со стоимостью строительства объектов социальной инфраструктуры [1].

Декомпозиция расходов на социальное обслуживание населения на две составляющие (расходы на содержание объектов социальной инфраструктуры и на обеспечение их транспортной доступности) требует анализа процесса формирования каждой из них. Так, увеличение плотности объектов социальной инфраструктуры приводит к росту расходов на их содержание, одновременно снижая расходы на обеспечение их транспортной доступности для обслуживаемых групп населения. В этой связи определение оптимальной плотности объектов социальной инфраструктуры возможно на основании анализа предельных изменений обеих составляющих ($МС_{соц}$ и $МС_{тр}$ соответственно).

Допуская, что расходы на содержание одного объекта социальной инфраструктуры конкретного профиля состоят из постоянных ($AFC_{соц}$, руб. / год) и переменных ($AVC_{соц}$, руб. / обслуживание) издержек, $МС_{соц}$ каждого нового социального объекта при неизменной численности населения равны $AFC_{соц}$.

Допуская, что удельные государственные расходы на обеспечение доступности междугороднего транспорта ($AVC_{тр}$, руб. / пасс. км) постоянна, $МС_{тр}$ определяется изменением минимального объема работ региональной транспортной системы, необходимого для обеспечения доступа населения к социальным услугам в нормативном объеме ($Q_{тр}$, пасс. км / год). Такое изменение формируется за счет того, что появление каждого нового объекта социальной инфраструктуры приводит:

– к ликвидации потребности в межпоселенческих перевозках при социальном обслуживании населения того пункта, где он появился;

– снижению транспортной работы при обслуживании населения других, не обеспеченных социальной инфраструктурой пунктов, для которых он становится ближайшим из существующих.

В условиях неравномерного пространственного размещения и численности населенных пунктов значение $Q_{тр}$ зависит не только от количества социальных объектов, но и от их пространственного размещения. В связи с этим при определении $МС_{тр}$ $(M + 1)$-го социального объекта необходимо исходить из того, что и M, и $(M + 1)$ социальных объектов располагаются наиболее эффективно, то есть минимизируют $Q_{тр}$.

Процесс выбора оптимального размещения социальных объектов определенного профиля на территории с N населенными пунктами можно представить на основе матрицы

$$A = \left(a_{ij}\right)_{i=1,\,j=1}^{N,N} = \left(2 \cdot L_{ij} \cdot P_j \cdot k\right)_{i=1,\,j=1}^{N,N}, \qquad (1)$$

элементами которой являются объемы транспортных работ (пасс. км / год), обеспечивающие предоставление жителям j-го населенного пункта социальных услуг в i-м населенном пункте в нормативном объеме. Соответственно, $Q_{тр}$ при размещении M социальных объектов в населенных пунктах (b_1; b_2… b_M) определяется формулой

$$Q_{тр} = \sum_{j=1}^{N} \min\left(a_{b_1 j}; a_{b_2 j} \ldots a_{b_M j}\right), \qquad (2)$$

где L_{ij} – расстояние между i-м и j-м населенными пунктами; P_j – численность j-го населенного пункта; k – нормативный объем предоставления социальной услуги, обслуживаний в год на одного жителя.

Очевидно, что оптимальное пространственное размещение заданного числа социальных объектов, а следовательно, и $МС_{тр}$, зависит от соотношения значений матрицы A. В случае если средние ненулевые значения и их среднеквадратичные отклонения одинаковы для каждого столбца матрицы A, а распределение носит нормальный характер, $МС_{тр}$ $(M + 1)$-го социального объекта будет определяться формулой

$$\mathrm{MC}_{\text{тр}} = -\left\{ F_a^{-1}\left(\frac{N-M}{2N-2}\right) + (N-M-1)\times \right.$$
$$\left. \times\left(F_a^{-1}\left[\frac{N-M}{2N-2}\right] - F_a^{-1}\left[\frac{N-M-1}{2N-2}\right]\right)\right\}\mathrm{AVC}_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где F_a^{-1} – функция, обратная функции распределения ненулевых значений матрицы A.

При ненулевом среднеквадратичном отклонении, $\mathrm{MC}_{\text{тр}}$ изменяется нелинейно и становится равно нулю в точке $(N + 1)$.

Таким образом, оптимальное количество социальных объектов социальной инфраструктуры будет достигаться в точке равенства абсолютных значений $\mathrm{MC}_{\text{соц}}$ и $\mathrm{MC}_{\text{тр}}$ (рис. 1).

Значение M_{opt} зависит от формы и положения кривой $(-\mathrm{MC}_{\text{тр}})$ относительно $\mathrm{MC}_{\text{соц}}$, которые в соответствии с формулой (3) определяются значениями μ_A, σ_A и $\mathrm{AVC}_{\text{тр}}$. Как следует из формулы (1), значение μ_A зависит от $\overline{L}, \overline{P}, k$, а следовательно, от таких факторов, как площадь территории (прямое влияние на $\overline{L}$), средняя плотность населения (прямое влияние на $\overline{P}$), средняя плотность населенных пунктов (обратное влияние на $\overline{L}$ и $\overline{P}$) и непосредственно величина социальных нормативов. Соответственно, σ_A находится в прямой зависимости от степени неравномерности плотности населенных пунктов, а также их распределения по численности населения.

Государственное регулирование транспортной доступности социальных объектов в условиях смешанной экономики может проявляться в форме влияния на ценовую доступность межпоселенческих перевозок для обслуживаемых групп населения через механизмы субсидирования и прямого бюджетного финансирования транспортных предприятий и потребителей. Соответственно, $\mathrm{AVC}_{\text{тр}}$ формируется под воздействием двух факторов: приемлемой для населения удельной стоимости транспортных услуг и себестоимости их оказания для транспортных предприятий. Приемлемая стоимость (в соответствии с сформулированным в предыдущих работах автора принципом недискриминационного характера ценообразования на транспортные услуги [2]) зависит как от уровня среднедушевых доходов, так и от неравномерности их распределения по группам населения. Удельная себестоимость определяется типом эксплуатируемых транспортных средств, возможностью использования наиболее экономичного наземного транспорта, т. е. плотностью наземных путей сообщения. Помимо этого на нее оказывает влияние размер производственных транспортных потоков (вахты, командировки), обеспечивающих эффект масштаба. Следует отметить, что определение $\mathrm{AVC}_{\text{тр}}$ на основе выявленных факторов предполагает ее дифференциацию в разрезе маршрутов и усложнение предложенной модели, детальный алгоритм ее расчета представлен в работе [3].

Выявленные факторы и их влияние на M_{opt} сведены в табл. 1.

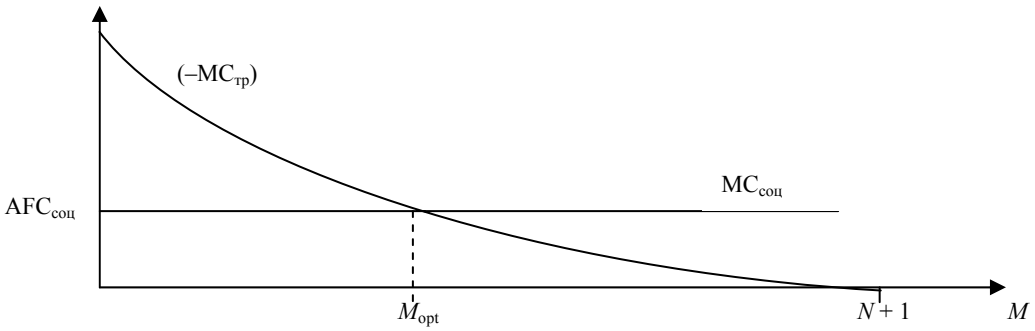


Рис. 1. Оптимизация государственных расходов на социальное обслуживание населения на основании предельных издержек

Факторы, влияющие на M_{opt}

№ п/п	Фактор	Влияние на M_{opt}
Факторы, определяющие μ_A		
1	Площадь территории рассматриваемого региона	Прямое
2	Средняя плотность населения	Прямое
3	Средняя плотность населенных пунктов	Обратное
4	Уровень социальных нормативов	Прямое
Факторы, определяющие σ_A		
5	Неравномерность плотности населенных пунктов	Обратное
6	Неравномерность численности населенных пунктов	Обратное
Факторы, определяющие $\mathrm{AVC}_{\text{тр}}$		
7	Среднедушевые доходы населения	Обратное
8	Неравномерность распределения населения по уровню доходов	Прямое
9	Плотность наземных путей сообщения	Обратное
10	Размер производственных транспортных потоков	Обратное

Достоинствами предложенной модели являются относительная простота, наглядность и небольшой набор входящих данных, что делает ее оптимальным инструментом на предварительном этапе анализа либо в условиях ограниченной информации.

Учет специфики обеспечения транспортной доступности объектов социальной инфраструктуры для населения с производственной и стоимостной точек зрения, а также капитального характера большинства затрат связанных со строительством и содержанием инфраструктуры, требует выстраивания более сложных алгоритмов оптимизации.

Библиографические ссылки

1. Акбулатов Т. Э., Журавлев Ю. А. Оценка эффективности различных путей развития регионального авиатранспортного комплекса Российской Федерации // Научный вестник МГТУ ГА. М., 2012. № 181 (7). С. 5–11.

2. Акбулатов Т. Э. Концепция оптимизации социальной и транспортной инфраструктуры северных территорий // Теория и практика общественного развития. Краснодар, 2012. № 8. URL: http://teoria-practica.ru/-8-2012/economics/akbulatov.pdf.

3. Акбулатов Т. Э. Алгоритм оптимизации социальной и транспортной инфраструктуры северных регионов // Вестник СибГАУ. 2012. Вып. № 3 (43). С. 136–139.

T. E. Akbulatov

CONCEPTUAL STATE EXPENDITURE GOVERNANCE MODEL FOR PUBLUIC SOCIAL SERVICES

The author presents the developed conceptual state expenditure governance model for public social services on the basis of equality of marginal costs for its maintenance and providing for its transport accessibility.

Keywords: infrastructure, social service, marginal costs, transport accessibility, subsidy.

© Акбулатов Т. Э., 2012

УДК 658(470)

К. В. Катык, Г. Г. Крушенко

ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Содержится обзор современного состояния оборонно-промышленного комплекса России, составленный на основе публикаций в открытых источниках, его проблемы, а также приводятся наиболее распространенные варианты их решения.

Ключевые слова: оборонно-промышленный комплекс, государственный оборонный заказ, национальная оборона.

Современной России в «наследство» от Советского Союза досталась огромная машина оборонно-промышленного комплекса (ОПК), в который входят около 1 338 предприятий [1]. Предприятия оборонной промышленности размещены во всех экономических районах России. Отечественный ОПК является резервом, позволяющим рассчитывать на сохранение нашей страной статуса независимой и суверенной индустриальной державы. Предприятия ОПК играют весомую роль и в техническом перевооружении многих важнейших отраслей российской экономики. Такие отрасли промышленности, как аэрокосмическое машиностроение, гражданский космос и судостроение, оптическое приборостроение, производство изделий электронной техники и промышленных взрывчатых веществ, практически полностью представлены предприятиями ОПК. К основным характеристикам оборонной промышленности могут быть отнесены многопрофильность и наукоемкость изготавливаемой продукции, уникальность научно-производственной и испытательной базы, сложнейшая многоуровневая кооперация специализированных производств на изготовление финишных изделий [2].

За годы экономических и политических реформ ОПК претерпевал различные изменения, но и сегодня он вызывает определенный трепет у наших стратегических противников. Однако вице-президент Коллегии военных экспертов РФ А. Владимиров считает, что нынешнее состояние ОПК России можно характеризовать как системный кризис, имеющий тенденцию к дальнейшему углублению. Основными причинами такого положения в ОПК, по мнению данного эксперта [3], являются:

– отсутствие четкой государственной политики в потребном объеме мобилизационных мощностей и безусловном выделении средств на их содержание;

– перманентное в последние 12 лет реформирование системы управления ОПК, что привело к серьезным кадровым потерям, нарушениям вертикальных и горизонтальных связей между предприятиями, все возрастающему отставанию России от ведущих промышленно развитых стран в организации работ

по созданию современных образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ);

– невнятная инновационная политика, серьезный разрыв между наукой и производством, бедственное положение отраслевых НИИ;

– отсутствие обоснованной концепции в потребностях ОПК на ближайшую и долгосрочную перспективу;

– непродуманная политика приватизации ряда предприятий оборонки, приведшая к разрушению необходимых технологических связей при создании и производстве ВВСТ;

– самоустранение государства от эффективного контроля за ростом цен на сырье, энергоносители, транспортные перевозки, что приводит к удорожанию продукции военного назначения и понижению ее конкурентоспособности на международном рынке;

– отсутствие четкой системы учета интеллектуальной собственности, принадлежащей России, что ведет к ее «утечке» за рубеж;

– старение материально-технической базы научно-производственных структур и специалистов отрасли;

– низкий уровень заработной платы и отсутствие стимулов у молодежи для работы на предприятиях комплекса;

– ликвидация ряда организаций, занимающихся системным анализом развития отраслей ОПК.

Все вышеперечисленные проблемы – это результат многолетнего отсутствия внимания к проблемам ОПК в нашей стране.

В настоящее время Правительством РФ предпринимаются меры, которые должны вывести ОПК из затяжного кризиса. Так 7 мая 2012 г. Президент Российской Федерации В. Путин подписал Указ «О реализации планов (программ) строительства и развития Вооруженных Сил Российской Федерации, других войск, воинских формирований и органов и модернизации оборонно-промышленного комплекса», в соответствии с которыми, российские вооруженные силы к 2020 г. должны быть оснащены современными образцами ВВСТ на 70 %. Приоритетными направлениями станут развитие сил ядерного сдерживания, средств воздушно-космической обороны, систем связи, разведки и управления, радиоэлектронной борьбы, комплексов беспилотных летательных аппаратов, роботизированных ударных комплексов, современной транспортной авиации, высокоточного оружия и средств борьбы с ним, системы индивидуальной защиты военнослужащих, а также развитие Военно-Морского Флота, прежде всего в Арктической зоне РФ и на Дальнем Востоке [4].

Обеспечить выполнение Указа Президента призван государственный оборонный заказ, главными отличиями которого в настоящее время являются следующие [5]:

– принята и реализуется новая Государственная программа вооружения, т. е. имеется четкий долгосрочный ориентир;

– существенно увеличен объем финансирования ГОЗ;

– развернуты масштабные работы по определению экономически обоснованных цен;

– начали заключаться долгосрочные, на 5 лет и более, контракты, в том числе по кредитной схеме;

– существенно сокращена номенклатура ГОЗ за счет обеспечения комплектности поставок и введения практики заключения крупных контрактов по сервисному обслуживанию;

– минимизировано количество разрабатываемой военной техники обеспечения, которая может быть заменена техникой народнохозяйственного (или двойного) назначения.

В целом официальные расходы на оборону в ближайшие три года планируется увеличить почти на 80 % и довести их долю в валовом внутреннем продукте (ВВП) с 3,1 % в 2012 г. до 3,8 % в 2014 г. Если будут реализованы президентские указы от 7 мая 2012 г., то расходы на оборону в 2014 г. могут составить более 4,1 % от ВВП [6] (табл. 1, 2).

Отечественный ОПК является резервом, позволяющим рассчитывать на сохранение нашей страной статуса независимой и суверенной индустриальной державы. Предприятия ОПК играют весомую роль и в техническом перевооружении многих важнейших сфер российской экономики. Такие отрасли промышленности как авиационное машиностроение, гражданский космос и судостроение, оптическое приборостроение, производство изделий электронной техники и промышленных взрывчатых веществ практически полностью представлены предприятиями ОПК.

Глубокий инвестиционный кризис, поразивший российскую экономику, крайне тяжело отразился на ОПК, обострив социальную обстановку. В результате на предприятиях преобладает тяжелый морально-психологический климат. Значительная часть работников трудились семьями, что усложнило их положение. Все это явилось результатом отсутствия полноценной системы социальной защиты персонала сферы ВПК. Под влиянием дифференциации в оплате труда произошло межотраслевое перераспределение рабочей силы в пользу сырьевых отраслей экономики. Снижение объемов производства, падение инвестиционной активности в сфере ОПК привело к нестабильности количества и структуры рабочих мест. Напряжение на региональных рынках труда обернулось несоответствием объемов и профилей подготовки рабочих и специалистов в профессиональных образовательных учреждениях структуре рабочих мест. Анализ данных о движении кадров в сфере ОПК в последние годы свидетельствует о наметившейся тенденции стабилизации в связи с мерами государственной поддержки предприятий ОПК, которые осуществляются на федеральном и региональном уровнях.

Вместе с тем сегодня необходимо законодательство, направленное на восстановление стабильной системы воспроизводства кадров, обеспечения высококвалифицированной рабочей силой этой отрасли и существенного стимулирования труда.

Опыт промышленно развитых стран показывает, что эффективность экономики определяется прежде всего результатами научно-технического прогресса и возможностью их использования в процессе производства.

Таблица 1

Расходы федерального бюджета по разделу «Национальная оборона» (млрд руб.)

Проекты на 2013–2014 гг.				
Расходы	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.
Расходы по разделу «Национальная оборона», в том числе:	1 537,4	1 853,3	2 329,4	2 737,5
– оплата труда личного состава	–	326,8	326,8	326,8
– оплата военных пенсий*	–	251,9	251,9	251,9
– обеспечение постоянным и служебным жильем	–	43,4	28,0	9,0
% к ВВП	2,88	3,1	3,6	3,8
% к расходам всего бюджета	13,9	14,6	17,0	18,8
ВВП	–	58 683	64 803	72 493

Таблица 2

Возможные расходы федерального бюджета по разделу «Национальная оборона» с учетом новых указов президента РФ от 7 мая 2012 года (млрд руб.)

Проекты на 2013–2014 гг.				
Расходы	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.
Расходы по разделу «Национальная оборона», в том числе:	1 537,4	1 956,9	2 493	2 964,7
– оплата труда личного состава	–	326,8	346,4	366
– оплата военных пенсий*	–	251,9	272,1	292,3
– обеспечение постоянным и служебным жильем	–	122	122	122
– доп. оплата 50 тыс. контрактников	–	25	50	75
% к ВВП	2,88	3,3	3,8	4,1
% к расходам всего бюджета	13,9	15,5	18,2	20,3

* В Федеральном законе Российской Федерации от 30 ноября 2011 г. № 371-ФЗ оплата военных пенсий происходит по разделу «Пенсионное обеспечение» [7].

Отсюда и высокий уровень жизни населения, определяемый масштабами внедрения прорывных технологий в базовых отраслях экономики. Главным фактором успеха при этом являются кадры – научно-инженерный потенциал, которым располагает страна, и степень эффективности его использования. Ориентация страны на закупку товаров и технологий может поддержать относительно стабильное экономическое положение в государстве только на небольшой срок.

Дополнительный импульс развитию ОПК могло бы придать и международное сотрудничество в научно-технической сфере и в области высоких технологий. Развитие и умелое использование сложившегося научно-технического и кадрового потенциала ВПК является гарантом стабилизации социального положения сотрудников, занятых в сфере ОПК [8].

Библиографические ссылки

1. Оборонно-промышленный комплекс в 2012 г. // Путь. РФ. URL: http://путь.рф/industry/opk/2012.

2. О докладе Совета Федерации «О состоянии законодательства, регулирующего деятельность оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации» // Аналитический вестник Совета Федерации ФС РФ, 2011. № 6 (418). С. 86.

3. О некоторых региональных аспектах реформирования оборонно-промышленного комплекса // Аналитический вестник Совета Федерации ФС РФ. 2005. № 31 (283). С. 13–24.

4. Указ Президента РФ от 07.05.2012 № 603 «О реализации планов (программ) строительства и развития вооруженных сил российской федерации, других войск, воинских формирований и органов и модернизации оборонно-промышленного комплекса» // Портал «Президент России». URL: http://graph.document.kremlin.ru/page.aspx?1;1610873.

5. Формирование предложений Минобороны в проект Гособоронзаказа на 2012–2014 годы находится в завершающей стадии // Национальная оборона. URL: http://www.oborona.ru/includes/periodics/maintheme/2011/1107/18327630/detail.shtml.

6. Коновалов С. Бюджет цвета хаки // Независимая газета. 14.05.2012. URL: http://www.ng.ru/nvo/2012-05-14/1_budget.html.

7. Федеральный закон Российской Федерации от 30 ноября 2011 г. № 371-ФЗ «О федеральном бюджете на 2012. год и на плановый период 2013 и 2014 годов» // Российская газета. URL: http://www.rg.ru/2011/12/02/budjet12-144-site-dok.html#comments.

8. О докладе Совета Федерации «О состоянии законодательства, регулирующего деятельность оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации» // Аналитический вестник Совета Федерации ФС РФ. 2011. № 6 (418). С. 87–88.

K. V. Katyk, G. G. Krushenko

RUSSIAN DEFENSE-INDUSTRIAL COMPLEX: PROBLEMS AND SOLUTION

The article contains review of the modern state of the military-industrial complex of Russia, made up on the basis of publications in open sources, its problems, and provides with the most widespread variants of their solution.

Keywords: defense-industrial complex, state defense order, national defense.

© Катык К. В., Крушенко Г. Г., 2012

УДК 330.322.1

И. Р. Руйга, Д. Е. Кацик

ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОЕ ПАРТНЕРСТВО КАК МЕХАНИЗМ АКТИВИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕГИОНАХ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

Представлена характеристика регионального законодательства в сфере государственно-частного партнерства (ГЧП), проведен анализ реализуемых на территории округа проектов ГЧП, обозначены проблемы и перспективы развития государственно-частного партнерства в регионах Сибири.

Ключевые слова: инвестиционная политика, механизмы активизации инвестиционной деятельности, государственно-частное партнерство.

Проблема привлечения инвестиций в отечественную экономику стоит весьма остро, а в экономику Сибирского федерального округа (СФО) – особенно. Обладая уникальным природно-ресурсным потенциалом, колоссальными рекреационными ресурсами, мощным промышленным и научно-образовательным потенциалом, Сибирский регион существенно уступает лидерам по показателям инвестиционной деятельности. По данным официальной статистики, Сибирский федеральный округ с 2008 по 2010 г. находится на пятом месте по показателю объема инвестиций в основной капитал и на шестой позиции по показателю инвестиций в основной капитал на душу населения (табл. 1).

В состав СФО входят 12 субъектов РФ: 4 республики (Алтай, Бурятия, Тыва, Хакасия), 3 края (Алтайский, Забайкальский, Красноярский), 5 областей (Иркутская, Кемеровская, Новосибирская, Омская, Томская). За период с 2008 по 2010 г. безусловным лидером по объему привлеченных инвестиций в основной капитал является Красноярский край, доля которого в общем объеме инвестиций СФО составляет около 30 % (табл. 2). Данное обстоятельство вызвано реализацией на территории края целого ряда крупных инфраструктурных проектов – «Освоение Ванкорского нефтегазового месторождения», «Комплексное развитие Нижнего Приангарья», «Расширение Олимпиадинского ГОКа по переработке первичных руд до 8 млн т в год», «Строительство горнодобывающего и перерабатывающего предприятия на базе месторождения «Благодатное», «Освоение месторождений Юрубчено-Тохомской группы, включая систему внешнего транспорта нефти», «Строительство железнодорожной линии Кызыл – Курагино в увязке с освоением минерально-сырьевой базы Республики Тыва», «Развитие Красноярского международного авиатранспортного узла в Емельяновском районе Красноярского края».

