

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Под редакцией доктора технических наук, профессора А. А. Ковеля

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ И КОНСТРУКТОРСКАЯ РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
Горяшин Н. Н., Лукьяненко М. В., Соломатова А. А., Хорошко А. Ю. Анализ режимов работы квазирезонансного преобразователя напряжения	7
Горностаев А. И. Унификация интерфейсных модулей сопряжения блоков бортового комплекса управления	13
Афиногенов И. А., Конькин А. В., Эннс П. Б., Капустин А. Н. Электростатические реле на базе МЭМС-технологии	18
Логанов А. А., Ямашев Э. М. Моделирование характеристик насосов системы терморегулирования.....	24
Мизрах Е. А., Сидоров А. С. Об абсолютной устойчивости процессов в имитаторах солнечных батарей	28
Кашубский А. Н., Крушенко Г. Г. Идентификация марок сплавов с использованием методов неразрушающего контроля.....	33
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
Покидько С. В., Кочура С. Г. Корректировка результатов ресурсных испытаний электромеханических устройств при малых выборках	38
Кочура С. Г., Кузнецов Н. А., Носенков А. А. О математическом моделировании электрических испытаний космических аппаратов связи.....	43
Ковель А. А., Покидько С. В. Математическое планирование эксперимента в условиях факторной ниши.....	47
Гришелёнок Д. А., Ковель А. А. Использование результатов математического планирования эксперимента при формировании обучающей выборки нейросети.....	51

Ковель А. А., Покидько С. В. Исследование элементной базы бортовой аппаратуры в условиях космического пространства.....	54
Федосов В. В., Орлов В. И. Минимально необходимый объем испытаний изделий микроэлектроники на этапе входного контроля.....	58
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОТРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
Богданов К. В., Ловчиков А. Н. Архитектура EDA-системы на основе конкурирующих параллельных процессов.....	63
Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы распознавания образов в задаче проверки гипотезы о распределениях случайных величин	67
Лапко А. В., Лапко В. А., Хлопов А. Н. Непараметрический алгоритм автоматической классификации статистических данных	73
ИНФОРМАЦИЯ	80
SUMMARY (<i>перевод Ю. И. Копилевича</i>).....	82

THEMATIC ISSUE

DESIGNING AND EXPERIMENTAL IMPROVEMENTS OF SPACE VEHICLES ELEMENTS

By Edition of A. A. Kovel, Doctor of Technical Science, Professor

CONTENTS

PREFACE	5
SCHEMATIC AND DESING DEVELOPMENT OF SPACE VEHICLE ELEMENTS	
Goryashin N. N., Lukyanenko M. V., Solomatova A. A., Khoroshko A. Yu. Analysis of Operation Modes of Quasi-Resonant Voltage Converter	7
Gornostaev A. I. Unification of Interface Modules of Onboard Control System Units	13
Afinogenov I. A., Konkin A. V., Enns P. B., Kapustin A. N. Electrostatic Relay on the Base of Microelectromechanical Technology	18
Loganov A. A., Yamashev E. M. Physical Modeling of Characteristics of Pump in Space Vehicle Heat Regulation System	24
Mizrakh E. A., Sidorov A. S. On Absolute Stability of Processes in Solar Array Simulator	28
Kashubsky A. N., Krushenko H. G. Identification of Alloy Grade with the Use of Nondestructive Control Methods	33
EXPERIMENTAL TESTING OF SPACE VEHICLE ELEMENTS	
Pokidko S. V., Kochura S. G. Correction of Endurance Test Data for Electromechanical Devices under Small Samples Conditions	38
Kochura S. G., Kuznetsov N. A., Nosenkov A. A. On Mathematical Modeling of Electrical Testing of Communication Satellites	43
Kovel A. A., Pokidko S. V. Mathematical Planning of Experiment under Factor Niche Conditions	47
Grishelyonok D. A., Kovel A. A. Application of Mathematical Planning of Experiment Method for Neural Network Training	51
Kovel A. A., Pokidko S. V. Investigation of Onboard Apparatus Components under Space Conditions	54
Fedosov V. V., Orlov V. I. Minimal Necessary Extent of Examinations of Microelectronic Products at Inspection Test Stage	58

**MATHEMATICAL METHODS OF ESTIMATION OF SPACE VEHICLE ELEMENTS
DEVELOPMENT RESULTS**

Bogdanov K. V., Lovchikov A. N. Architecture of an EDA-System on the Base of Competitive Parallel Processes	63
Lapko A. V., Lapko V. A. Nonparametric Algorithms of Pattern Recognition in the Problem of Hypothesis Testing on Distributions of Random Variables.....	67
Lapko A. V., Lapko V. A., Khlopov A. N. Nonparametric Algorithm of Automatic Classification of Statistical Data.....	72
INFORMATION	80
SUMMARY	82

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий тематический выпуск журнала является продолжением изданного ранее спецвыпуска, посвященного исследованиям в области космической техники, проводимым учеными Красноярского края (см. „Известия вузов. Приборостроение“. 2008, № 8).