В тройку лидеров по привлеченным инвестициям в основной капитал кроме Красноярского края с существенным отставанием входят Кемеровская, Новосибирская (2008 г., 2010 г.) и Иркутская (2009 г.) области.

Каждый субъект СФО на сегодняшний день имеет достаточно развитое инвестиционное законодательство. Законодательная база в данной области представлена целым рядом нормативных правовых актов (НПА), определяющих правовые и экономические основы инвестиционной деятельности на территории регионов. Анализ существующих НПА, регулирующих инвестиционную деятельность, позволил выделить следующие формы государственной поддержки:

– предоставление налоговых льгот и преференций;

– предоставление инвестиционных налоговых кредитов;

– субсидирование и возможность совместной реализации проектов;

– передача имущества, находящегося в государственной собственности субъекта Российской Федерации, в аренду на льготных условиях;

– предоставление государственных гарантий;

– выпуск облигационных займов;

– поддержка малого предпринимательства в форме выделения субсидий и грантов.

Таблица 1

Показатели инвестиционной деятельности в федеральных округах*

Федеральный округ	2008 г.		2009 г.		2010 г.	
	млн руб.	доля, %	млн руб.	доля, %	млн руб.	доля, %
Объем привлеченных инвестиций в основной капитал						
Центральный	2 278 329	26	1 928 138	24	1 890 966	23
Северо-Западный	1 040 669	12	933 693	12	1 049 637	13
Южный	704 183	8	709 382	9	794 412	9
Северо-Кавказский	260 241	3	267 085	3	287 137	3
Приволжский	1 485 341	17	1 279 154	16	1 323 384	16
Уральский	1 482 552	17	1 337 857	17	1 431 313	17
Сибирский	945 556	11	834 593	10	889 719	11
Дальневосточный	584 745	7	686 111	9	725 659	9
Итого по округам	8 781 616	100	7 976 013	100	8 392 227	100
Объем привлеченных инвестиций в основной капитал на душу населения						
	руб.	ранг	руб.	ранг	руб.	ранг
Центральный	61 350	4	51 944	4	49 172	5
Северо-Западный	77 192	3	69 421	3	77 181	3
Южный	51 349	5	51 727	5	57 324	4
Северо-Кавказский	28 427	8	28 965	8	30 311	8
Приволжский	49 184	6	42 449	7	44 226	7
Уральский	121 048	1	109 057	1	118 520	1
Сибирский	48 367	7	42 683	6	46 213	6
Дальневосточный	90 332	2	106 370	2	115 197	2

*Рассчитано авторами по [1].

Таблица 2

Инвестиции в основной капитал по регионам СФО за период 2008–2010 гг.*

Регионы	2008 г.		2009 г.		2010 г.	
	млн руб.	доля, %	млн руб.	доля, %	млн руб.	доля, %
Республика Алтай	7 591	0,8	7 169	0,9	9 520	1,1
Республика Бурятия	23 605	2,5	23 379	2,8	30 344	3,4
Республика Тыва	3 756	0,4	5 188	0,6	6 353	0,7
Республика Хакасия	13 312	1,4	12 837	1,5	20 232	2,3
Алтайский край	55 965	5,9	45 026	5,4	55 819	6,3
Забайкальский край	47 445	5,0	42 271	5,1	40 257	4,5
Красноярский край	204 171	21,6	247 789	29,7	245 618	27,6
Иркутская область	129 951	13,7	106 550	12,8	102 450	11,5
Кемеровская область	152 887	16,2	110 074	13,2	129 747	14,6
Новосибирская область	133 410	14,1	100 448	12,0	106 822	12,0
Омская область	87 509	9,3	59 184	7,1	66 804	7,5
Томская область	85 954	9,1	74 679	8,9	75 754	8,5
СФО	945 556	100	834 594	100	889 720	100

*Рассчитано авторами по [1].

Основными условиями предоставления форм государственной поддержки на региональном уровне являются соответствие инвестиционных проектов приоритетам социально-экономического развития соответствующих субъектов Российской Федерации, экономическая и бюджетная эффективность, обеспечение роста занятости населения и повышение оплаты труда.

В ряде регионов действуют специализированные структуры, осуществляющие функции по привлечению инвестиций в экономику региона – Иркутская область (Инвестиционный совет), Красноярский край (Инвестиционный совет), Кемеровская область (Управление инвестиционной политики), Новосибирская область (ОАО «Агентство инвестиционного развития Новосибирской области»), Омская область (Омская инвестиционная компания), Томская область (Координационный совет по поддержке инвестиционной деятельности и предоставлению государственных гарантий, ООО «Томское агентство привлечения инвестиций»).

Как показывает зарубежная практика, в целях повышения инвестиционной привлекательности помимо указанных форм необходимо применение так называемых комплексных механизмов активизации инвестиционной деятельности, функционирование которых осуществляется с использованием нескольких форм инвестиционного регулирования. Одним из таких механизмов является государственно-частное партнерство (ГЧП), в широком смысле представляющее собой альянс государства и бизнеса.

В России в последние годы вопрос о реализации государственно-частного партнерства обсуждается очень активно как на федеральном уровне, так и на уровне регионов. Однако к настоящему времени единой комплексной правовой базы государственно-частного партнерства не создано, по существу, специальное законодательство о государственно-частном партнерстве отсутствует.

В этих условиях к отношениям, основанным на принципах государственно-частного партнерства, применяются отдельные положения нормативных правовых актов различных отраслей законодательства, в частности: Конституции Российской Федерации; административного законодательства; гражданского законодательства и законодательства об инвестиционной деятельности; бюджетного, земельного, налогового, градостроительного законодательства; законодательства о государственных закупках; законодательства о государственном регулировании тарифов; нормативных правовых актов, регулирующих правовой режим отдельных видов инфраструктуры; нормативных правовых актов, регулирующих требования к эксплуатации объектов, являющихся предметом государственно-частного партнерства.

Все вышеназванные нормативные правовые документы непосредственно не посвящены вопросам государственно-частного партнерства. Единственным специальным законом, предмет регулирования которого составляют непосредственно отношения в области государственно-частного партнерства, является Федеральный закон «О концессионных соглашениях», который достаточно подробно регламентирует основания и порядок заключения, а также реализации концессионных соглашений, являющихся одной из форм государственно-частного партнерства.

Существуют также подзаконные акты, непосредственно регламентирующие отдельные вопросы государственно-частного партнерства, в частности регламентирующие работу Инвестиционного фонда Российской Федерации, порядок отбора инвестиционных проектов на получение бюджетного финансирования.

Органы государственной власти субъектов Российской Федерации также приступили к формированию собственной нормативной правовой базы в сфере государственно-частного партнерства.

На начало 2012 г. на территории СФО принято 9 региональных законов:

1) Закон от 05.03.2008 № 15-РЗ «Об основах государственно-частного партнерства в Республике Алтай»;

2) Закон Томской области от 04.12.2008 № 280-ОЗ «О государственно-частном партнерстве в Томской области»;

3) Закон Кемеровской области от 29.06.2009 № 79-ОЗ «Об основах государственно-частного партнерства»;

4) Закон Республики Тыва от 02.11.2009 № 1552 ВХ-II «Об участии Республики Тыва в государственно-частных партнерствах»;

5) Закон Омской области от 06.04.2010 № 1249-ОЗ «О государственно-частном партнерстве в Омской области»;

6) Закон Забайкальского края от 07.06.2010 № 374-ЗЗК «О государственно-частном партнерстве в Забайкальском крае»;

7) Закон Алтайского края от 11.05.2011 № 55-ЗС «Об участии Алтайского края в государственно-частном партнерстве»;

8) Закон Республики Хакасия «Об участии Республики Хакасия в государственно-частных партнерствах» от 11.05.2011 № 35-ЗРХ (Постановление Верховного Совета № 860-21);

9) Закон Красноярского края от 01.12.2011 № 13-6633 «Об участии Красноярского края в государственно-частном партнерстве».

В Новосибирской области и Республике Бурятия ведется разработка законопроекта о ГЧП, в Иркутской области нормативные правовые акты о ГЧП отсутствуют. Тем не менее органами власти указанных субъектов ведется работа в данном направлении и решаются вопросы о необходимости принятия соответствующего закона.

Анализ указанных региональных законов позволяет сделать вывод о наличии однотипной структуры, что обусловлено разработкой законодательства в данном аспекте на базе Модельного закона об участии субъектов РФ в ГЧП, а также Закона Санкт-Петербурга от 25.12.2006 № 627-100 «Об участии Санкт-Петербурга в государственно-частных партнерствах». Основными положениями законов субъектов СФО являются:

– основные понятия, используемые в законе;

– законодательная основа государственно-частного партнерства;

– цели и задачи государственно-частного партнерства;

– принципы государственно-частного партнерства;

– стороны государственно-частного партнерства;

– полномочия органов государственной власти субъектов РФ в сфере отношений государственно-частного партнерства;

– формы государственно-частного партнерства;

– объекты соглашений о государственно-частном партнерстве;

– условия и порядок участия органов государственной власти субъектов Российской Федерации в отношениях государственно-частного партнерства;

– формы государственной поддержки развития государственно-частного партнерства;

– конкурс на право заключения соглашения о государственно-частном партнерстве;

– гарантии прав партнеров при заключении и исполнении соглашений о государственно-частном партнерстве.

Однако стоит отметить, что уровень качества региональных законов о ГЧП существенно различается: одни законы представляются достаточно подробными (Республика Хакасия, проект Закона Новосибирской области), другие являются буквально рамочными, состоящими из 6 статей (Омская область). Кроме того, в региональных законах отсутствует единый подход к определению государственно-частного партнер-

ства, формам государственно-частного партнерства, формам финансового и иного участия субъектов в проектах ГЧП.

Проведенный анализ информации, представленной органами власти субъектов СФО, о существующих региональных инфраструктурных проектах, позволяет сделать вывод о небольшом количестве проектов с использованием механизма государственно-частного партнерства (табл. 3). Из 266 заявленных проектов в области инфраструктуры на принципах ГЧП реализуется лишь 81 проект, что составляет 30 %.

По числу крупномасштабных капиталоемких проектов лидирует Красноярский край. В регионе реализуется 11 инфраструктурных проектов, инвестиционные вложения в которых превышают 20 млрд руб. Также большой удельный вес в общем количестве заявленных проектов имеют проекты, реализация которых стоит от 5 до 20 млрд руб. и от 1 до 5 млрд руб. (6 и 5 проектов соответственно) [2].

Лидирующей отраслью по количеству реализуемых инфраструктурных проектов является транспорт (52 проекта), 48 проектов реализуется в сфере энергетики, около 15 % приходится на проекты в сфере ЖКХ (39 проектов).

В рамках государственно-частного партнерства наибольшее число проектов реализуется в области комплексного развития территории (17 проектов), по 13 проектов реализуется в области транспорта и энергетики. Однако структура реализуемых ГЧП-проектов по регионам не является однотипной. В Алтайском крае наибольшая доля проектов приходится на образование (43,8 %) и здравоохранение (31,3 %).

Таблица 3

Инфраструктурные проекты, реализуемые в регионах СФО*

Регион СФО	Количество проектов		Транспорт	ЖКХ	Энергетика	Сельское хозяйство	Здравоохранение	Образование	Культура	Спорт	Комплексное развитие территорий	Прочее
Республика Алтай	всего	22	4	1	4	0	5	7	0	0	1	0
	ГЧП	16	2	0	1	0	5	7	0	0	1	0
Республика Бурятия	всего	9	0	1	4	2	0	0	0	0	2	0
	ГЧП	8	0	0	4	2	0	0	0	0	2	0
Республика Тыва	всего	6	2	0	1	0	0	0	0	0	1	2
	ГЧП	6	2	0	1	0	0	0	0	0	1	2
Республика Хакасия	всего	11	3	2	1	2	1	0	0	0	2	0
	ГЧП	3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Алтайский край	всего	10	2	1	4	1	0	0	0	0	2	0
	ГЧП	10	2	1	4	1	0	0	0	0	2	0
Забайкальский край	всего	32	7	5	3	3	5	3	0	1	3	2
	ГЧП	6	1	2	2	0	0	0	0	0	1	0
Красноярский край	всего	23	7	0	6	3	2	0	0	0	3	2
	ГЧП	7	2	0	0	1	0	0	0	0	3	1
Иркутская область	всего	15	2	2	1	0	0	0	0	0	10	0
	ГЧП	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кемеровская область	всего	91	13	21	19	0	13	1	6	9	8	1
	ГЧП	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Новосибирская область	всего	9	3	0	1	0	2	0	1	0	2	0
	ГЧП	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Омская область	всего	18	4	2	2	3	3	3	0	0	1	0
	ГЧП	11	1	2	1	3	1	2	0	0	1	0
Томская область	всего	20	5	4	2	2	2	2	0	0	3	0
	ГЧП	11	2	4	0	1	0	2	0	0	2	0

*Составлено авторами по [2]. По количеству реализуемых инфраструктурных проектов на территории федерального округа лидирует Кемеровская область, на долю которой приходится 34 %. Лидерами среди регионов, реализующих ГЧП-проекты, являются Республика Алтай (16 проектов), Омская, Томская области (по 11 проектов), Алтайский край (10 проектов).

В Республике Бурятия полностью отсутствуют инфраструктурные проекты, реализуемые в социальной сфере, лидером в области ГЧП являются проекты в сфере энергетики (50 %). В Республике Тыва и в Алтайском крае, по данным органов исполнительной власти, все инфраструктурные проекты реализуются с использованием механизма ГЧП, наибольшая доля приходится на транспорт (Республика. Тыва) и энергетику (Алтайский край). В Республике Хакасия реализуются лишь 3 ГЧП-проекта – по одному проекту в сферах транспорта, жилищно-коммунального хозяйства и комплексного развития территорий. Полностью отсутствуют ГЧП-проекты, реализуемые в социальной сфере. Аналогичная ситуация с отсутствием ГЧП-проектов в социальной сфере наблюдается в Забайкальском и Красноярском краях, большинство проектов здесь реализуется в рамках комплексного развития территорий. В Омской и Томской областях заявлено по 11 ГЧП-проектов, из которых наибольшая доля приходится на сельское и жилищно-коммунальное хозяйства соответственно. Наименьшее число ГЧП-проектов реализуется в Новосибирской (2 проекта) и Кемеровской (1 проект) областях. В Иркутской области реализация проектов с использованием механизма ГЧП отсутствует.

Несмотря на разнообразие существующих схем финансирования проектов государственно-частного партнерства, ГЧП-проекты Сибирского федерального округа финансируются в большей степени за счет средств федерального и регионального бюджетов, федеральных и региональных целевых программ, а также за счет средств Инвестиционного фонда и государственных корпораций. В меньшей степени используются банковские кредиты и финансовые ресурсы частного инвестора. Данное обстоятельство обусловлено ограниченными возможностями привлечения долгосрочных кредитов по низким ставкам, а также их доступность только очень крупным компаниям. Низкая доля частных инвестиций обусловлена отсутствием заинтересованности бизнеса в софинансировании государственно значимых инвестиционных проектов, что, в свою очередь, обусловлено неблагоприятными правовыми условиями, отсутствием гарантий со стороны государства в отношении обеспечения высокой доходности по проектам в сочетании с оптимальными рисками.

В то же время в отдельных регионах наблюдаются определенные шаги по стимулированию инвесторов к участию в проектах ГЧП. Так, например, в региональном законе Республики Алтай о ГЧП в качестве основных форм государственной поддержки развития государственно-частного партнерства отмечены следующие [3]:

1) субсидии на возмещение части затрат или недополученных доходов, в том числе связанных с тарифным регулированием цен на товары (работы, услуги) и реализацией партнером товаров (работ, услуг) по установленным соглашением тарифам;

2) предоставление государственных гарантий Республики Алтай;

3) предоставление налоговых льгот;

4) размещение государственного заказа на подготовку и переподготовку кадров.

Однако, несмотря на наличие положительных изменений в области активизации государственно-частного партнерства в регионах СФО, существуют определенные барьеры для развития сотрудничества государства и бизнеса. В рамках проведенного исследования Центром развития государственно-частного партнерства среди общих для Сибирского округа были выделены следующие препятствия [2]:

– дефицит компетентных кадров и сложности в проработке проектов;

– ограничения на привлечение дорогостоящих консультантов, нехватка практической информации;

– ограниченное количество квалифицированных частных инвесторов и компаний-операторов;

– ограничения в возможностях привлечения частных средств, отсутствие возможности предоставления бюджетных гарантий;

– несовершенство законодательной базы;

– проблема обеспеченности региональных бюджетов (нехватка средств для проектов);

– проблема разграничения полномочий между органами власти и муниципалитетами.

Помимо указанных проблем стоит отметить отсутствие в регионах СФО специализированных структур, координирующих реализацию инфраструктурных проектов. Проекты попадают в различные профильные ведомства – от департаментов по инвестициям или внешнеэкономической деятельности до отраслевых подразделений.

Для эффективного функционирования механизма ГЧП в регионах прежде всего необходимо устранить существующие негативные факторы. Решению проблем, по мнению представителей региональных органов власти, должны способствовать [2]:

– принятие федерального закона о ГЧП;

– создание на федеральном и региональных уровнях специализированных структур (своеобразных центров компетенций), координирующих вопросы ГЧП, задачами которых являлись бы поиск инвесторов, продвижение региональных проектов, консультирование и т. п.;

– выработка единой политики и оптимальной схемы взаимодействия федеральных и региональных органов власти при реализации проектов ГЧП;

– увеличение объема поддержки и гарантий частным инвесторам со стороны государства;

– повышение уровня подготовки специалистов, принимающих участие в реализации ГЧП-проектов;

– восполнение дефицита практической информации и другое.

Таким образом, в отношении формирования и развития государственно-частного партнерства как механизма активизации инвестиционной деятельности в регионах Сибирского федерального округа можно сформулировать следующие выводы:

Во-первых, активное развитие государственно-частного партнерства в регионах СФО наблюдается

в течение последних двух-трех лет, что обусловлено дефицитом бюджетных средств и отсутствием заинтересованности частных инвесторов вкладывать деньги в долгосрочные инфраструктурные и социально значимые проекты. В сложившихся условиях региональные органы власти вынуждены осуществлять поиск иных форм и методов стимулирования инвестиционной деятельности.

Во-вторых, наибольшее развитие в регионах СФО получили проекты в области комплексного развития территорий (в том числе особых экономических зон), а также транспортные и энергетические проекты. На общем фоне выделяется Республика Алтай, где приоритетными направлениями по реализации ГЧП-проектов являются здравоохранение и образование.

В-третьих, отсутствие федерального закона о государственно-частном партнерстве обусловливает активизацию региональных органов власти в отношении формирования собственной нормативной базы. В девяти из двенадцати субъектов федерального округа уже приняты региональные законы об участи в ГЧП. Однако вопросы в аспекте качества и эффективности принятых региональных актов по-прежнему остаются открытыми. Наличие расхождений в определении понятия ГЧП, субъектов ГЧП, механизмов и правовых конструкций указывает на различия в подходах, а также на очевидные противоречия федеральному законодательству. Данный факт, в свою очередь, обусловливает отсутствие практической реализации ГЧП-проектов в рамках действующего законодательства.

В-четвертых, институциональная основа для реализации инфраструктурных проектов (в том числе на основе ГЧП) может оцениваться как «нулевая».

В-пятых, при выборе схем реализации проектов отдается приоритет модели бюджетного финансирования.

Тем не менее в целях обеспечения роста инвестиционной активности необходимо продолжать работу по совершенствованию механизма государственно-частного партнерства в регионах Сибирского федерального округа. В связи с этим необходимо обратить внимание на зарубежный опыт и опыт отдельных субъектов Российской Федерации (в частности, г. Санкт-Петербурга), который предоставит возможность Сибири выбрать и применить на практике лучшие решения и модели, избежав экономического экспериментирования и повторения наиболее типичных ошибок.

Библиографические ссылки

1. Инвестиции в России 2011. Статистический сборник. URL: http://www.gks.ru.

2. Аналитический отчет по результатам исследования «Реализация инфраструктурных проектов и развитие механизмов государственно-частного партнерства в Сибирском федеральном округе». URL: http://www.pppinrussia.ru.

3. Закон Республики Алтай «Об основах государственно-частного партнерства в Республике Алтай» № 15-РЗ от 05.03.2008. URL: http://altai.regionz.ru/index.php?ds=1319796.

I. R. Ruyga, D. E. Katsik

PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIP AS A STIMULATION MECHANISM OF INVESTMENT ACTIVITIES IN THE REGIONS OF SIBERIAN FEDERAL DISTRICT

The description of region legislation in Public-Private Partnership (PPP) is presented, the realized region PPP-projects are analyzed, problems and perspectives of development of Public-Private Partnership in Siberian regions are indicated.

Keywords: investment policy, stimulation mechanisms of investment activities, public-private partnership.

© Руйга И. Р., Кацик Д. Е., 2012

УДК 378

С. М. Самохвалова

ИНСТРУМЕНТЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫМ РАЗВИТИЕМ ВУЗА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ КОНКУРЕНЦИИ

Установлена связь между оценкой эффективности стратегии инновационного развития вуза в условиях конкуренции на мировом образовательном рынке и оценкой качества бизнес-процессов стратегического управления инновационным развитием. Классифицированы бизнес-процессы стратегического управления инновационным развитием вуза. Обосновано использование специальных аналитических инструментов оценки качества бизнес-процессов стратегического управления инновационным развитием вуза.

Ключевые слова: инновационное развитие, стратегия, бизнес-процессы, оценка качества.

Большинство современных инновационных или исследовательских вузов активно используют методологию стратегического управления в таких ее аспектах, как обоснование и выбор типа стратегии инновационного развития, определение стратегических целей и разработка стратегического плана на перспективу до пяти лет. В то же время оценка эффективности реализации стратегии инновационного развития вуза осуществляется пока при неполном теоретическом и прикладном технологическом обосновании.

Имеющийся арсенал оценочных ресурсов сводится к ведению вузом типовой отчетности для государственных надзорных органов, научных фондов, российских и зарубежных институтов и экспертных или сертифицирующих структур. Каждое из указанных направлений предполагает дискретную оценку качества образовательной и исследовательской деятельности по дифференцированным требованиям и не дает единой картины исполнения принятой стратегии. Решение задачи оценки эффективности стратегии вуза, на наш взгляд, будет определяться:

– выбором объектов оценки;

– фокусированием оценочной информации на руководстве вуза, ответственном за принятие стратегических решений;

– возможностью определения направлений корректировки стратегии на основе полученной оценочной информации.

Оценка качества бизнес-процессов стратегического управления в достаточной степени способна воспроизвести картину стратегических результатов долгосрочного инновационного развития вуза за счет возможности установления соответствия качественных и количественных характеристик планируемого и достигаемого эффекта в рамках конкретного процесса. Бизнес-процессы являются базовым объектом оценки эффективности реализации стратегии, так как:

– корректная модель бизнес-процесса предполагает наличие на выходе некой сформированной ценности, что позволяет дать измеримую оценку результатов;

– инжиниринг бизнес-процессов осуществляется на долгосрочную перспективу, тем самым их стабильное исполнение является одним из критических факторов успеха стратегии;

– образовательные и исследовательские процессы могут реализовываться только на стратегическом уровне, так как их результат всегда отложен во временной перспективе и существенно влияет на конкурентное положение вуза;

– процессное описание работ в рамках исследовательских и образовательных проектов, реализации образовательных программ (даже если оно проводится только для процессов верхнего уровня) снижает уровень неопределенности образовательного или исследовательского результата.

Все сказанное выше позволяет перевести проблему оценки эффективности стратегии инновационного развития вуза в плоскость оценки качества бизнес-процессов стратегического управления инновационным развитием.

Определим состав бизнес-процессов в рамках стратегии инновационного развития. В целом систематизация бизнес-процессов в настоящее время выделилась в отдельную самостоятельную область исследований, которой занимаются много исследователей. Проводимая в данном исследовании классификация исследовательских и образовательных бизнес-процессов должна учитывать тенденции формирования открытого глобального образовательного пространства, которые задают высокие требования к уровню инновационного развития современного вуза. С одной стороны, образовательным учреждениям, стремящимся к востребованности на мировом уровне, необходимо максимально стандартизировать бизнес-процессы, ориентируясь на опыт образовательных лидеров. С другой стороны, созданный и развиваемый вузом портфель инноваций, должен быть уникальным, обеспечивая тем самым конкурентоспособность учебного заведения на рынке образовательных и научно-исследовательских услуг.

Достаточно простой прикладной подход к классификации бизнес-процессов был предложен в результате выполнения норвежского проекта TOPP по сравнительному бенчмаркингу. Эта программа по разработке методов повышения продуктивности производства выполнялась под управлением организации NTNU/SINTEF, находящейся в Трондхейме. В результате для создания предпосылок к разработке методов самооценки и сравнительного бенчмаркинга была

предложена структурная схема бизнес-процессов. Все процессы были поделены на первичные и поддерживающие (вспомогательные) в соответствии с теорией Портера о цепочках ценности. Некоторые из поддерживающих процессов были потом выделены в отдельный класс – процессов развития. Эти три группы процессов определяются следующим образом:

– первичными процессами называются основные и создающие ценности процессы организации или проекта. Эти процессы пронизывают всю организацию, в частности университет, начиная со студентов и заканчивая работодателями.

– поддерживающие (вспомогательные) процессы не создают непосредственно добавленную ценность. Они нужны для обеспечения основных процессов. Такими вспомогательными процессами в рамках стратегии инновационного развития могут быть, например, управление информацией, развитие инновационной инфраструктуры.

– развивающие процессы – это такие процессы, которые позволят создать цепочку ценности в основном и вспомогательном процессах на новом уровне показателей [1].

Полученная классификация процессов инновационного развития вуза, ориентированного на интеграцию в мировую образовательную систему, основана на указанной группировке (рис. 1).

Как видим, процессы стратегического управления определены как бизнес-процессы верхнего уровня. Многие из указанных бизнес-процессов не являются стабильно воспроизводимыми, в то же время процессный подход к исследовательской и образовательной деятельности делает ее относительно менее неопределенной.

Требование фокусирования оценочной информации и определения направлений корректировки стратегии удовлетворяются обоснованным выбором метода анализа и оценки качества бизнес-процессов стратегического управления. Типовым методом оценки эффективности стратегии является оценка по шести областям сбалансированных стратегических показателей Нортона–Каплана. Оценка качества бизнес-процессов традиционно проводится в формате оценки действующей в организации системы менеджмента качества.

Сравнительная характеристика методического аппарата оценки эффективности стратегии и оценки качества бизнес-процессов приводится в табл. 1.

Анализ, представленный в таблице, указывает на противоречия. Во-первых, оценка качества бизнес-процессов может выступать в роли основного механизма оценки эффективности стратегии инновационного развития вуза, однако действующий типовой инструментальный аппарат оценки системы менеджмента качества недостаточно соответствует особенностям стратегического управления инновационным развитием. В свою очередь, типология областей сбалансированных стратегических показателей также нуждается в адаптации для данного вида оценки.

Уровень стратегического управления задает проактивный характер оценочной информации, следовательно, инструменты оценки качества бизнес-процессов не могут заключаться в разработке ключевых показателей эффективности процессов инновационного развития вуза и снятии оценочной информации по ним. Выбранный инструмент оценки качества должен создавать такую информационную выборку, которая покажет, где потребность в улучшении наивысшая. При интерпретации результатов измерений для определения приоритетов для усилий по совершенствованию исполнения стратегии имеются следующие аналитические инструменты:

1) анализ трендов;

2) матрица показателей;

3) тестирование критериев (критических факторов успеха);

4) оценка контрольных показателей процесса Stage Gate Process при выполнении проектов;

5) структурирование функций качества (построение «дома качества»).

Таблица 1

Возможности использования традиционных подходов к оценке качества бизнес-процессов стратегического управления инновационным развитием вуза

Параметры оценки	Оценка системы менеджмента качества	Оценка эффективности стратегии по областям ССП
Возможность выбора направлений совершенствования по итогам оценки	Ограничена	Возможна в рамках шести областей ССП
Определенность и технологичность оценочных процедур	Высокая определенность и достаточная технологичность	Оценочные процедуры специально разрабатываются
Наличие эталонных значений результата по критическим факторам успеха стратегии	Эталонные значения качества имеются в ряде случаев, почти не связаны с инновационным развитием	Эталонные значения показателей необходимо специально определять
Соответствие состава отчетности требованиям стейкхолдеров	Недостаточное соответствие	Неточно соответствует составу стейкхолдеров инновационного развития
Соответствие областей оценки критическим факторам успеха стратегии	Недостаточное соответствие	Имеющиеся шесть областей оценки не полностью отражают КФУ стратегии вуза

Рис. 1. Классификация бизнес-процессов стратегического управления инновационным развитием вуза

Таблица 2

Пример матрицы тестирования критериев

Процессы	КФУ	1	2	3	4	5	Общая оценка
	Вес КФУ	3	1	1	3	2	
Процесс 1		3	3	2	9	4	19
Процесс 2		9	3	1	3	2	18
Процесс 3		9	2	3	6	6	**26**
…….							
Процесс *n*		3	2	2	3	6	16

Каждый из этих инструментов позволяет с разных точек зрения интерпретировать результат оценки и понять, в какой области нужно вести совершенствование процессов.

Анализ трендов представляет собой анализ направленности изменений уровня показателей. Сравнивая последние результаты измерений с более ранними, можно получить представление о направлении развития.

Матрица показателей используется не только для определения того, как работают бизнес-процессы, но и для того, чтобы выявить их предполагаемую степень важности. Эта матрица разбита на четыре квадранта, причем по горизонтали меняется важность, а по вертикали – текущий уровень показателей. Используя матрицу показателей, можно избежать затрат на совершенствование бизнес-процессов, которые также неудовлетворительны, но в то же время и не слишком важны [2].

Если у вуза есть четкое представление о том, на каких главных факторах основана его конкурентоспособность, то *тестирование критериев или КФУ* – инструмент, который можно использовать для определения того, какие же из бизнес-процессов оказывают наибольшее влияние на эти факторы. Пример матрицы тестирования критериев приведен в табл. 2. Чем выше итоговая оценка рассматриваемого процесса, тем больше оснований для его совершенствования. Это позволит добиться наибольшего совокупного улучшения критических факторов успеха. Применение данной матрицы позволяет выяснить, какие бизнес-процессы вносят наибольший вклад в критические факторы успеха, а следовательно, выявляет ключевые процессы для реализации стратегии.

Использование контрольных показателей процесса Stage Gate Process в целом характерно для проектного менеджмента. Учитывая, что ряд бизнес-процессов инновационного развития вуза обеспечивают выполнение исследовательских и образовательных проектов, данный инструмент применим к оценке качества таких процессов. При использовании SGP процесс разбивается на контрольные (реперные) точки, для прохождения которых должны быть выполнены установленные требования. Преимущества SGP заключаются в полной прозрачности процесса за счет четкого описания, какие цели должны быть достигнуты на каждом этапе проекта, в возможности при необходимости заморозить проект на каком-либо этапе («воротах»), а затем, спустя какое-то время, без потерь продолжить его, начиная с тех же «ворот». Это особенно актуально при реализации вузом коммерческих исследовательских проектов, когда изменившаяся ситуация на рынке неизбежно приводит к смещению акцентов в оперативных целях заказчика [3].

Метод структурирования функции качества (СФК), предполагающий разработку и использование матрицы «Дом качества» Едзи Акао, изначально был предназначен для организации процесса разработки продукции, ориентированной на потребителя. Особенность СФК состоит в том, что он позволяет идентифицировать взаимосвязи между требованиями и средствами их удовлетворения, а также предоставляет инструмент анализа этих взаимосвязей. Эта особенность реализуется путем построения специальной таблицы, которую называют «домом качества». Здесь накапливаются результаты исследования, которые используются для совершенствования бизнес-процессов. В областях «дома» размещают исследуемые элементы. Пример размещения элементов в квадрантах «дома качества» дан на рис. 2.

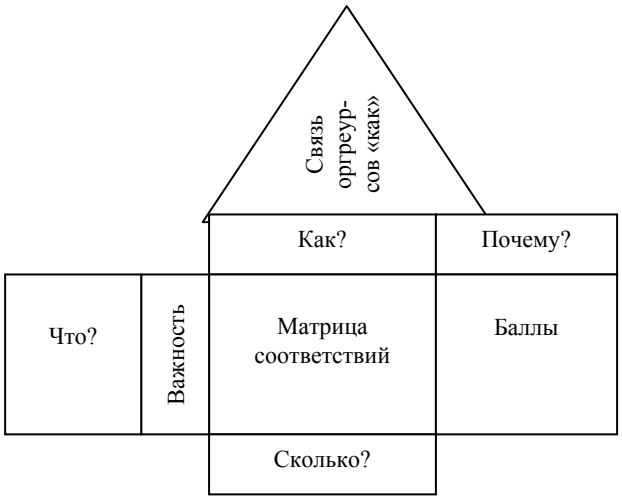


Рис. 2. Формат матрицы «Дом качества»

В квадранте «*Что?*» размещается набор требований, предъявляемых к процессу. Самые важные из них те, что предъявляют внешние стейкхолдеры. Здесь можно также размещать требования, предъявляемые внутренними стейкхолдерами.

В *«Степени важности»* размещаются веса важности конкретных требований.

В квадранте «*Как?*» размещаются элементы, которые представляют собой средства (организационные

процессы или ресурсы), используемые для удовлетворения различных требований. Если, например, требуется сократить время разработки ТЭО, то соответствующим средством, размещенным в «*Как?*», может быть, например, использование специализированного расчетного программного продукта.

В *«Матрице соответствий (отношений)»* в центре «дома качества» размещаются элементы, которые непосредственно отражают взаимосвязи между результатами или требованиями и средствами их удовлетворения. Символы, используемые для обозначения этих взаимосвязей, приведены ниже:

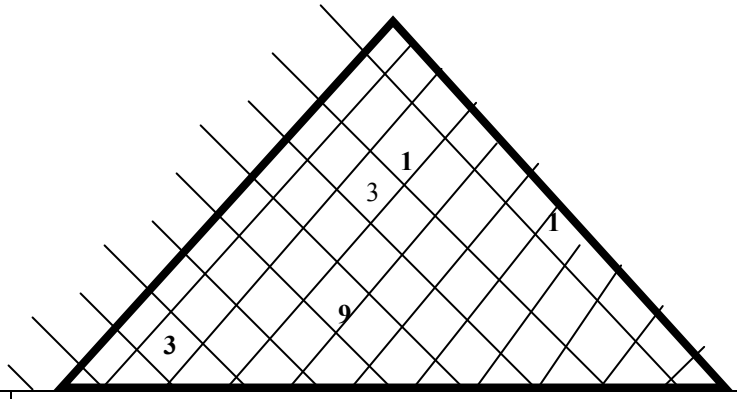
– сильная зависимость требования от ресурса – 9 баллов;

– средняя зависимость требования от ресурса – 3 балла;

– слабая зависимость требования от ресурса – 1 балл.

В связях организационных ресурсов «Как?» и «Как?», т. е. на крыше «дома качества», размещаются элементы, которые представляют собой взаимосвязи между *различными средствами* удовлетворения требований. Выделяются такие уровни взаимосвязи, как сильная положительная связь – 9 баллов, положительная связь – 3 балла, отрицательная – 1 балл, сильная отрицательная связь – 0 баллов. Устанавливая уровень взаимосвязи по параметрам, мы видим взаимную зависимость изменения бизнес-процессов.

Рассмотрим на примере готовность вуза удовлетворить требования высокотехнологичного предприятия – заказчика целевой подготовки студентов за счет инновационных бизнес-процессов. В матрице на рис. 3 составлен перечень требований и указан их вес. Далее проведена балльная оценка влияния каждого бизнес-процесса на требования стейкхолдера, выявлена абсолютная важность бизнес-процессов.



Индикаторы требований стейкхолдеров («Что?»)		Вес	Бизнес-процессы («Как?»)									
			Аспирантские и докторские исследования	Гранты	Образовательные и исследовательские проекты	Научные конференции	Обновление МТБ	Издание научных сборников	Обучение, консалтинговая деятельность ППС	Развитие инновационной инфраструктуры	Академическая мобильность	Информационная. система управления знаниями
Требования	Целевые компетенции выпускников	10			9	1	3		3	9	3	
	Заданные сроки реализации образовательной программы	5									1	3
	Научное развитие лучших разработок студентов и выпускников	5	9	1	3	1				1		
	Научно-исследовательский консалтинг	6		3		3	1	3	9	3		9
	Поддержка интереса студентов к обучению	6	1		9	1	1	1			3	
Абсолютная важность процесса			51	23	159	39	42	24	84	113	53	69
Сложность реализации процесса (разница между эталонным и достигнутым качеством)			1	2	2	1	1	3	3	2	3	3
Абсолютная важность с учетом сложности			51	46	318	39	42	72	252	226	159	207

Рис. 3. Матрица «Дом качества» – анализ бизнес-процессов целевой подготовки студентов в вузе

Матрица позволяет также оценить важность бизнес-процессов с учетом сложности их выполнения. Определив разницу между эталонным (например, 4 балла) и достигнутым уровнем качества бизнес-процесса по КПЭ процесса, можно оценить сложность процесса. В данном случае максимально влияет на удовлетворение требований стейкхолдера бизнес-процесс «исследовательские и образовательные проекты», вторым по важности и необходимости повышать качество – бизнес-процесс «обучение и консалтинговая деятельность ППС». Также мы видим сильную взаимосвязь между бизнес-процессами «исследовательские и образовательные проекты» и «создание инновационной инфраструктуры».

Этот пример показывает, что матрица СФК – мощное средство не только для оценки качества бизнес-процессов, но и для оценки эффективности стратегического управления инновационным развитием.

В качестве стейкхолдеров стратегии инновационного развития вуза могут также выступать научно-педагогический персонал вуза, различные научные фонды, непосредственно учащиеся, а также иные субъекты рынка инноваций.

Таким образом, оценка качества бизнес-процессов стратегического управления инновационным развитием вуза основана на:

– составлении перечня бизнес-процессов стратегического управления инновационным развитием;

– документировании данных бизнес-процессов;

– разработке КПЭ процессов;

– выборе инструментов измерения качества и анализа уровня реализации стратегии.

Подводя итоги, можно сказать, что результаты измерений, полученные в процессе подобной оценки, представляют собой более связанный и целостный стратегический уровень анализа. Результатом использования различных инструментов, описанных в данном исследовании, становится не просто констатация достигнутого качества процессов, а определение приоритета бизнес-процесса или стратегической области управления вузом, где улучшение необходимо. Это позволяет менеджменту вуза составить общее представление о потребностях и возможностях (потенциале) развития в долгосрочной перспективе. В результате ресурсы, предназначенные для усовершенствований, направляются самым рациональным образом и в самое нужное место.

Библиографические ссылки

1. Андерсен Бьерн. Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования. М. : Стандарты и качество, 2005.

2. Репин В. В. Бизнес-процессы: моделирование, внедрение, управление. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2012.

3. Создание и внедрение стандартизованных процессов подготовки производства на основе лучших мировых практик / Р. Бирбраер [и др.] // САПР и графика. № 5. 2011. URL: http://www.sapr.ru/article.aspx?id=22229&iid=1016.

S. M. Samokhvalova

QUALITY ASSESMENT OF BUSINESS-PROCESSES OF UNIVERSITY STRATEGIC MANAGEMENT AT GLOBAL EDUCATIONAL COMPETITION

Connection between assessment of efficiency of strategy of innovative development of higher education institution in the conditions of competition in the world educational market and assessment of quality of business processes of strategic management of innovative development is established. Business processes of strategic management by innovative development of higher education institution are classified. Use of special analytical tools of assessment of quality of business processes of strategic management of innovative development of higher education institution is proved.

Keywords: innovative development, strategy, business processes, quality assessment.

© Самохвалова С. М., 2012

УДК: 338.22.01

С. С. Семенов

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА: МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ

Рассматриваются вопросы формирования экономической политики предприятий ОПК как инструмента стратегического планирования деятельности предприятий. Представлена классификация факторов формирования экономической политики предприятий ОПК. Предложена матричная модель для формирования экономической политики.

Ключевые слова: экономическая политика; факторы, влияющие на формирование экономической политики предприятий ОПК; модель формирования экономической политики.

В рамках решения задачи по укреплению обороноспособности страны государство осуществляет реформирование предприятий оборонно-промышленного комплекса (ОПК), в частности, большинство федеральных государственных унитарных предприятий (ФГУП) преобразуются в открытые акционерные общества (ОАО). В результате они получают большую самостоятельность в принятии экономических решений. У них появилось право выбора, в том числе стратегической цели и путей ее достижения, а следовательно, осуществлять стратегическое планирование.

В научной литературе наиболее часто упоминаются такие инструменты стратегического планирования, как PEST-анализ, методика анализа отрасли, карты стратегических групп, модель «Пять сил конкуренции» (М. Портера), SNW-анализ, матрицы угроз и возможностей (профиль среды), SWOT-анализ, методы портфельного анализа, матрица АДЛ, матрица Хофера, GAP-анализ и др. [1].

Перечисленные инструменты используются для анализа факторов внешней среды и выбора стратегических целей предприятия. Как правило, они помогают исследовать потенциал и риски выпуска новых продуктов и освоения новых рынков, однако игнорируют внутренние особенности и не учитывают резервы предприятия, в то время как результатом стратегического планирования должен быть выбор не только цели, но и наиболее оптимального пути ее достижения. Эту задачу, на наш взгляд, признан решать такой инструмент стратегического планирования, как политика, регламентирующая поведение функциональных подразделений предприятия.

В результате проведенного анализа деятельности предприятий ОПК выявлено, что все они разрабатывают учетную политику, так как этого требует законодательство, а иногда и дивидендную политику для ОАО. Причем, как правило, аргументация выбора методов учета, а также типа дивидендной политики отсутствует. Более того, зачастую эти политики не согласованы и даже могут оказывать противоречивое действие на достижение стратегических целей. Если учесть, что помимо названных предприятия могут формировать и другие политики в рамках функциональных направлений, охватывающих экономическую деятельность в целом, то актуальность поднимаемой проблемы не вызывает сомнения.

Эту проблему можно решить, разработав экономическую политику предприятия. В рамках данной статьи под экономической политикой предлагается понимать обоснованно выбранную линию поведения, обеспечивающую реализацию стратегических целей развития предприятия в условиях нестабильной экономики [6].

Экономическая политика направлена на выбор конкретного пути (средств и способов) достижения стратегических целей. Ее основной задачей является регламентирование поведения экономических служб предприятия.

Экономическая политика, как инструмент стратегического планирования, учитывает влияние не только внешних, но и внутренних факторов. Факторы, влияющие на формирование экономической политики предприятий ОПК, во многом обусловлены особенностями отрасли (табл. 1).

Традиционно факторы объединяют в две группы: внутренние, действующие внутри предприятия, и внешние, обусловленные влиянием внешней среды, на которые предприятие вынуждено реагировать.

По степени регулируемости принято также выделять регулируемые (Р) и нерегулируемые (НР) факторы.

Этот классификационный признак позволяет выявить факторы, на которые может быть направлено управляющее воздействие со стороны менеджмента (чаще всего это относится к внутренним факторам, например, цели предприятия или наличие трудовых ресурсов необходимой квалификации).

Любой фактор информативен. Но, получая о нем информацию, следует оценивать уровень ее достоверности. Речь идет о характере информации. Если она имеет вполне определенное неслучайное значение, то является детерминированной (Д). Если информация носит множество значений результативного признака (т. е. определенное статистическое распределение), то она имеет стохастический (С) характер. Если информацию нельзя считать достоверной, то она имеет неопределенный характер (Н).

Влияние факторов на формирование экономической политики проявляется по-разному. В частности, следует отметить однонаправленное или многонаправленное воздействие факторов на различные функциональные направления.

Таблица 1

Классификация факторов, влияющих на формирование экономической политики предприятий ОПК

Факторы	Характер информации	Степень регулируемости	Функциональные направления		
			Финансы	Маркетинг	Кадры
Внутренние факторы					
Организационно-правовая форма предприятия	Д	Р	+	–	+
Цели бизнеса	Д	Р	+	+	+
Расположенность менеджмента к риску	С	Р	+	+	+
Специфика производства	Д	НР	+	+	+
Потребность в инвестициях	Д	Р	+	+	+
Финансовое положение предприятия	Д	Р	+	+	+
Социальная политика предприятия	Д	Р	+	+	+
Наличие трудовых ресурсов необходимой квалификации	Д	Р	+	+	+
Условия труда	Д	Р	+	–	+
Внешние факторы					
Требования законодательства	Д	НР	+	+	+
Денежно-кредитная политика государства	С	НР	+	+	–
Государственная инновационная политика	С	НР	+	+	+
Налоговая политика государства	С	НР	+	+	–
Состояние кредитно-банковской системы	С	НР	+	–	–
Политика государства в области приоритетов распределения производимого товара	С	НР	+	+	–
Состояние рынка сбыта	С	НР	+	+	–
Наличие коммуникаций с научно-исследовательскими и образовательными организациями	Д	Р	+	–	+
Инфраструктура рынка труда	Д	НР	–	–	+
Кредитная политика партнеров	С	НР	+	–	–
Реакция покупателей на маркетинговые мероприятия	С	НР	–	+	–

Так, цели бизнеса, расположенность менеджмента к риску и другие факторы необходимо учитывать при разработке всех элементов экономической политики, в то время как условия труда, организационно-правовую форму, состояние кредитно-банковской системы следует принимать во внимание лишь при разработке некоторых политик.

Под воздействием перечисленных факторов руководство предприятия выбирает те или иные способы проведения политики. Этот выбор осуществляется на основе заранее сформулированных критериев.

Множество различных критериев можно объединить в две группы: целевые критерии и экономические показатели эффективности. Эти группы взаимосвязаны, так как каждой цели соответствует ряд экономических показателей. Целевые критерии являются важнейшими для принятия управленческих решений. От выбора цели зависят приоритеты, которые определяет руководство организации. Например, в качестве главной цели многие предприятия декларируют финансовую цель: максимизацию прибыли, максимизацию денежного потока или повышение уровня капитализации.

Вторая группа критериев представлена экономическими показателями эффективности. К ним относятся как абсолютные показатели (чистая и нераспределенная прибыль, величина выручки, величина валюты баланса и др.), так и относительные показатели (коэффициенты рентабельности, ликвидности, финансовой зависимости, деловой активности и др.). Конкретный состав показателей зависит от выбора приоритетной цели бизнеса, от отраслевых особенностей предприятия, от этапа его жизненного цикла и др.

С целью исследования влияния факторов на значение целевых критериев необходимо описать создать модель экономической политики. В самой общей форме модель – условный образ объекта исследования, сконструированный для упрощения процесса исследования. При построении модели предполагается, что ее непосредственное изучение дает новые знания о моделируемом объекте. Это же справедливо и для экономических моделей.

Экономическая модель представляет собой упрощенное представление действительности, абстрактное обобщение, чаще всего воплощенное в форме экономико-математической модели – математического описания экономического процесса или объекта. Однако следует помнить, что она лишь приближенно отображает некоторые свойства оригинала [2].

В современной экономической литературе недостаточно внимания уделяется моделям комплексного управления предприятием. Возникает необходимость в создании многофакторной модели принятия управленческих решений в области управления экономикой фирмы. Среди множества типов экономических моделей рассмотрим те из них, которые в экономической литературе предлагаются к моделированию экономической политики, а также к другим многосоставным направлениям экономической деятельности предприятия. Рассмотрим их подробно.

В работах Зиннатова [3] отмечается, что экономическая политика тесно связана с приоритетными направлениями деятельности предприятия. По его мнению, при управлении предприятием необходимо сформировать систему основных критериев, которые будут служить ориентиром при принятии управленческих решений. Выбор тех или иных критериев зависит от целей, которые стоят перед экономической политикой.

Если главной целью является увеличение прибыли предприятия, то в систему критериев входят показатели рентабельности экономического объекта (объектом может выступать как предприятие в целом, так и конкретный продукт или товар), характеристики рынка сбыта, а также наличие конкурентных преимуществ производства (доступность сырья, наличие собственной или арендованной материально-технической базы, квалифицированной рабочей силы и квалифицированного менеджмента, финансовых ресурсов).

Перечисленные критерии позволяют выделить наиболее значимые функциональные направления экономической политики, к которым часто относят финансы, кадры и маркетинг.

Преимуществом такого подхода к формированию экономической политики, назовем его целевым, является простота применения, поскольку при принятии управленческих решений учитываются только основные, наиболее важные факторы. Недостатками являются игнорирование ряда свойств экономической политики, присущих другим ее элементам (например, дивидендной, амортизационной политике и др.), а также изолированность принятия управленческих решений по каждому из элементов, без их взаимосвязи.

Данный подход учитывает цель экономической политики и связанную с ней систему критериев и показателей, но не предусматривает комплексного учета факторов, влияющих на выбор экономической политики. В результате применения целевого подхода к моделированию экономической политики не принимаются во внимание возможные альтернативные сценарии.

Моделирование экономической политики возможно на основе сетевого подхода [7]. При этом предприятие представляется в виде сети с ее «узлами» и связями. В деятельности фирм «сетевые» признаки проявляются по двум направлениям: во внутренней среде, когда само предприятие рассматривается как системное образование, и во внешней среде, где оно выступает в качестве одного из экономических субъектов более высокого уровня.

В современных трактовках под сетевой организацией понимается особый организационный тип, который характеризуется структурой свободно связанной сети принципиально равноправных и независимых партнеров. Вследствие ограниченности собственных ресурсов автономные члены сети для достижения общих целей постоянно прибегают к политике коллективного самоограничения, направленной на достижение общих целей. Главное усилие сетевой структуры направлено на сохранение различий между отдельными партнерами (и разнообразия их ресурсов) при одновременном признании ими коллективных ценностей и стремлении к их активному включению в процессы принятия решений.

В рамках такой структуры действует так называемая модель координации, иногда называемая «гетерархией» или «демократической иерархией». Авторы, придерживающиеся таких взглядов [7], предлагают перенести логику межорганизационной кооперации на внутриорганизационные процессы при формировании стратегических управленческих решений в области экономической политики. По их мнению, сетевой подход должен учитывать стратегию замены (или дополнения) иерархического контроля рыночной логикой, а также стратегию внутрифирменного предпринимательства.

Первая стратегия рассматривает внутреннюю среду предприятия как объект, обладающий закономерностями, свойственными рыночным отношениям. Этот подход позволяет найти стимулы для внутреннего инновационного развития предприятия, однако порождает внутрифирменную конкуренцию (например, за использование дефицитных ресурсов), что противоречит идее внутреннего сотрудничества. В рамках второй стратегии стимулируется динамика индивидуального поведения сотрудников. Ее недостатком является высокий риск потери контроля над действиями отдельных работников.

Использование сетевой модели при формировании экономической политики приводит к изменению функции управления. Она не имеет жесткой привязки к иерархическим позициям, а сталкиваясь со стратегически значимыми вопросами, оказывает поддержку в их решении. Высшее управленческое звено осуществляет при этом «тренерскую» работу с персоналом.

Таким образом, важной особенностью применения сетевого подхода является перераспределение «точек принятия решения». Если при классической структуре предприятия все важные решения принимаются руководством фирмы, то в сетевой структуре определенная доля важных решений принимается в структурных подразделениях. Руководство фирмы определяет главные цели и задачи экономической политики. Все остальные вопросы решаются в отдельных структурных подразделениях.

Преимуществами сетевого подхода является четкое разграничение элементов экономической политики по функциональным структурным подразделениям, высокие адаптационные способности, большая восприимчивость к технологическим изменениям. К недостаткам можно отнести изменение линейной структуры управления предприятием, а также отсутствие объединяющего фактора между структурными подразделениями. Существует ряд принципиальных особенностей экономической политики, которые не учитывает сетевой подход, а именно, синергический эффект, возникающий в результате взаимовлияния на формирование экономической политики в целом и ее отдельных элементов.

Таким образом, несмотря на то, что при использовании сетевого подхода к моделированию экономической политики учитывается ее цель (на уровне руководителя предприятия) и система критериев и показателей (на уровне структурных подразделений), комплексный учет факторов и состава экономической политики отсутствует вследствие разделения центров принятия решений. Применение рассмотренного подхода не учитывает наличие альтернативных вариантов при выборе экономической политики. В результате данный подход не соответствует критериям, стоящим перед моделью экономической политики.

Следующий подход к формированию экономической политики (его можно назвать системным) рассматривает ее как совокупность отношений между внутренними подразделениями предприятия, а также взаимоотношений с различными внешними субъектами [5].

В соответствии с этим подходом предприятие регламентирует отношения на основе ряда базовых компонентов экономической политики, к которым относятся: принципы деятельности, приоритеты, целевые установки и механизм взаимодействия с экономическими агентами внешней и внутренней среды.

Перечисленные базовые компоненты согласовываются с целевыми критериями бизнеса. Например, В. В. Нотченко [5] предлагает в качестве основной цели повышение конкурентоспособности предпринимательской структуры. В связи с этим необходимо выделить показатели, позволяющие оценить влияние экономической политики на уровень ее конкурентоспособности. Эти показатели подразделяются на те, которые можно оценить количественно (доля продаж в их общем объеме, износ активной части производственных фондов, изменение финансовых и коммерческих результатов деятельности предприятия), и те, для оценки которых можно применить только экспертные методы (репутация среди покупателей, соответствие товарного ассортимента потребностям покупателей, совершенствование форм стимулирования персонала росту производительности труда и пр.).

В соответствии с системным подходом формирование экономической политики реализуется поэтапно. На первом этапе учитываются мировые, национальные, а также отраслевые особенности ведения бизнеса. На втором этапе осуществляется опрос собственников, руководителей предприятия с целью выявления их представлений об основных элементах экономической политики. На третьем этапе окончательно формируются принципы и приоритеты, целевые установки деятельности фирмы с учетом проведенной ранее экспертной оценки.

В результате системного подхода к формированию экономической политики определяются особенности поведения с различными агентами внешней и внутренней среды, с которыми взаимодействует предприятие. Преимуществом такого подхода является учет различных неформализованных факторов, а недостатком – отсутствие формализации. Выбор типа поведения осуществляется на основе только эмпирических методов.

Неформализованный подход к формированию экономической политики не учитывает принципа сопоставимости альтернатив, потому что каждая альтернатива описывается множеством различных показателей, которые в большинстве случаев не совпадают по своей размерности и значимости. В таком подходе отсутствует сравнение различных вариантов, выбор на основе конкретных показателей, т. е. формальная оценка разных вариантов экономической политики.

Помимо вышеприведенных подходов формирования экономической политики в научной литературе встречаются модели, применяемые к отдельным составляющим экономической политики. В частности, матричный подход, рекомендуемый для разработки амортизационной политики [4]. На наш взгляд, такой подход целесообразно использовать для формирования экономической политики предприятия.

Матричная модель как одна из форм графического анализа представляет собой логическую имитацию тех или иных реальных явлений, процессов, отношений, объектов, процедур и их пространственное (в задаваемых координатах) позиционирование, отражающее внутренние причинно-следственные связи, пропорции, силы и факторы, определяющие закономерности и тенденции развития. Матрица имеет вид карты, напоминающей таблицу с небольшим (от четырех до девяти) числом строк и столбцов, называемых квадрантами. Квадранты формируют поле матрицы, левая и нижняя (реже верхняя) границы которого выполняют роль масштабных ориентиров. На этих ориентирах обязательно указываются характеристики определенных функций и свойств исследуемого объекта или уровень их проявления [4].

Матричная модель достаточно адекватно представляет альтернативные стратегические направления, возможные связи и воздействия, так как основывается на анализе конкретных учетно-отчетных данных предприятия, позволяет сравнить динамику процесса и выявить тенденции развития. К неоспоримым достоинствам матриц относятся:

– привязанность к конкретной производственно-хозяйственной ситуации, периоду времени, ресурсным возможностям; фиксирование в поле матрицы альтернативных вариантов ее развития, слабых и сильных элементов системы;

– возможность аналитической диагностики резервов развития, оптимизации распределения ограниченных ресурсов и стратегического прогноза;

– многофункциональность: осведомление, наглядная аргументация, иллюстрация, контроль, планирование и прогнозирование, поиск и обоснование решений, сравнительная оценка, анализ и диагностика;

– наглядность и логичность процедур ситуационного анализа, аргументации подготовки, обоснования профессиональных суждений, принятия управленческого решения;

– доступность и простота в понимании, обзорность, информативность.

Все перечисленные преимущества позволяют применять матричный подход для формирования эко-

номической политики. По каждому рассматриваемому элементу политики можно выделить варьирующий показатель, значения которого ограничены соответствующим типом политики (агрессивным, консервативным, умеренным). Матричный подход позволит наглядно показать множество различных возможных сочетаний этих типов по разным элементам экономической политики. Эти сочетания дают разные числовые значения варьирующих показателей (чистая прибыль, чистый денежный поток, коэффициенты ликвидности и др.). Сопоставляя значения полученных показателей с целевыми критериями бизнеса, можно обосновать выбор экономической политики. Недостатком такой системы является сложность ее применения, связанная большим количеством элементов экономической политики. Это обусловливает необходимость группировки отдельных элементов экономической политики, а также ранжирования влияющих на нее факторов по степени значимости. При этом формализованная матричная модель может быть дополнена неформализованным подходом посредством применения экспертных оценок.

Преимуществом матричного подхода является комплексность, учет различных факторов, возможность сопоставления альтернативных вариантов при формировании экономической политики. Кроме того, матричный подход обладает необходимым единообразием, компактностью, а также большей общностью и эффективностью в логических рассуждениях и выводах в сравнении с другими рассмотренными выше подходами. Необходимо отметить, что матричная модель позволяет учитывать сложный состав экономической политики. Такую возможность дает многомерная матрица.

Существуют ограничения в выборе типов политики каждого элемента. Матричная модель позволяет наглядно показать такие ограничения. Так, в табл. 2 представлены ограничения сочетаемости типов политики финансирования, управления оборотным капиталом и инвестиционной политики: рекомендовано (Р), допустимо (Д), не рекомендовано (НР). Эти ограничения диктует стратегическая цель предприятия. Для иллюстрации ограничений рассмотрены такие цели, как максимизация прибыли (МП), минимизация рисков (МР), увеличение объема продаж (на продукцию гражданского назначения) (УО).

Необходимо отметить, что в таблице представлены цели «в чистом виде». Анализ уставных документов предприятий ОПК выявил, что все они в качестве основной цели декларируют максимизацию прибыли. Однако руководство должно ограничивать ее приемлемым уровнем риска, а также соотносить с желаемым ростом объема продаж.

Если стратегической целью является минимизация рисков, то необходимо выбирать консервативные типы инвестиционной политики, политики финансирования и управления оборотным капиталом. При агрессивных типах этих политик уровень риска очень высокий, поэтому такое сочетание не рекомендуется.

Таблица 2

Матрица сочетаний типов политики функционального направления «финансы»

Политика финансирования	Политика управления оборотным капиталом	Инвестиционная политика		
		Агрессивная	Умеренная	Консервативная
Агрессивная	Агрессивная	МП-Р МР-НР УО-Р	МП-Р МР-НР УО-Р	МП-Р МР-НР УО-Р
	Умеренная	МП-Р МР-НР УО-Р	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-Д МР-Д УО-Д
	Консервативная	МП-Р МР-НР УО-Р	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-НР МР-Р УО-НР
Умеренная	Агрессивная	МП-Р МР-НР УО-Р	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-Д МР-Д УО-Д
	Умеренная	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-Д МР-Д УО-Д
	Консервативная	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-НР МР-Р УО-НР
Консервативная	Агрессивная	МП-Р МР-НР УО-Р	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-НР МР-Р УО-НР
	Умеренная	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-Д МР-Д УО-Д	МП-НР МР-Р УО-НР
	Консервативная	МП-НР МР-Р УО-НР	МП-НР МР-Р УО-НР	МП-НР МР-Р УО-НР

Если стратегической целью является максимизация прибыли либо увеличение объема продаж, то необходимо выбирать агрессивные типы инвестиционной политики, политики финансирования и управления оборотным капиталом. При агрессивных типах этих политик стоимость заемных средств минимальна, дополнительная прибыль от инвестиций наибольшая.

В совокупности представленных аргументов использование матричной модели отвечает всем требованиям и принципам формирования экономической политики предприятий ОПК.

Библиографические ссылки

1. Арутюнова Д. В. Стратегический менеджмент. URL: http://www.cfin.ru/press/marketing/2000-3/11.shtml.

2. Электронная экономическая библиотека. URL: http://www.economic-lib.ru/biznes-57/5.htm.

3. Зиннатов И. Х. Совершенствование экономической политики организаций потребительской кооперации : дис. … канд. эконом. наук : 08.00.05. Белгород, 2005.

4. Крупина Н. Н. Матричный метод в финансовом менеджменте: методология анализа амортизации // Финансовый менеджмент. 2008. № 5. С. 16–33.

5. Нотченко В. В. Методология формирования экономической политики повышения конкурентоспособности предпринимательской структуры в условиях вступления России в ВТО: автореф. дис. … д-ра экон. наук : 08.00.05. СПб., 2008.

6. Кузнецова В. А., Семенов С. С. Сущность и направления экономической политики предприятий // Вестник СибГАУ. 2010. Вып. № 3 (29). С. 204–209.

7. Фирсанова О. В. Методология исследования взаимодействия субъектов рынка в теории маркетинг-менеджмента. М. : Финансы и статистика, 2005.

S. S. Semenov

STRATEGIC PLANNING OF MILITARY-INDUSTRIAL COMPLEX: MATRIX MODEL OF ECONOMIC POLICY DEVELOPMENT

The issues of economic policy-defense companies as a tool for strategic planning of defense enterprises are considered in the article. The classification of the factors of economic policy-defense enterprises is presented. Matrix model for economic policy development is suggested.

Keywords: economic policy, economic policy development effect factors, model of economic policy development.

© Семенов С. С., 2012

УДК005.6:[339.137.2+338.242]

А. Н. Чаплина, Е. А. Герасимова

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКОЙ СФЕРЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Рассмотрены основные направления и тенденции развития современных предпринимательских структур, технологии управления клиентским капиталом компании на основе методов управления качеством.

Ключевые слова: предпринимательские структуры, конкурентоспособность, управление качеством, клиентский капитал, функция развертывания качества.

Управленческая парадигма XXI века формируется на: развитии организационных способностей фирм, применении клиент-ориентированных подходов; конкурентоспособности моделей бизнес-процессов, а также компетенциях, встроенных в бизнес-процессы. Современное развитие отечественной экономики и переход ее в новое качественное состояние выдвигает перед предприятиями потребительского рынка задачу пересмотра ряда прежних теоретических и практических ориентиров управленческой деятельности. Актуализация этих основных тенденций современного управления обусловлена эволюцией приоритетности принятия управленческих решений для функционирования и развития современных организаций как объектов экономического исследования и управления, созданием системы управления в условиях кастомизации продуктов и услуг, развития проектных концепций управления, развития инжиниринга, применения интегрированных бизнес-моделей, управления постоянными изменениями [1].

Эволюционная диагностика признаний управленческих решений в организации деятельности субъектов хозяйствования в экономической системе связана и с эволюцией рынка (рынок продавца, рынок покупателя, рынок постиндустриального общества, глобальный насыщенный рынок). Это инициирует изменение приоритетов и ключевых методологий управления, так как бизнес-модель организации существен-

но влияет на ее конкурентоспособность. При этом успешные в прошлом решения в области управления все быстрее конвертируются из достаточных условий в необходимые. Факторы, которые еще вчера были достаточными для создания конкурентных преимуществ, сегодня обеспечивают только необходимые условия конкурентоспособности. Глобальный насыщенный рынок нуждается в динамичном создании уникальных конкурентных преимуществ в сфере моделей бизнес-процессов организации деятельности и управления изменениями при доступности реализации необходимых условий эффективности.

Конкуренция между предприятиями представляет важнейший рычаг повышения эффективности практически всех форм экономической деятельности, способ непрерывного побуждения хозяйственной, деловой активности. Идеологически стратегическое управление формируется исходя из видения организации и на основе трех базовых составляющих: потенциала, стратегии и конкурентоспособности [2; 3].

Разработка мероприятий в рамках обеспечения конкурентоспособности предприятий должна осуществляться на основе следующих принципов: принцип системности; принцип функциональной направленности; принцип учета специфики деятельности; принцип информационного обеспечения; принцип использования современных технологий и инструментов; принцип комплексной оценки факторов. Таким образом, управление конкурентоспособностью предприятия есть процесс, а система управления конкурентоспособностью – механизм, который обеспечивает этот процесс.

В современных условиях наметилась устойчивая тенденция изменения концепции организации деятельности и менеджмента. Это обусловлено сущностной перестройкой отношений между поставщиками продуктов (товаров и услуг) и их потребителями (клиенты). Определяющей концепцией бизнеса выступает управление отношениями с клиентами. При этом цель управления организацией – персонализация и улучшение отношений с клиентами. Достижение этой цели обеспечивается на основе клиент-ориентированного подхода, направленного на установку таких отношений с каждым клиентом, которые создают уникальные ценности для клиента (часто неэкономические) и являются прибыльными для поставщика продуктов. Сила потребителя (клиента) сегодня значительно выше силы поставщика, что обеспечивает клиенту роль активного и чаще ведущего игрока бизнеса. Это обусловлено влиянием ряда факторов, которые необходимо учитывать при построении моделей бизнес-процессов повышения конкурентоспособности деятельности и менеджмента организации: для оценки стоимости бизнеса важную роль играет клиентская база (бизнес стоит столько, сколько стоят его клиенты, которых также волнует деловая репутация, доля рынка поставщика, финансовая устойчивость и др.); предельная насыщенность рынка поставщика (часто рынок перенасыщен, и постоянно нужно предлагать новые услуги); активно функционирующая и постоянно развивающаяся логистическая инфраструктура рынка (обеспечивается доставка продуктов самым удаленным потребителям); высокая однородность товаров и услуг (коммодитизация), которая создает трудности в отличии их в среде конкурентов; современный потребительский рынок имеет развитый информационно-коммуникационный комплекс (клиент информирован и имеет возможность сделать обоснованный выбор продукта); стирается разница между товаром и услугой, которая может быть более прибыльной для поставщика (сервесизация товаров); важнейшей ценностью культуры организации выступает персонализация и психологизация отношений с клиентом (лицом к потребителю) [4].

В этой связи существует возможность и необходимость интеллектуализации предпринимательства, выраженная, во-первых, в том, что основным экономическим продуктом предпринимательской деятельности все чаще выступает интеллектуальный продукт (ноу-хау, программное обеспечение, методика, технология и т. п.) и высокотехнологичный продукт (доля затрат на НИОКР в продукте более 3,5 %); во-вторых, в том, что сами предприниматели становятся интеллектуалами, знаменуя развитие нового типа предпринимательства. Это создает условия для возрастания роли образования как основы формирования и развития интеллектуальных ресурсов, создания и трансферта новых знаний в экономику. Система образования неизбежно становится ближе к предпринимательству в сфере услуг, интегрируется с ним [5].

Все изложенное выше приобретает особую значимость в условиях, когда конкурентные состязания предпринимательских структур (ПС) перемещаются главным образом в сферу накопления интеллектуального потенциала и установления долговременных контактов с потребителями. В этой связи не менее актуальным становится термин «клиентский капитал» и получает широкое распространение в практике бизнеса ПС. При этом клиентский капитал является элементом структурного капитала, который формируется за счет инвестирования в деловую репутацию (имидж) ПС в глазах потребителей, т. е. распространение информации о предприятии среди наиболее широкого круга потребителей. Ценность и результативность такой работы растет, если полученная информация преобразуется в определенного рода нематериальный актив. Такие «знания о потребителях» становятся клиентским ресурсом ПС. Это и есть преобразование человеческого капитала в структурный капитал, а именно – клиентский капитал. При этом существует серьезная проблема оценки как интеллектуального капитала в целом, так и его составляющих элементов. Рыночные механизмы недостаточны, и нужны новые подходы, модели, инструменты и методы.

Деятельность организации может быть успешной только при условии определения и удовлетворения запросов потребителей. Организация, согласно положениям современной теории управления качеством, должна демонстрировать постоянную готовность вы-

являть требования потребителей и рынка. Это вызывает необходимость совершенствования применяемых подходов к управлению, потребность быстро и гибко реагировать на запросы потребителей и рынка.

В настоящее время одним из современных инструментов непосредственного воплощения ожиданий потребителя в оптимальные характеристики, обеспечивающие конкурентоспособность продукта с позиций качества, является технология QFD – Quality Function Deployment, или «функция развертывания качества» [6].

Составляющие процесса управления взаимоотношениями с потребителями (клиентские ресурсы) – формирование и реализация механизма обратной связи, наличие которого позволяет определить, насколько восприятие потребителей в отношении произведенной продукции (услуги) соответствует ожиданиям и нуждам, выявленным в ходе сбора информации, и установить таким образом степень удовлетворенности потребителей (рис. 1).

Использование функции развертывания качества в целях проектирования системы предоставления услуги позволит:

– идентифицировать требования потребителей наиболее эффективным способом, выделить среди них ключевые требования (с точки зрения достижения успеха организации) и воплощать их в услуге, оптимизируя характеристики системы предоставления услуги с целью достижения максимальной удовлетворенности потребителя;

– однозначно определить процессы самой организации, нуждающиеся к тому же в меньшей реструктуризации, начиная с того времени, как услуга появится на рынке;

– наиболее эффективно использовать ограниченные ресурсы организации для обеспечения как тактических, так и стратегических целей;

– привить специалистам проектный стиль работы, чему очень способствует графический способ представления информации, делающий ее понятной для представителей всех подразделений организации.

При проектировании системы предоставления услуги предлагается использовать технологию развертывания функции качества, адаптированную для сферы услуг с целью обеспечения конкурентоспособности организации с учетом этапов, представленных на рис. 2.

Функция качества в данном случае – это набор конкретных характеристик услуги – атрибутов, присущих данному виду услуги и воспринимаемых потребителем. Развертывание предполагает предельно возможную детализацию функции качества путем последовательного заполнения серии логически связанных специальных матриц HOQ – Houses of Quality, или «домов качества» [6].

Прогрессивность и актуальность использования адаптированной особенностям сферы услуг технологии QFD подтверждается тем, что данную технологию возможно применять также с целью совершенствования существующей системы предоставления услуг, для того чтобы устранить деятельность, не добавляющую ценность для потребителя, повысить эффективность деятельности организации в целом и в результате достичь максимальной удовлетворенности потребителя. Основным отличием будет являться то, что в качестве потребительских требований при построении «дома качества» будут выступать атрибуты услуги, которые могут быть реализованы различными способами и для которых предстоит выбрать такие конкретные значения ресурсов – вариантов управленческих решений, которые позволят максимально удовлетворить требования потребителей в соответствии со стратегией охвата целевого рынка.

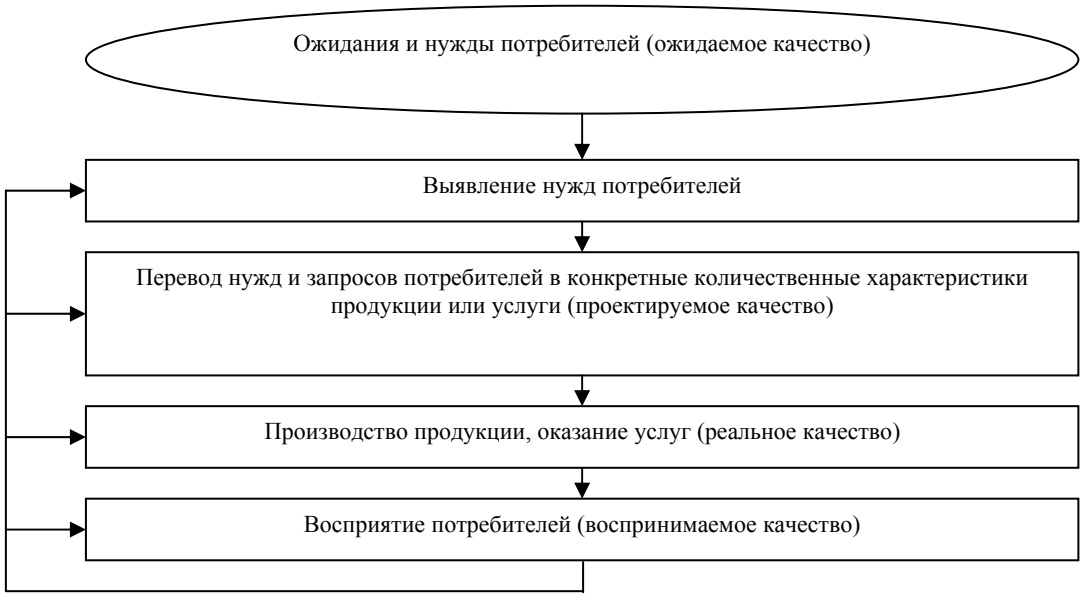


Рис. 1. Технология управления клиентским капиталом

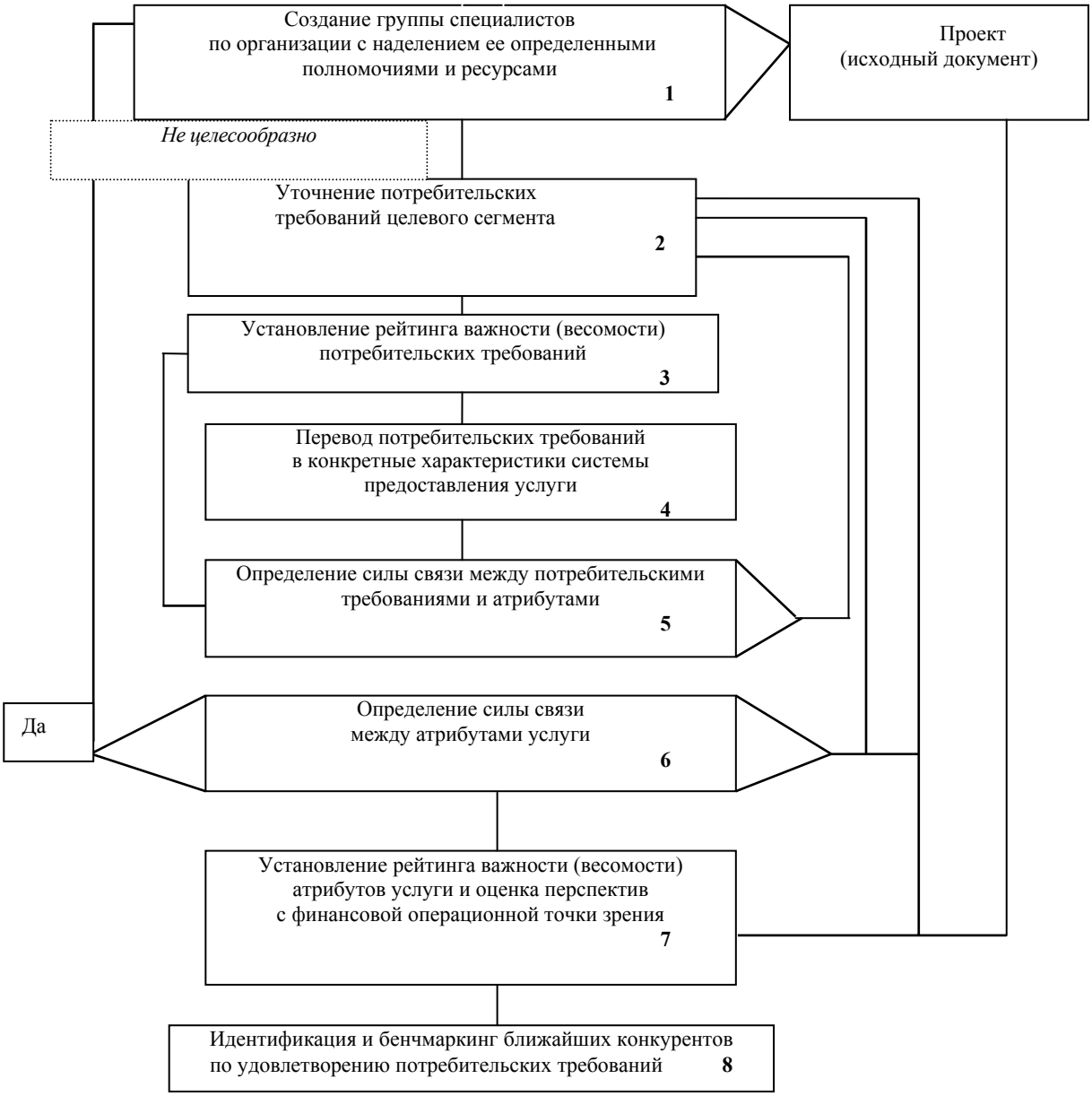


Рис. 2. Технологическая схема развертывания функции качества, адаптированная для сферы для услуг

Рост числа постоянных клиентов является стратегической задачей для бизнеса. Борьба за постоянного клиента предполагает рост степени лояльности, как правило, за счет группы неопределившихся потребителей. Задача организации – привлечь и удержать клиентов, т. е. стимулировать повторную покупку. Японский ученый Н. Кано в 1970-х гг. предложил модель, характеризующую степень удовлетворенности потребителя качеством продукции или услуги [6]. Теория Н. Кано базируется на следующих принципах: представления потребителей о качестве неясны, но могут быть выявлены и конкретизированы с помощью исследования; для некоторых характеристик продукции или услуги удовлетворенность потребителей пропорциональна степени присутствия данных характеристик; для некоторых характеристик такой жесткой зависимости не существует; принадлежность характеристик к той или иной группе может быть выявлена в ходе анкетирования, опросов и т. д.

Привлекающее или волнующее качество отражает такие свойства продукции или услуги, которые связаны с предвосхищением нужд потребителей. Их отсутствие воспринимается потребителями нейтрально и не препятствует выбору, однако наличие таких характеристик повышает удовлетворенность. Эти свойства способны приятно удивить потребителя, однако не рассматриваются им как обязательные. Необходимо иметь в виду, что привлекающее качество достаточно быстро переходит на уровень желаемого. Наличие и рост числа потребителей, удовлетворенных продукцией или услугами, предоставляют организации ряд преимуществ.

При исследовании удовлетворенности потребителей необходимо помнить ряд правил: удовлетворен-

ные потребители рассказывают о своем положительном впечатлении как минимум пяти знакомым, а в среднем – восьми, неудовлетворенные сообщают о своих впечатлениях разным людям в среднем 16 раз; для привлечения нового потребителя требуется в 5 раз больше затрат, чем для удержания существующего; 98 % неудовлетворенных потребителей не высказывают своих претензий к организации.

В ГОСТ ИСО 9004:2001 отмечено, что организации следует разработать и использовать источники информации об удовлетворенности потребителей, а также сотрудничать со своими покупателями с целью прогнозирования будущих потребностей. В качестве примеров источников информации в стандарте приведены: жалобы потребителей, непосредственное общение с ними, анкетирование и обзоры, сбор и анализ данных по субподряду, целевые группы, отчеты организаций потребителей, сообщения в различных СМИ, изучение отраслей сферы услуг и экономики.

Для получения наиболее полной информации об удовлетворенности потребителей организация должна выбрать соответствующие методы. В зависимости от источников информации их можно разделить на две группы: методы, основанные на использовании внешней информации, и методы, основанные на использовании внутренней информации. Исследование удовлетворенности потребителей будет эффективным при соблюдении следующих условий: системности проведения; охвата значительного числа потребителей; постоянного совершенствования методики оценки; принятия и реализации управленческих решений по результатам оценки.

В основе удовлетворенности потребителей лежат ожидания перед покупкой, сформированные под воздействием личных, социальных, ситуационных и коммуникативных факторов, и воспринятого качества услуг. Разрыв между ожиданиями потребителей и их восприятием полученных услуг, являющийся причиной снижения удовлетворенности потребителя или его полной неудовлетворенности предоставляемыми услугами, может возникнуть по двум основным причинам:

1) несоответствие сервисной стратегии предоставляемых услуг целевому сегменту («наполнение»), т. е. неадекватная сервисная стратегия;

2) несоответствие требованиям потребителей («исполнение»), т. е. неудовлетворенность качеством предоставляемых услуг.

Клиентоориентированность ПС в его реальном, а не надуманном воплощении позволяет устранить разрыв между ожиданиями потребителей и их восприятием полученных услуг, а технология разработки управленческих решений оценки конкурентоспособности торговых услуг (ОКС), позволит устранить причину или причины его появления.

Потребителю, равно как и производителю, зачастую сложно подобрать адекватный сопоставимый образец для того, чтобы результаты оценки носили релевантный характер. В данном случае рассчитывается конкурентоспособность услуги «вообще», относительно ожиданий потребителя, сформированных перед покупкой.

Для устранения выявленных в ходе оценки «узких мест» был построен «дом качества», адаптированный для сферы услуг с целью более детального анализа взаимосвязи атрибутов услуги и сервисной стратегии. Было проведено анкетирование потребителей, в ходе которого выявили узкие места и разработали решение данной проблемы (магазины г. Красноярска: «Эльдорадо», «Медиамаркет», «М.видео»).

На примере «дома качества», построенного по материалам ООО «М.видео Менеджмент» (г. Красноярск), видно, над какими параметрами нужно поработать и что нужно сделать для того, чтобы они удовлетворяли потребности покупателей (рис. 3).

Наряду с применением технологии QFD регулярная оценка конкурентоспособности услуг, поиск путей совершенствования позволят организации обеспечить желаемую конкурентную позицию. Основная идея технологии QFD заключается в понимании того, что между потребительскими свойствами («фактическими показателями качества» по терминологии К. Исикавы) и нормируемыми в стандартах, технических условиях параметрами продукта («вспомогательными показателями качества» по терминологии К. Исикавы) существует большое различие. Вспомогательные показатели качества важны для производителя, но не всегда важны для потребителя. Технология QFD позволяет преобразовать фактические показатели качества изделия в технические требования к продукции, процессам и оборудованию. В основе QFD лежит «профиль качества» – модель, предложенная Н. Кано, которая основана на трех составляющих: базовое качество; требуемое качество; желаемое качество.

Профиль базового качества – совокупность тех параметров качества продуктов, наличие которых потребитель считает обязательным. Профиль требуемого качества – совокупность показателей, представляющих технические и функциональные характеристики продукта (например, уровень потребления бензина автомобилем), обычно соответствует среднему уровню на рынке. Профиль желаемого качества – это группа параметров качества, представляющих для потребителя неожиданные ценности предполагаемого продукта.

Ключевые элементы и инструменты QFD: уточнение требований потребителя; перевод требований потребителя в общие характеристики продукта; выделение связи «что» и «как», то есть какой вклад вносит та или иная характеристика продукта (как) в удовлетворение желаний потребителя (что); выбор цели, то есть определяющих конкурентоспособность параметров качества; установление (по результатам опроса потребителей) рейтинга важности компонентов «что» и на основе этих данных определение рейтинга важности компонента «как». Таким образом, необходимо подчеркнуть необходимость и возможность применения современных механизмов воздействия на конкурентоспособность компании на основе методов управления качеством, в том числе с использованием технологии QFD, которая позволяет разрабатывать проекты по качеству, ориентированные на удовлетворение требований потребителя.

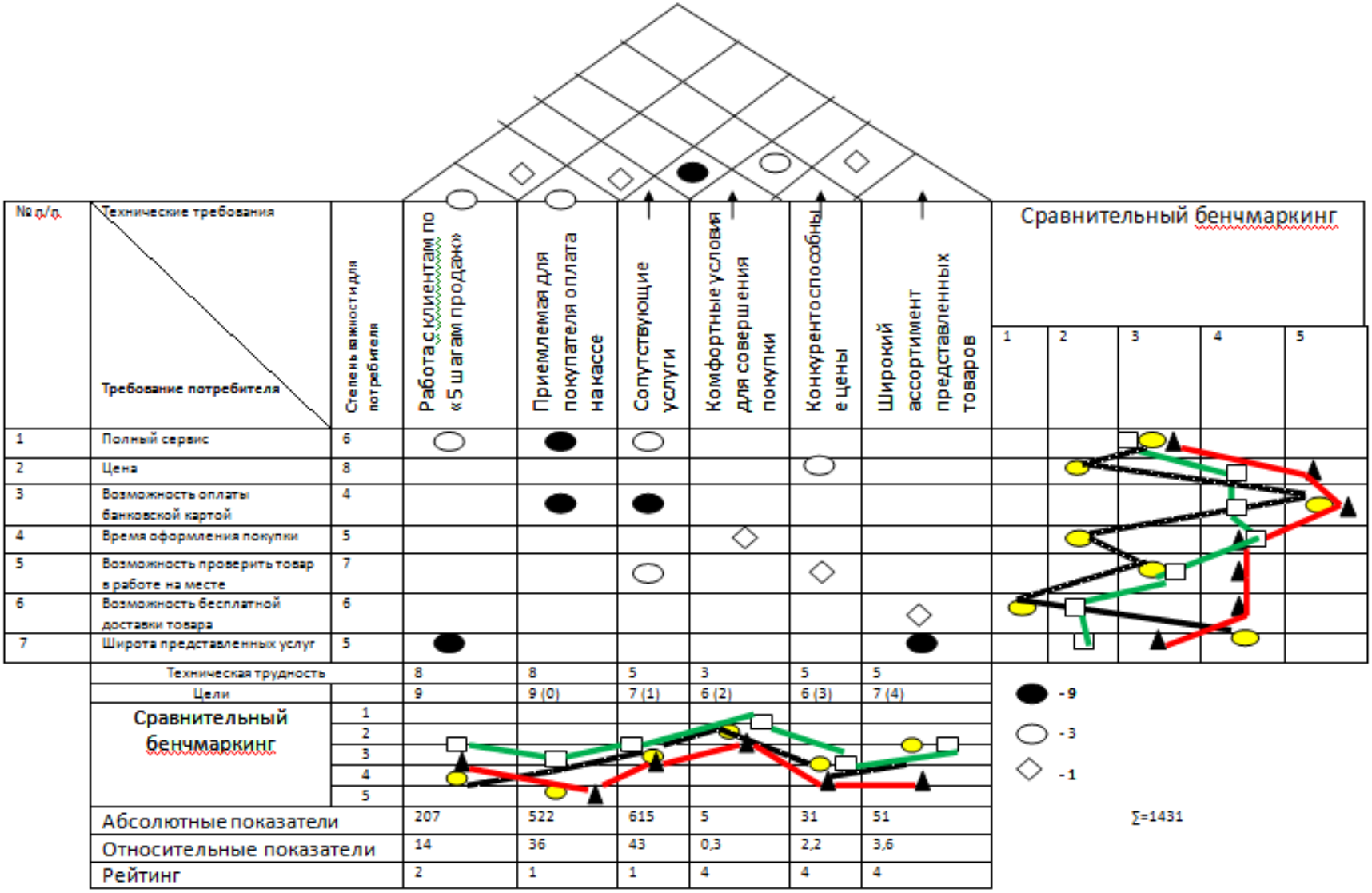


Рис. 3. «Дом качества» ООО «М.видео Менеджмент»:

□ – Эльдорадо ▲ – Медиамаркет ⬭ – М.видео; (0) – оплата товара через Интернет; (1) – создание сервисной зоны; (2) – кафе-зона, туалет для посетителей; (3) – сокращение рабочей силы за счет промоутеров; (4) – заключение договоров с другими поставщиками (поставка брендов премиум-класса)

Библиографические ссылки

1. Данилов И. П., Михайлова С. Ю., Данилова Т. В. Бенчмаркинг – эффективный инструмент повышения конкурентоспособности // Стандарты и качество. 2005. № 1. С. 66–68.

2. 7 НОТ менеджмента. Настольная книга руководителя / под ред. В. В. Кондратьева. 7-е изд., перераб. и доп. М. : Эксмо, 2008.

3. Чаплина А. Н., Максименко И. А. Механизм обеспечения конкурентоспособности сетевых розничных торговых предприятий : моногр. Красноярск, 2008.

4. Чаплина А. Н., Войцеховская И. А. Факторы и инструменты обновления предприятий российского бизнеса : моногр. Красноярск, 2005.

5. Чаплина А. Н., Войцеховская И. А. Организационно-экономические инструменты реализации стратегии развития организаций рынка потребительских услуг : моногр. Красноярск, 2004.

6. Барабанов О. А., Васильев В. А., Москалев П. В. Семь инструментов управления качеством. Бенчмаркинг. Развертывание функции качества. М., 2000.

A. N. Chaplina, E. A. Gerasimova

PROMOTION OF COMPETITIVENESS OF BUSINESS ENTERPRISES ON THE BASIS OF QUALITY MANAGEMENT METHODS

The article considers basic directions and development trends of current business entities and presents techniques for managing company customer equity on the basis of quality management methods.

Keywords: business entities, competitiveness, quality management, customer equity, function of quality expansion.

© Чаплина А. Н., Герасимова Е. А., 2012

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Адрианов Александр Леонидович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры летательных аппаратов института космической техники Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, доцент кафедры математического моделирования и процессов управления института математики Сибирского федерального университета. Окончил Ленинградский механический институт (Военмех) в 1981 г. Область научных интересов – вычислительная аэрогазодинамика, ударные волны, разностные схемы, вычислительные алгоритмы. E-mail: adrian_al@mail333.com.

Акбулатов Тимур Эдхамович – аспирант, старший преподаватель кафедры экономики и управления в строительном комплексе института управления бизнес-процессами и экономики Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – региональная экономика, экономика транспорта, математическое моделирование экономических процессов. E-mail: takbulatov@yandex.ru.

Алиев-Хетагов Рашид Саядуллаевич – аспирант, инженер-математик 3 категории Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С. П. Королева. Окончил Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет) в 2011 г. Область научных интересов – динамика и управление движением космического аппарата. E-mail: arivdi@rambler.ru.

Безматерных Леонард Николаевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиоспектроскопии и спиновой электроники Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Томский государственный университет в 1957 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, мультиферроики, магнитоэлектрическое взаимодействие, рост кристаллов. E-mail: bezm@iph.krasn.ru.

Богданов Валерий Васильевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой сварки летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский политехнический институт в 1978 г. Область научных интересов – сварочные технологии в машиностроении. E-mail: sibniitm@yandex.ru.

Богданов Евгений Витальевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 2006 г. Область научных интересов – калориметрия, фазовые переходы, сегнетоэлектрики, фазовые диаграммы. E-mail: evbogdanov@yandex.ru.

Бойко Сергей Олегович – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, инженер-конструктор 2-й категории ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – точная механика, робототехника. E-mail: boyko-s@yandex.ru.

Бондарев Виталий Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 2000 г. Область научных интересов – сегнетоэлектрики, фазовые переходы, калорические эффекты, релаксоры. E-mail: vbondarev@yandex.ru.

Бондарев Илья Александрович – инженер-исследователь Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов – физика магнитных явлений, структуры на основе манганитов. Т. 8(391)249-43-15.

Вергазов Матвей Юрьевич – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2011 г. Область научных интересов – проектирование электронных систем и устройств, технология разработки программных средств. Т. 8(391)262-18-47.

Вильянен Валентина Валентиновна – магистрант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Область научных интересов – механика деформируемого твердого тела. E-mail: vilyanen_valya@mail.ru.

Волков Никита Валентинович – доктор физико-математических наук, директор Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 1984 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, экспериментальная физика, радиоспектроскопия, фотомагнитные явления, радиофизика СВЧ-диапазона. E-mail: volk@iph.krasn.ru.

Втюрин Александр Николаевич – доктор физико-математических наук, заместитель директора Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 1978 г. Область научных интересов – сегнетоэлектрики, фазовые переходы, калорические эффекты, релаксоры, спектроскопия. E-mail: vtyurin@iph.krasn.ru.

Вшивков Александр Юрьевич – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, инженер-испытатель отдела систем терморегулирования и тепловых анализов ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Окончил магистратуру института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета в 2009 г. Область научных интересов –

термовакуумная обработка космических аппаратов и систем, теплофизика. E-mail: apreach@mail.ru.

Герасимова Елена Александровна – кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента торгово-экономического института Сибирского федерального университета. Окончила Красноярский государственный университет в 1990 г. Область научных интересов – управление предпринимательскими структурами в условиях крупного города. E-mail: elenasvo@mail.ru.

Герасимова Юлия Валентиновна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончила Красноярский государственный университет в 2003 г. Область научных интересов – фазовые переходы, колебательная спектроскопия, кристаллы. E-mail: jul@iph.krasn.ru.

Головенкин Евгений Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой космического машиностроения Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Казанский авиационный институт в 1964 г. Область научных интересов – проектирование и конструирование систем и космических аппаратов, управление инновациями. E-mail: mgv@iss-reshetnev.ru.

Гордеев Александр Васильевич – ведущий конструктор ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Окончил Рязанский радиотехнический институт в 1985 г. Область научных интересов – системы электропитания космических аппаратов, проектирование космических аппаратов. E-mail: gordeyev@iss-reshetnev.ru.

Горяйнов Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Новосибирский государственный университет в 1979 г. Область научных интересов – спектроскопия комбинационного рассеяния света. E-mail: svg@igm.nsc.ru.

Горяшин Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2002 г. Область научных интересов – силовая электроника, резонансные преобразователи электрической энергии, автономная энергетика. E-mail: gorkolya@mail.ru.

Готовко Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения политехнического института Сибирского федерального университета и кафедры сварки летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский политехнический институт в 1983 г. Область научных интересов – технология сварки плавлением. E-mail: gefest_61@mail.ru.

Гудим Ирина Анатольевна – кандидат физико-математических наук, ведущий технолог Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончила Новосибирский электротехнический институт в 1981 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, мультиферроики, магнитоэлектрическое взаимодействие, рост кристаллов. E-mail: bezm@iph.krasn.ru.

Густайцев Артур Олегович – инженер-исследователь Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, студент Сибирского федерального университета. Область научных интересов – физика магнитных явлений, магнитосопротивление в смолистых структурах.

Делков Александр Викторович – ассистент кафедры холодильной, криогенной техники и кондиционирования Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2012 г. Область научных интересов – системное моделирование процессов энергетических машин и установок. E-mail: delkov-mx01@mail.ru.

Дружинина Александра Алексеевна – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и теплотехники в металлургии института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета, аспирант кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Красноярскую государственную академию цветных металлов и золота в 1997 г. Область научных интересов – автоматизация металлургических процессов. E-mail: Druzhininasasha@rambler.ru.

Елисеева Наталья Сергеевна – инженер Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский федеральный университет в 2012 г. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: nataxa1.09@mail.ru.

Еремин Александр Владимирович – инженер-исследователь лаборатории радиоспектроскопии и спиновой электроники Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Сибирский федеральный университет в 2010 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, мультиферроики, магнитоэлектрическое взаимодействие, рост кристаллов. E-mail: eav@iph.krasn.ru.

Еремин Евгений Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1996 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, мультиферроики, магнитоэлектрическое взаимодействие, рост кристаллов. E-mail: eev@iph.krasn.ru.

Жуйков Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государст-

венный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 1999 г. Область научных интересов – гидрогазодинамика турбонасосных агрегатов. E-mail: dimitri_z@inbox.ru.

Жуков Вадим Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности информационных технологий института информатики и телекоммуникаций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2004 г. Область научных интересов – интеллектуальные технологии анализа данных, биоинспирированные алгоритмы моделирования и оптимизации, методы и средства обнаружения инцидентов информационной безопасности. E-mail: vadimzhukov@mail.ru.

Захаров Юрий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической физики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, заведующий кафедрой физики Сибирского государственного технологического университета. Окончил Одесский государственный университет имени И. И. Мечникова в 1957 г. Область научных интересов – устойчивость систем, методы математической физики. E-mail: yazakharov@mail.ru.

Зеленков Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии» Сибирского федерального университета, начальник научно-исследовательского управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева Окончил Красноярский государственный технический университет в 2002 г. Область научных интересов – информационные технологии. E-mail: zelenkow@rambler.ru.

Зиненко Виктор Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Томский государственный университет в 1967 г. Область научных интересов – первопринципные расчеты, динамика решетки, фазовые переходы. E-mail: zvi@iph.krasn.ru.

Зуев Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2003 г. Область научных интересов – тепло- и массообмен, пространственный пограничный слой. E-mail: dla2011@inbox.ru.

Исаенко Людмила Ивановна – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук. Окончила Новосибирский государственный университет в 1976 г. Область научных интересов – синтез кристаллов. E-mail: lisa@uiggm.nsc.ru.

Исмаилов Борис Николаевич – соискатель ученой степени кандидата наук по кафедре управления качеством и сертификации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, начальник курса высшей аттестационной комиссии Академии управления Министерства внутренних дел России. Окончил Самаркандское высшее военное автомобильное командное училище имени Верховного совета Узбекской ССР в 1991 г., Военный университет Министерства обороны Российской Федерации, факультет внутренних войск в 2002 г. Область научных интересов – менеджмент качества, технологическое обеспечение качества линий передачи энергии. Т. 8(391)291-90-94.

Капулин Денис Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный технический университет в 2001 г. Область научных интересов – электротехника, управление технологическими процессами, космические системы. E-mail: kapulin@gmail.com.

Карташев Андрей Васильевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 2000 г. Область научных интересов – калориметрия, фазовые переходы, магнетизм, калорические эффекты. E-mail: akartashev@yandex.ru.

Катык Кирилл Владимирович – инженер по автоматизированным системам управления производством производственного объединения «Полет» – филиала Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева (г. Омск). Окончил Омский государственный университет путей сообщения в 2011 г. Область научных интересов – теоретические и методологические основы эффективности развития предприятий, отраслей и комплексов народного хозяйства. E-mail: kirysha79@mail.ru.

Кацик Дарья Евгеньевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и международного бизнеса горно-металлургического комплекса Сибирского федерального университета. Окончила Красноярскую государственную академию цветных металлов и золота в 2001 г. Область научных интересов – инвестиции, региональная экономика, экономическая безопасность. E-mail: kde707@rambler.ru.

Кацура Александр Владимирович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Иркутский политехнический институт в 1982 г. Область научных интересов – техническая эксплуатация авиационной техники. E-mail: pnk-sibsau@mail.ru.

Кислицкий Михаил Иванович – кандидат технических наук, начальник отдела ФГУП «КБ «Арсе-

нал». Окончил Ленинградский механический институт в 1972 г. Область научных интересов – исследование и освоение космоса, космическая техника. E-mail: kbarsenal@peterlink.ru.

Кишкин Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой холодильной, криогенной техники и кондиционирования Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1985 г. Область научных интересов – гидро- и газодинамика турбомашин, тепло- и массообмен. E-mail: spsp99@mail.ru.

Колесникова Евгения Михайловна – младший научный сотрудник лаборатории радиоспектроскопии и спиновой электроники Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончила институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета в 2009 г. Область научных интересов – фазовые переходы, сегнетоэлектрики, сегнетоэластики, магнетики, динамика решетки. E-mail: ekoles@iph.krasn.ru.

Коплярова Надежда Владимировна – аспирант Сибирского федерального университета. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2012 г. Область научных интересов – непараметрическая идентификация динамических систем, управление. E-mail: koplyarovaNV@mail.ru.

Корнеева Анна Анатольевна – аспирант Сибирского федерального университета, инженер Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский федеральный университет в 2012 г. Область научных интересов – идентификация, непараметрические алгоритмы адаптации, анализ данных. E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru.

Кочарова Алла Георгиевна – ведущий технолог лаборатории кристаллофизики Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончила Сибирский технологический институт в 1968 г. Область научных интересов – синтез кристаллов. E-mail: ekoles@iph.krasn.ru.

Краев Михаил Васильевич – заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, доктор технических наук, профессор Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, академик Российской академии естественных наук, Академии космонавтики имени К. Э. Циолковского, Международной академии наук высшей школы. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1967 г. Область научных интересов – гидродинамика систем и агрегатов подачи энергодвигательных установок летательных аппаратов. Т. 8(391)262-95-61.

Краева Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2002 г. Область научных интересов – насосные агрегаты подачи малорасходных систем ракетоносителей. E-mail: kat-belka@yandex.ru.

Краснов Павел Олегович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Сибирского государственного технологического университета. Окончил Красноярский государственный университет в 1999 г. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: kpo1980@gmail.com.

Кротова Елена Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры динамики электронных систем Ярославского государственного университета имени П. Г. Демидова. Окончила Ярославский государственный университет в 1980 г. Область научных интересов – контроль качества работы информационных систем с применением алгоритмов идентификации видов распределения сигналов и помех. E-mail: ken@uniyar.ac.ru.

Крушенко Генрих Гаврилович – доктор технических наук, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Омский машиностроительный институт в 1955 г. Область научных интересов – повышение качества литых изделий. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Крылов Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной спектроскопии Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 1993 г. Область научных интересов – сегнетоэлектрики, фазовые переходы, калорические эффекты, релаксоры, спектроскопия. E-mail: shusy@iph.krasn.ru.

Кузнецов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 2002 г. Область научных интересов – высокопроизводительные вычисления, вычислительная теория групп. Контактная информация: E-mail: alex_kuznetsov80@mail.ru.

Кузнецова Александра Сергеевна – аспирант кафедры высшей математики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет в 2012 г. Область научных интересов – высокопроизводительные вычисления, вычислительная теория групп. Контактная информация: E-mail: alexakulch@rambler.ru.

Кузубов Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Сибирского государственного аэрокосмиче-

ского университета имени академика М. Ф. Решетнева, доцент кафедры физической и неорганической химии института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский государственный университет в 1997 г. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: alex_xx@rambler.ru.

Кукарцев Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных экономических систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2003 г. Область научных интересов – автоматизация управления, системный анализ. E-mail: vlad_saa_2000@mail.ru.

Кулягин Виталий Александрович – аспирант Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2009 г. Область научных интересов – информационные системы в экономике, надежность программного обеспечения. E-mail: vitalyas86@rambler.ru.

Лаптенок Валерий Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1968 г. Область научных интересов – комплексное решение задач автоматизации электронно-лучевой сварки, процессов аргонодуговой сварки, пайки алюминия. Т. 8(391)291-92-44.

Липинский Леонид Витальевич – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2006 г. Область научных интересов – интеллектуальные информационные технологии, эволюционные вычисления, поддержка принятия решений. E-mail: lipinskiyl@mail.ru.

Ловчиков Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1970 г. Область научных интересов – системы автоматизированного проектирования, системы электропитания космических аппаратов. E-mail: ivt_anlovch@sibsau.ru.

Лопатин Александр Витальевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерного моделирования Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1979 г. Область научных интересов – механика деформируемого твердого тела. E-mail: lopatin@krasmail.ru.

Лопатин Илья Александрович – студент Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Область научных интересов – многомерный комплексный анализ, механика упруго деформируемого твердого тела. E-mail: alvamgen@gmail.com.

Лукин Феликс Александрович – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2011 г. Область научных интересов – проектирование электронных систем и устройств, технология разработки программных средств. Т. 8(391)262-18-47.

Лыхин Александр Олегович – инженер Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, студент института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: alexandr_lykhin@mail.ru.

Машурова Дарья Васильевна – магистрант кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2011 г. Область научных интересов – информационные технологии, многоатрибутивные методы принятия решений. E-mail: mashurova@bk.ru.

Медведев Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени М. Ф. Решетнева. Окончил Фрунзенский политехнический институт в 1968 г. Область научных интересов – кибернетика, теория стохастических систем управления. Т. 8(391)290-50-11.

Мейстер Андрей Робертович – инженер кафедры оборудования и технологии сварочного производства политехнического института Сибирского федерального университета. Окончил политехнический институт Сибирского федерального университета в 2007 г. Область научных интересов – сварка на малых токах плавящимся электродом на прямой полярности. Т. 8(391)243-55-61.

Мейстер Роберт Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения политехнического института Сибирского федерального университета. Окончил Красноярский политехнический институт в 1966 г. Область научных интересов – сварка плавлением на малых токах. Т. 8(391)243-55-61.

Михашенок Наталья Владимировна – младший научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончила Красноярский государственный университет в 2005 г. Область научных интересов – рост кристаллов, физика магнитных явлений. E-mail: natali_sapronova@mail.ru.

Молокеев Максим Сергеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Инсти-

тута физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2004 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, мультиферроики, магнитоэлектрическое взаимодействие, рост кристаллов. E-mail: msmolokeev@mail.ru.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1980 г. Область научных интересов – автоматизация электронно-лучевой сварки. E-mail: avm514@mail.ru.

Мушовец Константин Владимирович – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – безопасность космических систем. Т. 8(391)262-18-47.

Назаров Владимир Павлович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1973 г. Область научных интересов – технология производства ракетных двигателей. E-mail: ums@sibsau.ru.

Оборина Людмила Ивановна – магистрант кафедры управления качеством и сертификации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Область научных интересов – менеджмент качества, технологическое обеспечение качества. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Охоткин Кирилл Германович – кандидат физико-математических наук, доцент, докторант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 1999 г. Область научных интересов – устойчивость стержневых и магнитных систем, механика деформируемого твердого тела. E-mail: okg2000@mail.ru.

Павловский Максим Сергеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 2006 г. Область научных интересов – первопринципные расчеты, динамика решетки, фазовые переходы. E-mail: mspav@iph.krasn.ru.

Пашковский Андрей Васильевич – аспирант Сибирского государственного технологического университета. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2008 г. Область научных интересов – компьютерное моделирование. E-mail: linch07@mail.ru.

Пискажова Татьяна Валериевна – доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и теплотехники в металлургии института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета. Окончила Красноярский государственный университет в 1985 г. Область научных интересов – математическое моделирование динамики параметров процесса электролиза. E-mail: tpiskagova@sfu-kras.ru.

Погорельцев Евгений Ильич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Сибирский федеральный университет в 2007 г. Область научных интересов – калориметрия, фазовые переходы, сегнетоэлектрики, диэлектрические свойства. E-mail: pepel@iph.krasn.ru.

Поляков Петр Васильевич – доктор химических наук, профессор, профессор-консультант Сибирского федерального университета. Окончил Ленинградский политехнический институт в 1957 г. Область научных интересов – процессы тепло- и массопереноса в электролизерах для производства алюминия и магния. E-mail: p.v.polyakov@mail.ru.

Попков Сергей Иванович – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 2003 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, экспериментальная физика, сверхпроводимость. E-mail: volk80iph@yandex.ru.

Попов Евгений Александрович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1973 г. Область научных интересов – физика твердого тела, технологии обработки экспериментальных данных. E-mail: epopov@bmail.ru.

Рогалев Александр Алексеевич – аспирант Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2012 г. Область научных интересов – численные алгоритмы решения задач в условиях неопределенности, термодинамика информационных процессов. E-mail: ran@akadem.ru.

Рогалев Алексей Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 1977 г. Область научных интересов – надежные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений, минимаксные (гарантированные) методы оценки результатов измерений, оценки множеств достижимости управляемых систем. E-mail: rogalyov@icm.krasn.ru.

Руйга Ирина Рудольфовна – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и международного бизнеса горно-металлургического комплекса Сибирского федерального университета, доцент кафедры экономики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Красноярскую государственную академию цветных металлов и золота в 2000 г. Область научных интересов – инвестиции, региональная экономика, государственная политика. E-mail: irina_rouiga@bk.ru.

Самохвалова Светлана Михайловна – кандидат экономических наук, доцент кафедры международного кадрового и проектного управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирскую аэрокосмическую академию в 1997 г. Область научных интересов – стратегическое управление инновационным развитием высшей школы. E-mail: merlanabox@mail.ru.

Саунин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры технической физики, лаборатории «Вулкан» Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1973 г. Область научных интересов – газоплазменное напыление, покрытие заданными свойствами, синтез наноматериалов. Т. 8(391)291-90-71.

Семенкина Мария Евгеньевна – магистр техники и технологий, аспирант кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2012 г. Область научных интересов – интеллектуальные информационные технологии, эволюционные вычисления. E-mail: semenkina88@mail.ru.

Семенов Сергей Васильевич – аспирант, ведущий инженер Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Сибирский федеральный университет в 2010 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, сверхпроводимость. E-mail: sem_601@mail.ru.

Семенов Сергей Сергеевич – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – экономика промышленных предприятий. E-mail: sergey19862@ya.ru.

Сенашов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных экономических систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1975 г. Область научных интересов – механика деформируемого твердого тела. E-mail: sen@sibsau.ru.

Сергеев Анатолий Николаевич – президент фонда инноваций «ИТЭРА». Окончил Красноярский государственный университет в 1995 г. Область научных интересов – моделирование и управление в стохастических и организационных системах, принятие решений в активных системах. E-mail: anatolyser@gmail.com.

Сергеева Наталья Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики Сибирского федерального университета. Окончила Красноярский государственный университет в 1995 г. Область научных интересов – стохастическое управление, непараметрическая идентификация, моделирование систем. E-mail: sergena@list.ru.

Серегин Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1985 г. Область научных интересов - оборудование и технология электронно-лучевой сварки. E-mail: ius_ceregin@sibsau.ru.

Сидоров Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2006 г. Область научных интересов – силовая электроника, системы электропитания космических аппаратов, солнечная энергетика. E-mail: sidorovalex83@gmail.com.

Смирнов Николай Анатольевич – доктор технических наук, профессор, директор НИИ ракетно-космической техники и технологий, заведующий кафедрой технической механики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1978 г. Область научных интересов – робототехника, мехатроника, механика сложных технических систем. E-mail: smirnov@sibsau.ru.

Смоляков Дмитрий Александрович – инженер-исследователь Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Сибирский федеральный университет в 2011 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, резонансные свойства смолистых структур. E-mail: sda88@ iph.krasn.ru.

Софронова Светлана Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической физики научно-образовательного центра института космических исследований и высоких технологий Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Красноярский государственный университет в 1999 г. Область научных интересов – расчет динамики решетки, теоретико-групповой анализ. E-mail: ssn@iph.krasn.ru.

Стерехов Игорь Владимирович – соискатель ученой степени кандидата наук по кафедре управления качеством и сертификации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, инженер-электромеханик ОАО «Красноярскэнерго». Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1988 г. Область научных интересов – метрология и технологическое обеспечение качества линий передачи энергии. Т. 8(391)291-90-94.

Танасиенко Федор Владимирович – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева, инженер отдела систем терморегулирования и тепловых анализов ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2009 г. Область научных интересов – математическое моделирование тепловых процессов в системах терморегулирования космических аппаратов. E-mail: tanasienko@iss-reshetnev.ru.

Телегин Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры технической физики, лаборатории «Вулкан» Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский институт космической техники в 1989 г. Область научных интересов – газоплазменное напыление, покрытие заданными свойствами, синтез наноматериалов. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Темеров Владислав Леонидович – старший научный сотрудник лаборатории радиоспектроскопии и спиновой электроники Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский политехнический институт в 1967 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, мультиферроики, магнитоэлектрическое взаимодействие, рост кристаллов. E-mail: bezm@iph.krasn.ru.

Терсков Виталий Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры безопасности информационных технологий института информатики и телекоммуникаций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярское высшее командное училище радиоэлектроники противовоздушной обороны в 1982 г. Область научных интересов – моделирование и оптимизация архитектуры аппаратно-программных комплексов управления объектами в реальном времени. E-mail: terskovva@mail.ru.

Толстопятов Михаил Игоревич – учебный мастер кафедры двигателей летательных аппаратов Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – пограничный слой, теплообмен, теплоотдача, закрученные потоки. E-mail: kam1kag3e@mail.ru.

Трифанов Иван Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления качеством и сертификации Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил завод-втуз – филиал Красноярского политехнического института в 1975 г. Область научных интересов – технология производства летательных аппаратов, технологическое обеспечение качества. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Тынченко Ядвига Александровна – магистрант кафедры системного анализа и исследования операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончила Московский государственный университет экономики, статистики и информатики (Красноярский филиал) в 2009 г. Область научных интересов – прикладная информатика (в экономике). E-mail: JaTynchenko@mesi.ru.

Фальков Валентин Олегович – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию имени академика М. Ф. Решетнева в 1999 г. Область научных интересов – пограничный слой, теплообмен, теплоотдача, закрученные потоки. E-mail: falkov24061987@mail.ru.

Федорищев Роман Михайлович – инженер-исследователь Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Сибирский федеральный университет в 2010 г. Область научных интересов – физика магнитных явлений, магнитосопротивление в смолистых структурах. E-mail: rmf@ iph.krasn.ru.

Федоров Александр Семенович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный университет в 1984 г. Область научных интересов – квантово-химические расчеты. E-mail: alex99@iph.krasn.ru.

Ханов Владислав Ханифович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой безопасности информационных технологий Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский политехнический институт в 1986 г. Область научных интересов – микроэлектронное космическое приборостроение, цифровая обработка сигналов. E-mail: hanov@sibsau.ru.

Ходенков Алексей Александрович – аспирант кафедры холодильной, криогенной техники и кондиционирования Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2012 г. Область научных интересов – расчет и проектирование энергетических машин и установок. Т. 8(391)291-90-93.

Царев Роман Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и исследо-

вания операций Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Красноярский государственный технический университет в 1999 г. Область научных интересов – информационные технологии, мультиверсионное программное обеспечение, многоатрибутивные методы принятия решений, космические системы. E-mail: rahatamatahata@mail.ru.

Чаплина Альбина Николаевна – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой менеджмента торгово-экономического института Сибирского федерального университета. Окончила Сибирский технологический институт в 1971 г. Область научных интересов – стратегическое управление субъектами хозяйствования в условиях рыночной экономики. E-mail: elenasvo@mail.ru.

Чекмарев Сергей Анатольевич – аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – проектирование электронных систем и устройств, инженерия разработки программных средств, конструирование электронной аппаратуры. Т. 8(391)262-18-47.

Чжан Екатерина Анатольевна – магистрант Сибирского федерального университета. Область научных интересов – параметрическая идентификация в стохастических системах, непараметрическая идентификация. E-mail: ecach@list.ru.

Шабанов Александр Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики имени Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук. Окончил Красноярский государственный университет в 1993 г. Область научных интересов – теоретическая физика, электронная микроскопия, фотонные кристаллы. E-mail: nikel@akadem.ru.

Шарыпов Никита Анатольевич – аспирант кафедры металлургии цветных металлов института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета. Окончил Сибирский федеральный университет в 2009 г. Область научных интересов – автоматизация производственных процессов, многомерный статистический анализ данных. E-mail: nikita.sharypov@gmx.com.

Шахматов Александр Владимирович – инженер Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2007 г. Область научных интересов – проектирование электронных систем и устройств, инженерия разработки программных средств, конструирование электронной аппаратуры. Т. 8(391)262-18-47.

Шеенок Дмитрий Александрович – аспирант Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2010 г. Область научных интересов – повышение надежности программного обеспечения систем управления сложными объектами. E-mail: dmitryshkras@rambler.ru.

Юлдашев Турсун Камалдинович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Ферганский государственный педагогический институт в 1980 г. Область научных интересов – нелинейная теория обыкновенных дифференциальных и интегральных уравнений, краевые, смешанные и обратные задачи для нелинейных уравнений в частных производных. E-mail: tursunbay@rambler.ru.

Юртаев Евгений Владимирович – начальник сектора в отделе систем терморегулирования и тепловых анализов ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Окончил Сибирскую аэрокосмическую академию в 2001 г. Область научных интересов – математическое моделирование тепловых процессов в системах терморегулирования космических аппаратов. E-mail: urtaev.e@gmail.com.

ABOUT THE AUTHORS

Adrianov Alexander Leonidovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associated professor, associated professor of the chair of aircrafts of the Institute of Space Engineering of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, associated professor of the chair of mathematical modeling and control processes of the Institute of mathematics of the Siberian federal university. Graduated from Leningrad Mechanical Institute (Military Mechanical Institute) in 1981. Area of scientific interests – computing aero gas dynamics, shock waves, difference schemes, computing algorithms. E-mail: adrian_al@mail333.com.

Akbulatov Timur Edkhamovich – graduate student, senior teacher of the chair of economy and management in construction sector of the Institute of Management of Business Processes and Economy of the Siberian Federal University. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2009. Area of scientific interests – regional economics, transport economics, mathematical modeling of economic processes. E-mail: takbulatov@yandex.ru.

Aliev-Hetagov Rasheed Sayadullayevich – graduate student, engineer-mathematician of 3 category of rocket and space corporation "Energya" named after S. P. Korolev. Graduated from Moscow Institute of Physics and Technology (National research university) in 2011. Area of scientific interests – dynamics and spacecraft traffic control. E-mail: arivdi@rambler.ru.

Bezmaternykh Leonard Nikolaevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher of the laboratory of radio spectroscopy and spin electronics of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Tomsk State University in 1957. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, multiferroics, magnetoelectric interaction, growth of crystals. E-mail: bezm@iph.krasn.ru.

Bogdanov Valery Vasilyevich – Candidate of Science (Engineering), head of the chair of welding of the Siberian state aerospace university named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk Polytechnic Institute in 1978. Area of scientific interests – welding technologies in mechanical engineering. E-mail: sibniitm@yandex.ru.

Bogdanov Evgeny Vitalyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, research associate of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 2006. Area of scientific interests – calorimetry, phase transitions, ferroelectric materials, phase charts. E-mail: evbogdanov@yandex.ru.

Boyko Sergey Olegovich – graduate student of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, design engineer of the 2nd category of JSC "Information Satellite Systems named after academician M. F. Reshetnev". Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2010. Area of scientific interests – exact mechanics, robotics. E-mail: boyko-s@yandex.ru.

Bondarev Vitaly Sergeyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research worker of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 2000. Area of scientific interests – ferroelectric materials, phase transitions, caloric effects, relaxsors. E-mail: vbondarev@yandex.ru.

Bondarev Ilya Aleksandrovich – research engineer of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Student of the Siberian Federal University. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, structures on the basis of manganites. E-mail: fbi1993@mail.ru.

Vergazov Matvei Yuryevich – graduate student of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2011. Area of scientific interests – design of electronic systems and devices, technology of software development. T. 8(391)262-18-47.

Vilyanen Valentina Valentinovna – candidate for Master's degree of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Area of scientific interests – mechanics of deformable solid body. E-mail: vilyanen_valya@mail.ru.

Volkov Nikita Valentinovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, director of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1984. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, experimental physics, radio spectroscopy, photomagnetic phenomena, microwave range radio physics. E-mail: volk@iph.krasn.ru.

Vtyurin Alexander Nikolaevich – Doctor of Physical and Mathematical sciences, deputy director of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1978. Area of scientific interests – ferroelectric material, phase transitions, caloric effects, relaksors, spectroscopy. E-mail: vtyurin@iph.krasn.ru.

Vshivkov Alexander Yuryevich – graduate student of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, test engineer of the department of systems of thermal regulation and thermal analyses of JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev. Took Master's degree at the Institute of Engineering Physics and Radio Electronics of the Siberian Federal University in 2009. Area of scientific interests – thermal vacuum processing of spacecrafts and systems, thermophysics. E-mail: apreach@mail.ru.

Gerasimova Elena Aleksandrovna – Candidate of Economic Sciences, associated professor, associated professor of the chair of management of the Institute of Trade and Economics of the Siberian federal university. Graduated from Krasnoyarsk state university in 1990. Area of scientific interests – management of enterprise structures in the conditions of metropolis. E-mail: elenasvo@mail.ru.

Gerasimova Julia Valentinovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, research worker of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 2003. Area of scientific interests – phase transitions, oscillatory spectroscopy, crystals. E-mail: jul@iph.krasn.ru.

Golovenkin Evgeny Nikolaevich – Doctor of Science (Engineering), professor, head of the chair of space mechanical engineering of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Kazan Aviation Institute in 1964. Area of scientific interests – design and constructional design of systems and spacecrafts, management of innovations. E-mail: mgv@iss-reshetnev.ru.

Gordeev Alexander Vasilyevich – leading designer of JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Ryazan Radio Engineering Institute in 1985. Area of scientific interests – power supply systems of spacecrafts, design of spacecrafts. E-mail: gordeyev@iss-reshetnev.ru.

Goryaynov Sergey Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research worker of the Institute of Geology and Mineralogy named after V. S. Sobolev of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Novosibirsk State University in 1979. Area of scientific interests – spectroscopy of combinational dispersion of light. E-mail: svg@igm.nsc.ru.

Goryashin Nikolay Nikolaevich – Candidate of Sciences (Engineering), associate professor, associate professor of automatic control system department of the Siberian state aerospace university named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian state aerospace university in 2002. Area of scientific interests – power electronics, resonant converters of electric energy, autonomous power. E-mail: gorkolya@mail.ru.

Gotovko Sergey Alekseevich – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of the chair of mechanical engineering of the Institute of Technology of the Siberian Federal University and the chair of welding of aircrafts of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk Polytechnic Institute in 1983. Area of scientific interests – technology of welding by melting. E-mail: gefest_61@mail.ru.

Gudim Irina Anatolyevna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading technologist of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Novosibirsk Electro-technical institute in 1981. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, multiferroics, magnetoelectric interaction, growth of crystals. E-mail: bezm@iph.krasn.ru.

Gustaytsev Arthur Olegovich – research engineer of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Student of the Siberian federal university. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, magnetoresistance in resinous structures. E-mail: artur_72@mail.ru.

Delkov Alexander Viktorovich – teaching assistant of the chair of refrigerating, cryogenic equipment and conditioning of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2012. Area of scientific interests – system modeling of processes of energy-converting machinery and installations. E-mail: delkov-mx01@mail.ru. ph. 2919093.

Druzhinina Alexandra Alekseevna – senior teacher of the chair of automation of production processes and thermal technology in metallurgy of the Institute of Non-ferrous Metals and Material Science of the Siberian Federal University, graduate student of the chair of information and control systems of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk State Metallurgical Academy.

Eliseeva Natalia Sergeevna – research engineer of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian Federal University in 2012. Area of scientific interests – quantum and chemical calculations. E-mail: nataxa1.09@mail.ru.

Eremin Alexander Vladimirovich – research engineer of the laboratory of radio spectroscopy and spin electronics of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from the Siberian Federal University in 2010. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, multiferroics, magnetoelectric interaction, growth of crystals. E-mail: eav@iph.krasn.ru.

Eremin Evgeny Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the chair of physics of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1996. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, multiferroics, magnetoelectric interaction, growth of crystals. E-mail: eev@iph.krasn.ru.

Zhuykov Dmitry Aleksandrovich – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 1999. Area of scientific interests – hydraulic gas dynamics of turbo-pump units. E-mail: dimitri_z@inbox.ru.

Zhukov Vadim Gennadyevich – Candidate of Sciences (Engineeting), associated professor, associated professor of the chair of information technology security of the Institute of Informatics and Telecommunications of the

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2004. Area of scientific interests – intellectual technologies of data analysis, the bioinspired algorithms of modeling and optimization, methods and sensors of incidents of information security. E-mail: vadimzhukov@mail.ru.

Zakharov Yury Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of the chair of technical physics of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, head of the chair of physics of the Siberian State Technological University. Graduated from Odessa state university named after I. I. Mechnikov in 1957. Area of scientific interests – stability of systems, methods of mathematical physics. E-mail: yazakharov@mail.ru.

Zelenkov Pavel Viktorovich – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of UNESCO "New materials and technologies" of the Siberian Federal University, chief of the office of scientific research of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev Graduated from Krasnoyarsk State Technical University in 2002. Area of scientific interests – information technologies. E-mail: zelenkow@rambler.ru.

Zinenko Victor Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, chief researcher of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Tomsk State University in 1967. Area of scientific interests – first principle calculations, dynamics of lattice, phase transitions. E-mail: zvi@iph.krasn.ru.

Zuev Alexander Aleksandrovich – Candidate of Science (Engineering), associated professor of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2003. Area of scientific interests – heat and mass exchange, spatial interface. E-mail: dla2011@inbox.ru.

Isaenko Lyudmila Ivanovna – Doctor of Science (Engineering), leading researcher of the Institute of Geology and Mineralogy named after V. S. Sobolev of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Novosibirsk State University in 1976. Area of scientific interests – synthesis of crystals. E-mail: lisa@uiggm.nsc.ru.

Ismailov Boris Nikolaevich – applicant for Candidate's degree of the chair of quality management and certification of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, chief of the course of the highest certifying commission of the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation. Graduated from Samarkand Highest Military Automobile Command College named after the Supreme Council of the Uzbek Soviet Socialist Republic in 1991, Military University of the Ministry of Defense of Russian Federation, faculty of internal troops, in 2002. Area of scientific interests – quality management, technological support of quality of power transmission lines. T. 8(391)291-90-94.

Kapulin Denis Vladimirovich – Candidate of Science (Engineering), associated professor of the chair of systems of automatic equipment, automated control and design of the Siberian Federal University. Graduated from Krasnoyarsk State Technical University in 2001. Area of scientific interests – electric engineering, industrial processing control, space systems. E-mail: kapulin@gmail.com.

Kartashev Andrey Vasilyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, research worker of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 2000. Area of scientific interests – calorimetry, phase transitions, magnetism, caloric effects. E-mail: akartashev@yandex.ru.

Katyk Kirill Vladimirovich – engineer of automated control systems of production association "Polyot", the branch of the State Space Production Association named after M. V. Khrunichev (Omsk). Graduated from Omsk State University of Means of Communication in 2011. Area of scientific interests – theoretical and methodological bases of efficiency of development of enterprises, branches and complexes of the national economy. E-mail: kirysha79@mail.ru.

Katsik Darya Evgenyevna – Candidate of Economic Science, associated professor of the chair of economy and international business of mining and metallurgical complex of the Siberian Federal University. Graduated from Krasnoyarsk State Academy of Non-ferrous Metals and Gold in 2001. Area of scientific interests – investments, regional economy, economic safety. E-mail: kde707@rambler.ru.

Katsura Alexander Vladimirovich – Candidate of Sciences (Engineering), professor, head of the chair of technical operation of aviation power systems and flight and navigation complexes of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Irkutsk Polytechnic Institute in 1982. Area of scientific interests – technical operation of aircraft equipment. E-mail: pnk-sibsau@mail.ru.

Kislitskiy Mikhail Ivanovich – Candidate of Sciences (Engineering), head of the department of Federal State Unitary Enterprise "KB Arsenal". Graduated from Leningrad Mechanical Institute in 1972. Area of scientific interests – research and space exploration, space equipment. E-mail: kbarsenal@peterlink.ru.

Kishkin Alexander Anatolyevich – Doctor of Science (Engineering), professor, head of the department of refrigerating, cryogenic equipment and conditioning of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1985. Area of scientific interests – hydro-and gas dynamics of turbo-machines, heat and mass exchange. E-mail: spsp99@mail.ru. D. N. Kovtanuk

Kovtanyuk Dmitry Nikolaevich – graduate student of the chair of system analysis and research of operations of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian

State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. in 2011. Area of scientific interests – information technologies, multiattributive methods of decision-making.

Kolesnikova Evgenya Mikhaelovna – junior research worker of laboratory of radio spectroscopy and spin electronics of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from the Institute of Engineering Physics and Radio Electronics of the Siberian Federal University in 2009. Area of scientific interests – phase transitions, ferroelectric materials, ferroelastics, magnetics, lattice dynamics. E-mail: ekoles@iph.krasn.ru.

Koplyarova Nadezhda Vladimirovna – graduate student of the Siberian Federal University. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2012. Area of scientific interests – nonparametric identification of dynamic systems, management. E-mail: koplyarovaNV@mail.ru.

Korneeva Anna Anatolyevna – graduate student of the Siberian Federal University, engineer of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian Federal University in 2012. Area of scientific interests – identification, nonparametric algorithms of adaptation, data analysis. E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru.

Kocharova Alla Georgiyevna – leading technologist of the laboratory of crystal physics of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from the Siberian Technological Institute in 1968. Area of scientific interests – synthesis of crystals. E-mail: ekoles@iph.krasn.ru.

Kraev Mikhail Vasilyevich – honored worker of science and engineering of Russian Federation, Doctor of Science (Engineering), professor of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, academician of the Russian Academy of Natural Sciences, of the Academy of Astronautics named after K. E. Tsiolkovskiy, International Academy of Sciences of the Higher School. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1967. Area of scientific interests – hydrodynamics of systems and supply units of low emission systems of aircrafts. T. 8(391)262-95-61.

Kraeva Ekaterina Mikhaelovna – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of the chair of aircraft engines of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2002. Area of scientific interests – pump supply units of low emission systems of launch vehicles. E-mail: kat-belka@yandex.ru.

Krasnov Pavel Olegovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associated professor of the chair of physics of the Siberian State Technological University. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1999. Area of scientific interests – quantum and chemical calculations. E-mail: kpo1980@gmail.com.

Krotova Elena Ivanovna – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of the chair of dynamics of electronic systems of Yaroslavl State University named after P. G. Demidov. Graduated from Yaroslavl State University in 1980. Area of scientific interests – quality control of information systems functioning, with application of algorithms of identification of types of distribution of signals and noise waves. E-mail: ken@uniyar.ac.ru.

Krushenko Henry Gavrilovich – Doctor of Science (Engineering), professor of the chair of aircraft engines of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, chief researcher of the Institute of Computing Modeling of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Omsk Machine-building Institute in 1955. Area of scientific interests – improvement of quality of cast products. E-mail: genry@icm.krasn.ru.

Krylov Alexander Sergeyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research worker of the laboratory of molecular spectroscopy of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1993. Area of scientific interests – ferroelectric material, phase transitions, caloric effects, relaksor, spectroscopy. E-mail: shusy@iph.krasn.ru.

Kuznetsov Alexander Alekseevich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, head of the chair of higher mathematics of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk State University in 2002. Area of scientific interests – high-performance calculations, computing theory of groups. E-mail: alex_kuznetsov80@mail.ru.

Kuznetsova Alexandra Sergeevna – graduate student of the chair of higher mathematics of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2012. Area of scientific interests – high-performance calculations, computing theory of groups. E-mail: alexakulch@rambler.ru.

Kuzubov Alexander Aleksandrovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research worker of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F.Reshetnev, associated professor of physical and inorganic chemistry of the Institute of Non-ferrous Metals and Materials Science of the Siberian Federal University. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1997. Area of scientific interests – quantum and chemical calculations. E-mail: alex_xx@rambler.ru

Kukartsev Vladislav Viktorovich – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of the chair of information economic systems of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2003. Area of scientific interests – control automation, system analysis. E-mail: vlad_saa_2000@mail.ru.

Kulyagin Vitaly Aleksandrovich – graduate student of the Siberian Federal University. Graduated from the Siberian Federal University in 2009. Area of scientific interests – information systems in economy, software reliability. E-mail: vitalyas86@rambler.ru.

Laptenok Valery Dmitriyevich – Doctor of Science (Engineering), professor of the chair of information management systems of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1968. Area of scientific interests – complex solution of problems of automation of electron beam welding, processes of argon-arc welding, aluminum soldering. T. 8(391) 291-92-44.

Lipinskiy Leonid Vitalyevich – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of the chair of system analysis and research of operations of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2006. Area of scientific interests – intellectual information technologies, evolutionary calculations, decision-making support. E-mail: lipinskiyl@mail.ru.

Lovchikov Anatoly Nikolaevich – Doctor of Science (Engineering), professor of the chair of automatic control systems of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1970. Area of scientific interests – systems of automated design, power supply systems of spacecrafts. E-mail: ivt_anlovch@sibsau.ru.

Lopatin Alexander Vitalyevich – Doctor of Science (Engineering), professor, head of the chair of computer modeling of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1979. Area of scientific interests – mechanics of deformable firm body. E-mail: lopatin@krasmail.ru.

Lopatin Ilya Aleksandrovich – 3rd year student of the chair of applied mathematics of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Area of scientific interests – multidimensional complex analysis, mechanics of poroelastic solid body. E-mail: alvamgen@gmail.com.

Lukin Felix Aleksandrovich – graduate student of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2011. Area of scientific interests – design of electronic systems and devices, technology of software development. T. 8(391)262-18-47.

Lykhin Alexander Olegovich – engineer of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, student of the Institute of Non-ferrous Metals and Materials Science of the Siberian Federal University. Area of scientific interests – quantum and chemical calculations. E-mail: alexandr_lykhin@mail.ru.

Mashurova Darya Vasilyevna – candidate for Master's degree of the chair of system analysis and research of operations of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. in 2011. Area of scientific interests – information technologies, multiattributive methods of decision-making.

Medvedev Alexander Vasilyevich – Doctor of Science (Engineering), professor of the chair of system analysis and operational research of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Frunze Polytechnic Institute in 1968. Area of scientific interests – cybernetics, theory of stochastic control systems. T. 8(391)290-50-11.

Meyster Andrey Robertovich – engineer of the chair of equipment and technology of welding engineering of Polytechnic Institute of the Siberian Federal University. Graduated from Krasnoyarsk Polytechnic Institute of the Siberian Federal University in 2007. Area of scientific interests – welding on small currents by melting electrode on direct polarity. T. 8(391)243-55-61.

Meyster Robert Aleksandrovich – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of mechanical engineering of Polytechnic Institute of the Siberian Federal University. Graduated from Krasnoyarsk Polytechnic Institute in 1966. Area of scientific interests – welding by melting on small currents. T. 8(391)243-55-61.

Mikhashenok Natalia Vladimirovna – junior research worker of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 2005. Area of scientific interests – growth of crystals, physics of magnetic phenomena. E-mail: natali_sapronova@mail.ru.

Molokeev Maxim Sergeyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, research worker of the Institute of Physics named after L.V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from the Siberian Aerospace University in 2004. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, multiferroics, magnetoelectric interaction, growth of crystals. E-mail: msmolokeev@mail.ru.

Murygin Alexander Vladimirovich – Doctor of Science (Engineering), professor, head of the chair of information control systems of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1980. Area of scientific interests – automation of electron beam welding. E-mail: avm514@mail.ru.

Mushovets Konstantin Vladimirovich – graduate student of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2009. Area of scientific interests – safety of space systems. T. 8(391)262-18-47.

Nazarov Vladimir Pavlovich – Candidate of Sciences (Engineering), professor, head of the chair of aircraft engines of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F.Reshetnev. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic

Institute, in 1973. Area of scientific interests – production technology of rocket engines. E-mail: ums@sibsau.ru.

Oborina Lyudmila Ivanovna – candidate for Master's degree of the chair of quality management and certification of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian Aerospace Academy named after academician M. F. Reshetnev in 2001. Area of scientific interests – quality management, technological support of quality. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Okhotkin Kirill Germanovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associated professor, candidate for Doctor's degree of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian Aerospace Academy in 1999. Area of scientific interests – stability of rod and magnetic systems, mechanics of deformable solid body. E-mail: okg2000@mail.ru.

Pavlovskiy Maxim Sergeyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, research worker of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 2006. Area of scientific interests – first principal calculations, dynamics of lattice, phase transitions. E-mail: mspav@iph.krasn.ru.

Pashkovskiy Andrey Vasilyevich – graduate student of the Siberian State Technological University. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2008. Area of scientific interests – computer modeling. E-mail: linch07@mail.ru.

Piskazhova Tatyana Valeriyevna – Doctor of Science (Engineering), head of the chair of automation of production processes and thermal technology in metallurgy of the Institute of Non-ferrous Metals and Materials Science of the Siberian Federal University. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1985. Area of scientific interests – mathematical modeling of dynamics of parameters of process of electrolysis. E-mail: tpiskagova@sfu-kras.ru.

Pogoreltsev Evgeny Ilyich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, research worker of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from the Siberian Federal University in 2007. Area of scientific interests – calorimetry, phase transitions, ferroelectric material, dielectric properties. E-mail: pepel@iph.krasn.ru.

Polyakov Peter Vasilyevich – Doctor of Chemistry, professor, professor-consultant of the Siberian Federal University. Graduated from Leningrad Polytechnic Institute in 1957. Area of scientific interests – processes of heat and mass transfer in electrolyses cell for production of aluminum and magnesium. E-mail: p.v.polyakov@mail.ru.

Popkov Sergey Ivanovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, scientific secretary of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 2003. Area of scientific interests – physics of the magnetic phenomena, experimental physics, superconductivity. E-mail: volk80iph@yandex.ru.

Popov Evgeny Aleksandrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor of the chair of system analysis and research of operations of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1973. Area of scientific interests – physics of solid body, technology of processing of experimental data. E-mail: epopov@bmail.ru.

Rogalyov Alexander Alekseevich – graduate student of the Siberian Federal University. Graduated from the Siberian Federal University in 2012. Area of scientific interests – numerical algorithms of solution of tasks in conditions of uncertainty, thermodynamics of information processes. E-mail: ran@akadem.ru.

Rogalyov Alexey Nikolaevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research worker of the Institute of Computing Modeling of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk state university in 1977. Area of scientific interests – reliable numerical methods of solution of ordinary differential equations, minimax (guaranteed) methods of assessment of results of measurements, assessment of sets of reachability of control systems. E-mail: rogalyov@icm.krasn.ru.

Ruyga Irina Rudolfovna – Candidate of Economic Science, associated professor of the chair of economy and international business of mining and metallurgical complex of the Siberian Federal University, associated professor of economy of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk State Academy of Non-ferrous Metals and Gold in 2000. Area of scientific interests – investments, regional economics, state policy. E-mail: irina_rouiga@bk.ru.

Samokhvalova Svetlana Mikhaelovna – Candidate of Economic Science, associated professor of the chair of international personnel and project management of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian Aerospace Academy in 1997. Area of scientific interests – strategic management of innovative development of the higher school. E-mail: merlanabox@mail.ru.

Saunin Victor Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, associate professor, leading researcher of the chair of technical physics, "Volcano" laboratory of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1973. Area of scientific interests – gas-plasma dusting, covering with given properties, synthesis of nanomaterials. T. 8(391)291-90-71.

Semenkina Maria Evgenyevna – master of engineering and technologies, graduate student of the chair of system analysis and research of operations of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2012. Area of scientific interests –

intellectual information technologies, evolutionary calculations. E-mail: semenkina88@mail.ru.

Semenov Sergey Vasilyevich – graduate student, leading engineer of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from the Siberian Federal University in 2010. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena; superconductivity. E-mail: sem_601@mail.ru.

Semenov Sergey Sergeyevich – graduate student of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2009. Area of scientific interests – industrial enterprises economics. E-mail: sergey19862@ya.ru.

Senashov Sergey Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, head of the chair of information economic systems of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1975. Area of scientific interests – mechanics of deformable solid body. E-mail: sen@sibsau.ru.

Sergeev Anatoly Nikolaevich – president of fund of innovations "ITERA". Graduated from Krasnoyarsk State University in 1995. Area of scientific interests – modeling and management in stochastic and organizational systems, decision-making in active systems. E-mail: anatolyser@gmail.com.

Sergeeva Natalia Aleksandrovna – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of the chair of informatics of the Siberian Federal University. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1995. Area of scientific interests – stochastic management, nonparametric identification, modeling of systems. E-mail: sergena@list.ru.

Seregin Yury Nikolaevich – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of the chair of management information systems of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1985. Area of scientific interests – equipment and technology of electron beam welding. E-mail: ius_ceregin@sibsau.ru.

Sidorov Alexander Sergeyevich – Candidate of Sciences (Engineering), associate professor of automatic control system department of the Siberian state aerospace university named after academician M.F. Reshetnyov. Graduated from the Siberian state aerospace university named after academician M.F. Reshetnyov in 2006. Area of scientific interests – power electronics, power supply systems of spacecrafts, solar power. E-mail: sidorovalex83@gmail.com.

Smirnov Nikolay Anatolyevich – Doctor of Science (Engineering), professor, director of scientific research institute of rocket and space technique and technologies, head of the chair of technical mechanics of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1978. Area of scientific interests – robotics, mechatronics, mechanics of complex technical systems. E-mail: smirnov@sibsau.ru.

Smolyakov Dmitry Aleksandrovich – research engineer of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from the Siberian Federal University in 2011. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, resonant properties of resinous structures. E-mail: sda88@ iph.krasn.ru.

Sofronova Svetlana Nikolaevna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associated professor of the chair of technical physics of scientific and educational center of the Institute of Space Researches and High Technologies of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1999. Area of scientific interests – calculation of dynamics of lattice, group-theoretic analysis. E-mail: ssn@iph.krasn.ru.

Sterekhov Igor Vladimirovich – applicant for Candidate's degree of the chair of quality management and certification of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, electrical and mechanical engineer of JSC "Krasnoyarskenergo". Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute in 1988. Area of scientific interests – metrology and technological support of quality of power transmission lines. T. 8(391)291-90-94.

Tanasienko Feodor Vladimirovich – graduate student of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, engineer of the department of systems of thermal regulation and thermal analyses of JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2009. Area of scientific interests – mathematical modeling of thermal processes in systems of thermal regulation of spacecrafts. E-mail: tanasienko@iss-reshetnev.ru.

Telegin Sergey Vladimirovich – Candidate of Sciences (Engineering), senior research worker of the chair of technical physics, "Volcano" laboratory of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk Institute of Space Technique in 1989. Area of scientific interests – gas-plasma dusting, covering with given properties, synthesis of nanomaterials. E-mail: telegin@sibsau.ru.

Temerov Vladislav Leonidovich – senior research associate of the laboratory of radio spectroscopy and spin electronics of the Institute of Physics L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk Polytechnic Institute in 1967. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, multiferroics, magnetoelectric interaction, growth of crystals. E-mail: bezm@iph.krasn.ru.

Terskov Vitaly Anatolyevich – Doctor of Science (Engineering), professor of the chair of information technologies security of the Institute of Informatics and Telecommunications of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev.

Graduated from Krasnoyarsk Highest Command School of Radio Electronics of Antiaircraft Defense in 1982. Area of scientific interests – modeling and optimization of architecture of hardware-software complexes of objects control in real time. E-mail: terskovva@mail.ru.

Tolstopyatov Mikhail Igorevich – educational master of the chair of engines of aircraft of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2010. Area of scientific interests – boundary layer, heat exchange, heat output, twirled streams. E-mail: kam1kag3e@mail.ru.

Trifanov Ivan Vasilyevich – Doctor of Science (Engineering), professor, head of the department of quality management and certification of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from plant technical college, the branch of Krasnoyarsk Polytechnic Institute, in 1975. Area of scientific interests – aircraft engineering technology, technological support of quality. E-mail: sibgau-uks@mail.ru.

Tinchenko Yadviga Aleksandrovna – graduate student of the chair of system analysis and research of operations of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F.Reshetnev. Graduated from Moscow State University of Economy, Statistics and Informatics (Krasnoyarsk branch) in 2009. Area of scientific interests – applied informatics (in economy).

Falkov Valentin Olegovich – graduate student of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 1999. Area of scientific interests –boundary layer, heat exchange, a heat output, twirled streams. E-mail: falkov24061987@mail.ru.

Fedorischev Roman Mikhaylovich – research engineer of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from the Siberian Federal University in 2010. Area of scientific interests – physics of magnetic phenomena, magnetoresistance in resinous structures. E-mail: rmf@ iph.krasn.ru.

Fedorov Alexander Semenovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, senior research worker of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1984. Area of scientific interests – quantum and chemical calculations. E-mail: alex99@iph.krasn.ru.

Khanov Vladislav Hanifovich – Candidate of Science (Engineering), head of the chair of information technologies security of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk Polytechnic Institute in 1986. Area of scientific interests – microelectronic space instrument engineering, digital processing of signals. E-mail: hanov@sibsau.ru.

Hodenkov Alexey Aleksandrovich – graduate student of the chair of refrigerating, cryogenic equipment and conditioning of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2012. Area of scientific interests – calculation and design of power cars and installations. T. 8(391)291-90-93.

Tsarev Roman Yuryevich – Candidate of Sciences (Engineering), associated professor of the chair of system analysis and research of operations of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Krasnoyarsk State Technical University in 1999. Area of scientific interests – information technologies, multi-version software, multi-attributive methods of decision-making, space systems. E-mail: rahatamatahata@mail.ru.

Chaplina Albina Nikolaevna – Doctor of Economics, professor, head of the chair of management of Trade and Economic Institute of the Siberian Federal University. Graduated from the Siberian Institute of Technology in 1971. Area of scientific interests – strategic management of subjects of managing in the conditions of market economy. E-mail: elenasvo@mail.ru.

Chekmaryov Sergey Anatolyevich – graduate student of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2010. Area of scientific interests – design of electronic systems and devices, engineering of software development, design of electronic equipment. T. 8(391)262-18-47.

Chzhan Ekaterina Anatolyevna – candidate for Master's degree of the Siberian Federal University. Graduated from the Siberian Federal University in 2012. Area of scientific interests – parametrical identification in stochastic systems, nonparametric identification. E-mail: ecach@list.ru.

Shabanov Alexander Vasilyevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research associate of the Institute of Physics named after L. V. Kirensky of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. Graduated from Krasnoyarsk State University in 1993. Area of scientific interests – theoretical physics, electronic microscopy, photon crystals. E-mail: nikel@akadem.ru.

Sharypov Nikita Anatolyevich – graduate student of the chair of metallurgy of non-ferrous metals of the Institute of Non-ferrous Metals and Materials Science of the Siberian Federal University. Graduated from the Siberian Federal University in 2009. Area of scientific interests – automation of productions, multidimensional statistical analysis of data. E-mail: nikita.sharypov@gmx.com.

Shakhmatov Alexander Vladimirovich – engineer of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2007. Area of scientific interests – design of electronic systems and devices, engineering of software development, design of electronic equipment. T. 8(391)262-18-47.

Sheenok Dmitry Aleksandrovich – graduate student of Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, the branch of Irkutsk State University of Means of Communication. Graduated from the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev in 2010. Area of scientific interests – increase of reliability of software of complex objects control systems. E-mail: dmitryshkras@rambler.ru.

Yuldashev Tursun Kamaldinovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associated professor of the chair of higher mathematics of the Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from Fergana State Teacher Training Institute in 1980. Area of scientific interests – nonlinear theory of vulgar differential and integrated equations; boundary, mixed and back tasks for nonlinear equations in partial derivatives. E-mail: tursunbay@rambler.ru.

Yurtaev Evgeny Vladimirovich – chief of the sector in the department of systems of thermal regulation and thermal analyses of JSC "Information Satellite Systems" named after academician M. F. Reshetnev. Graduated from the Siberian Aerospace Academy in 2001. Area of scientific interests – mathematical modeling of thermal processes in systems of thermal regulation of spacecrafts. E-mail: urtaev.e@gmail.com.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. МАТЕМАТИКА. МЕХАНИКА, ИНФОРМАТИКА

Адрианов А. Л. О допустимых границах в задании краевого эффекта за скачком уплотнения 6

Алиев-Хетагов Р. С. Расчет продолжительности оптимального по времени разворота космического аппарата при смене режимов ориентации 12

Бойко С. О., Смирнов Н. А. Оценка напряженно-деформированного состояния сопряжения резьб треугольного и выпуклого профилей 14

Гордеев А. В., Горяшин Н. Н., Сидоров А. С. Анализ потерь мощности в шунтовом стабилизаторе напряжения короткозамыкающего типа 17

Горяшин Н. Н., Сидоров А. С. Анализ режимов работы светодиодных источников света большой мощности совместно с импульсным преобразователем 22

Жуков В. Г., Шеенок Д. А., Терсков В. А. Повышение надежности программного обеспечения сложных систем 28

Кишкин А. А., Делков А. В., Ходенков А. А., Зуев А. А., Жуйков Д. А. Проектная оптимизация теплотехнических систем, работающих по замкнутому контуру 34

Коплярова Н. В., Сергеева Н. А. О непараметрических алгоритмах идентификации нелинейных динамических систем 39

Корнеева А. А., Сергеев А. Н., Чжан Е. А. Исследование непараметрических моделей процессов трубчатого типа 44

Корнеева А. А., Сергеева Н. А. Об анализе данных в задаче идентификации статических систем 49

Кротова Е. И. Метод автоматического контроля качества работы технологических систем 54

Кузнецов А. А., Кузнецова А. С. Компьютерное моделирование конечных двупорожденных групп периода 5 59

Кукарцев В. В., Шеенок Д. А. Оценка затрат на модернизацию программного обеспечения критических по надежности систем 62

Кулягин В. А. Анализ применения модели оценки надежности автоматизированных систем управления предприятием 65

Ловчиков А. Н. Устойчивость широтно-импульсного стабилизатора в режиме прерывистых токов 71

Лопатин А. В., Захаров Ю. В., Охоткин К. Г., Вильянен В. В., Пашковский А. В. Геометрически нелинейная модель трансформируемого обода большой космической антенны с гибкими композитными элементами 75

Лопатин И. А. Определение основной частоты колебаний ортотропной пластины, закрепленной в углах 80

Медведев А. В. Н-модели для безынерционных систем с запаздыванием 84

Пискажова Т. В., Поляков П. В., Шарыпов Н. А. Использование методов многомерной обработки данных для анализа расхода электроэнергии алюминиевых электролизеров 89

Попов Е. А., Семенкина М. Е., Липинский Л. В. Принятие решений коллективом интеллектуальных информационных технологий 95

Рогалев А. Н., Рогалев А. А. Вычисление положения искусственного спутника Земли при ограничениях на ошибки измерений 99

Сенашов С. И. О системах дифференциальных уравнений с двумя характеристиками 104

Царев Р. Ю., Капулин Д. В., Машурова Д. В., Тынченко Я. А., Ковтанюк Д. Н. Многоатрибутивное формирование гарантоспособных систем управления и обработки информации 106

Юлдашев Т. К. О слабой разрешимости смешанной задачи для нелинейного уравнения с псевдопараболическим оператором высокой степени 110

РАЗДЕЛ 2. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Вшивков А. Ю., Танасиенко Ф. В., Головенкин Е. Н., Юртаев Е. В. Разработка и термовакуумные испытания тепловых экранов для защиты электропривода механического блока от эффекта «солнечная ловушка» 116

Жуйков Д. А., Фальков В. О., Кишкин А. А., Зуев А. А., Назаров В. П. Экспериментальные исследования течения несжимаемой вязкой жидкости в торцевой щели между вращающимся диском и неподвижной стенкой 123

Зуев А. А., Кишкин А. А., Толстопятов М. И., Жуйков Д. А. Теплоотдача вращательных течений в турбомашинах на основе двухслойной модели турбулентного пограничного слоя 127

Кислицкий М. И. Методологические основы оценивания системного влияния дополнительной полезной нагрузки на функционирование космического аппарата 130
Краев М. В., Краева Е. М. Особенности формирования кавитационных каверн в центробежном высокооборотном насосе 136
Лукин Ф. А., Шахматов А. В., Мушовец К. В., Зеленков П. В. Механизм управляемой телеметрии космического аппарата 140
Ханов В. Х., Шахматов А. В., Чекмарев С. А., Вергазов М. Ю., Лукин Ф. А. Концепция создания бортового комплекса управления для малых космических аппаратов 144

РАЗДЕЛ 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

Бондарев В. С., Втюрин А. Н., Крылов А. С., Колесникова Е. М. Электрокалорический и барокалорический эффект в некоторых сегнетоэлектрических гидросульфатах и триглицинсульфате 152
Гудим И. А., Молокеев М. С., Темеров В. Л., Безматерных Л. Н., Еремин А. В. Рацемия тригональных монокристаллов редкоземельных оксиборатов 156
Дружинина А. А., Лаптенок В. Д., Мурыгин А. В., Серегин Ю. Н. Метод контроля влияния магнитных полей при электронно-лучевой сварке по рентгеновскому излучению из зоны обработки 158
Елисеева Н. С., Кузубов А. А., Краснов П. О., Федоров А. С., Лыхин А. О. Теоретическое исследование сорбции и диффузии водорода в интерметаллиде Mg_2Ni 163
Еремин Е. В., Смоляков Д. А., Федорищев Р. М., Густайцев А. О., Бондарев И. А. Особенности магнитного поведения кристаллов $Pb_3Mn_7O_{15}$, допированных ионами Fe, Ga, Ge 168
Зиненко В. И., Павловский М. С., Крылов А. С. Динамика решетки кристалла $HoFe_3B_4O_{12}$ 171
Карташев А. В., Богданов Е. В., Погорельцев Е. И., Герасимова Ю. В. Тепловые свойства магнето- и барокалорический эффекты в кристалле $La_{0,7}Pb_{0,3}MnO_3$ 173
Кацура А. В., Крушенко Г. Г. Исследование влияния календарного времени на сопротивление усталости болт-заклепочных соединений авиационной техники 177
Крушенко Г. Г. Получение и применение пористых металлических материалов в технике 181
Крылов А. С., Софронова С. Н., Колесникова Е. М., Горяйнов С. В., Кочарова А. Г. Исследование структурных фазовых переходов в оксифториде $K_3WO_3F_3$ 185
Крылов А. С., Софронова С. Н., Колесникова Е. М., Исаенко Л. И. Исследование динамики решетки оксифторида $Rb_2KMoO_3F_3$ 190
Мейстер Р. А., Богданов В. В., Готовко С. А., Мейстер А. Р. Влияние конденсаторного умножителя напряжения на устойчивость горения дуги в углекислом газе 194
Оборина А. И., Трифанов И. В., Исмаилов Б. Н., Стерехов И. В. Технологическое обеспечение качества при изготовлении труб волноводов КВЧ-диапазона 197
Попков С. И., Семенов С. В., Шабанов А. В., Волков Н. В., Михашенок Н. В. Получение и характеризация высококачественных монокристаллов $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ 201
Саунин В. Н., Телегин С. В. Магнитожесткие плазмонапыленные покрытия на основе Sm-Co-сплавов 204

РАЗДЕЛ 4. ЭКОНОМИКА

Акбулатов Т. Э. Концептуальная модель управления государственными расходами на социальное обслуживание населения 210
Катык К. В., Крушенко Г. Г. Оборонно-промышленный комплекс России: проблемы и решения 212
Руйга И. Р., Кацик Д. Е. Государственно-частное партнерство как механизм активизации инвестиционной деятельности в регионах Сибирского федерального округа 215
Самохвалова С. М. Инструменты оценки качества бизнес-процессов стратегического управления инновационным развитием вуза в условиях глобальной образовательной конкуренции 221
Семенов С. С. Стратегическое планирование деятельности предприятий оборонно-промышленного комплекса: матричная модель формирования экономической политики 227
Чаплина А. Н., Герасимова Е. А. Обеспечение конкурентоспособности предприятий предпринимательской сферы на основе методов управления качеством 232

Сведения об авторах 239

CONTENTS

PART 1. MATHEMATICS, MECHANICS, COMPUTER SCIENCE

Adrianov A. L. About permissible limits at assignment of boundary effect following the shock wave 6
Aliev-Hetagov R. S. Calculation of time-optimal maneuvers of a spacecraft in case of changing modes of orientation 12
Boyko S. O., Smirnov N. A. Estimation of stress strain state of blending of threads of triangular and buckled profiles 14
Gordeev A. V., Goryashin N. N., Sidorov A. S. Analysis of power losses in switching shunt regulator 17
Goryashin N. N., Sidorov A. S. Analysis of high power LED light sources operating supplied combined with switching converter 22
Zhukov V. G., Sheenok D. A., Terskov V. A. Reliability improvement of complex networks software 28
Kishkin A. A., Delkov A. V., Khodenkov A. A., Zuev A. A., Zhuykov D. A. Design optimization of thermo-technical systems operating in a closed circuit 34
Koplyarova N. V., Sergeeva N. A. About nonparametric algorithms of nonlinear dynamical processes identification 39
Korneeva A. A., Sergeev A. N., Chzhan E. A. Investigations of nonparametric models of tubular type processes 44
Korneeva A. A., Sergeeva N. A. Data analysis in a problem of static systems identification 49
Krotova E. I. Method of automatic quality assurance of work of technological systems 54
Kuznetsov A. A., Kuznetsova A. S. Computer modeling of finite two-generator groups of exponent 5 59
Kukartsev V. V., Sheenok D. A. Cost estimation for modernization of critical reliability systems software 62
Kulyagin V. A. Analysis of application of reliability assessment model of enterprise automated management systems 65
Lovchikov A. N. Stability of pulse-width modulation stabilizer in mode of intermittent currents 71
Lopatin A. V., Zakharov Yu. V., Okhotkin K. G., Vilyanen V. V., Pashkovskiy A. V. Geometricaly nonlinear model of an transformed rim of a big space antenna with flexible composite elements 75
Lopatin I. A. Determination of vibrations dominant mode of an orthotropic plate fastened to the bedding angles 80
Medvedev A. V. H-models for non-inertia systems with a delay 84
Piskazhova T. V., Polyakov P. V., Sharypov N. A. Usage of methods of multi-dimentional data processing for analysis of energy consumption of aluminum reduction cells 89
Popov E. A., Semenkina M. E., Lipinskiy L. V. Decision making with intelligent information technology ensemble 95
Rogalyov A. N., Rogalyov A. A. Numerical computations for artificial Earth satellite position under restrictions on measurements errors 99
Senashov S. I. About systems of differential equations with two characteristics..... 104
Tsarev R. Yu., Kapulin D. V., Mashurova D. V., Tynchenko Ya. A., Kovtanyuk D. N. Multiple attribute composition of dependable control and data processing systems 106
Yuldashev T. K. On feeble solubility of mixed problem for nonlinear equation with pseudo-parabolic operator of high degree 110

PART 2. AVIATIONAND SPACE-ROCKET ENGINEERING

Vshivkov A. Yu., Tanasienko F. V., Golovenkin E. N., Yurtaev E. V. Development and thermal vacuum tests of heat shields for protection of mechanical electric drive unit from effect of “solar trap” 116
Zhuykov D. A., Falkov V. O., Kishkin A. A., Zuev A. A., Nazarov V. P. Experimental investigations of incompressible viscous fluid in the front gap between rotating disk and fixed boundary 123
Zuev A. A., Kishkin A. A., Tolstopyatov M. I., Zhuykov D. A. Rotational flows heat transfer in turbomachines based on two-layer model of turbulent boundary layer 127
Kislitskiy M. I. Methodological bases of estimation of systemic action of additional payload on spacecraft functioning 130
Kraev M. V., Kraeva E. M. Features of formation of cavitational cavities in centrifugal high-sided pump 136
Lukin F. A., Shakhmatov A. V., Mushovets K. V., Zelenkov P. V. Mechanism of operated telemetry for a spacecraft 140

Khanov V. Kh., Shakhmatov A. V., Chekmaryov S. A., Vergazov M. Yu., Lukin F. A. Principles of on-board control complex development for small spacecrafts 144

PART 3. TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

Bondarev V. S., Vtyurin A. N., Krylov A. S., Kolesnikova E. M. Electrocaloric and barocaloric effect in some ferroelectric hydrosulfates and triglycine sulfate 152
Gudim I. A., Molokeev M. S., Temerov V. L., Bezmaternykh L. N., Eremin A. V. Racemism of trigonal single rare-earth oksiborates 156
Druzhinina A. A., Laptenok V. D., Murygin A. V., Seregin Yu. N. Method for monitoring of impact of magnetic fields in the process of electron-beam welding by X-ray radiation from treatment area 158
Eliseeva N. S., Kuzubov A. A., Krasnov P. O., Fedorov A. S., Lykhin A. O. Theoretical study of sorption and diffusion of hydrogen in intermetallic compound Mg_2Ni 163
Eremin E. V., Smolyakov D. A., Fedorischev R. M., Gustaytsev A. O., Bondarev I. A. Peculiarities of magnetic behavior of crystals $Pb_3Mn_7O_{15}$ doped by Fe, Ga, Ge ions 168
Zinenko V. I., Pavlovskiy M. S., Krylov A. S. Lattice dynamics of crystal $HoFe_3B_4O_{12}$ 171
Kartashev A. V., Bogdanov E. V., Pogoreltsev E. I., Gerasimova Yu. V. Thermal properties, magneto- and barocaloric effects in $La_{0.7}Pb_{0.3}MnO_3$ single crystal 173
Katsura A. V., Krushenko G.. G. Influence of calendar time on fatigue resistance of bolt-riveted joints of aircrafts 177
Krushenko G. G. Manufacture and application of porous metallic materials in engineering 181
Krylov A. S., Sofronova S. N., Kolesnikova E. M., Goryaynov S. V., Kocharova A. G. Investigation of structure phase transitions in oxyfluoride $K_3WO_3F_3$ 185
Krylov A. S., Sofronova S. N., Kolesnikova E. M., Isaenko L. I. Investigation of lattice dynamics of oxyfluoride $Rb_2KMoO_3F_3$ 190
Meyster R. A., Bogdanov V. V., Gotovko S. A., Meyster A. R. Influence of capacitor voltage multiplier on arc burning stability in the carbon dioxide 194
Oborina A. I., Trifanov I. V., Ismailov B. N., Sterekhov I. V. Technological support of quality during manufacture of pipes of waveguides of extremely-high frequency band 197
Popkov S. I., Semenov S. V., Shabanov A. V., Volkov N. V., Mikhashenok N. V. Synthesis and investigation of high-quality single crystals $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ 201
Saunin V. N., Telegin S. V. Hard magnetic plasma-sprayed coverings on the basis of Sm–Co alloys 204

PART 4. ECONOMICS

Akbulatov T. E. Conceptual state expenditure governance model for publuic social services 210
Katyk K. V., Krushenko G. G. Russian defense-industrial complex: problems and solutions 212
Ruyga I. R., Katsik D. E. Public-private partnership as a stimulation mechanism of investment activities in the regions of Siberian federal district 215
Samokhvalova S. M. Quality assesment of business-processes of university strategic management at global educational competition 221
Semenov S. S. Strategic planning of military-industrial complex: matrix model of economic policy development 227
Chaplina A. N., Gerasimova E. A. Promotion of competitiveness of business enterprises on the basis of quality management methods 232

ABOUT THE AUTHORS 248

Приложение № 2
к Положению « 63/74 от 15.03.06
о журнале «Вестник СибГАУ»

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК СИБГАУ»

Общие требования. Тексты статей 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, флешке (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 пяти. Автор имеет право публиковаться в выпуске один раз, второй в соавторстве.

Индекс УДК предшествует названию статьи, соответствует заявленной теме и проставляется в верхнем левом углу листа.

Электронная копия. Статья набирается в программе Microsoft Office Word 2003.

Содержание. В статье необходимо сформулировать проблемы, отразить объект исследования, достигнутый уровень процесса исследования, новизну результатов, область их применения.

Статья должна заканчиваться выводом. 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);

– аннотация (авторское резюме);

– ключевые слова.

Блок 2 – информация Блока 1 в романском алфавите (транслитерация и перевод соответствующих данных) в той же последовательности: авторы на латинице (транслитерация); заглавие, аннотация, ключевые слова, название организации, адрес организации – на английском языке.

Блок 3 – полный текст статьи на русском или другом языке (язык оригинала).

Блок 4 – Список литературы с русскоязычными ссылками на русском языке по ГОСТ Р 7.0.5 (для статей на русском языке).

Блок 5 – Список литературы с русскоязычными и другими ссылками в романском алфавите.

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, например [1].

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 пт, 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 подрисуночную 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.

К печатному варианту статьи необходимо приложить:

1) экспертное заключение о возможности открытой публикации;

2) внешнюю рецензию (рецензент не ниже ученой степени доктора наук);

3) сведения об авторе предоставляются на русском и английском языках и оформляются в следующей последовательности:

– фамилия, имя, отчество (полностью);

– ученая степень, звание;

– должность, место работы;

– вуз, год его окончания;

– область научных интересов;

– e-mail;

– номер телефона;

– адрес для переписки (для иногородних).

В сведениях об авторах нельзя использовать аббревиатуры и сокращения.

Статьи рецензируются. Отклоненные материалы не возвращаются.