В настоящее время одним из лидирующих предприятий в России по реализации космических программ является ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва (ОАО „ИСС“, Железногорск, Красноярский край). Продукция ОАО „ИСС“ — космические аппараты различного назначения — составляет основную часть национальной космической группировки. Успешны и международные космические проекты.

Существенный вклад в конструкторские разработки и научные исследования, ориентированные на получение результатов мирового уровня, вносит многолетнее сотрудничество ОАО „ИСС“ с Сибирским государственным аэрокосмическим университетом им. акад. М. Ф. Решетнёва (СибГАУ), Сибирским федеральным университетом (СФУ), Институтом вычислительного моделирования СО РАН (ИВМ СО РАН) и другими научными коллективами России. Особенностью такого сотрудничества является оперативное внедрение инноваций в учебные программы университетов, что способствует приобщению будущих специалистов к передовым космическим технологиям.

Результаты совместных исследований и разработок представлены в настоящем тематическом выпуске.

Выпуск содержит три раздела в соответствии с тематикой статей, освещающих основные направления исследований в области космической техники. Первый раздел посвящен совершенствованию схемотехнических, конструкторских и технологических решений при разработке элементов и устройств космических аппаратов; во втором разделе рассматриваются методы экспериментальной отработки элементов бортовой аппаратуры; в третий раздел включены статьи, описывающие математические методы оценки результатов отработки и эксплуатации элементов космических аппаратов.

*Профессор кафедры
космических информационных систем СибГАУ,
доктор технических наук А. А. КОВЕЛЬ*

PREFACE

This thematic issue of the Journal is a sequel to the special issue published three years ago which is dedicated to scientific investigations into space engineering carried out by scientists of Krasnoyarsk Territory.

Today Joint Stock Company “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems” (JSC ISS, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory) holds leading position in Russia in realization of space programs. Production of JSC ISS — space vehicles of various purposes — comprises the major portion of national space alignment. JSC ISS also participates successfully in international space projects.

Significant contribution to engineering developments and scientific researches aimed at results on a level with the highest world standards belongs to long-term cooperation between JSC ISS and M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Siberian Federal University, Institute of Computational Modeling of Siberian Branch of RAS, and other scientific collectives in Russia. A special feature of the cooperation is a prompt incorporation of innovative results into course of studies at the universities, which contributes to familiarization of future specialists with cutting-edge space technologies.

Results of the joint investigations are presented in this thematic issue.

The issue includes three sections in accordance with subject areas of the articles related to principle lines of enquiries into space engineering. The first section covers improvement of schematic, engineering, and technological solutions in space vehicle components design; experimental development of space vehicle components is considered in the second section; the third section includes articles on mathematical methods of estimation of results of space vehicle components development and maintenance.

*A. A. Kovel
Doctor of Technical Science, Professor
Siberian State Aerospace University,
Department of Cosmic Information Systems*

СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ И КОНСТРУКТОРСКАЯ РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

УДК 621.314

Н. Н. Горяшин, М. В. Лукьяненко, А. А. Соломатова, А. Ю. Хорошко

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КВАЗИРЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Представлены результаты теоретического и экспериментального анализа режимов работы квазирезонансного преобразователя напряжения. Исследовано влияние переменной составляющей тока дросселя выходного фильтра преобразователя на его регулировочную характеристику. Рассмотрены два варианта исследуемого режима — с половинным и полным резонансным циклом преобразования напряжения.

Ключевые слова: квазирезонансный преобразователь, электронный ключ, дроссель фильтра, резонансный контур, коэффициент преобразования.

Совершенствование источников вторичного электропитания, построенных на базе высокочастотных импульсных преобразователей напряжения (ПН), направлено на улучшение их энергетических характеристик, повышение КПД и качества выходной электроэнергии, что особенно актуально при создании автономных систем электроснабжения космических аппаратов. Одним из перспективных направлений развития энергопреобразовательной техники является применение резонансных контуров (РК) в цепи электронных ключевых элементов (КЭ). Это позволяет распределить энергию между элементами РК в течение одного цикла переключения КЭ и тем самым осуществлять коммутацию при нулевом значении тока, снижая таким образом динамические потери в силовых полупроводниковых ключах практически до нуля. Форма тока и напряжения становится близкой к синусоидальной, что способствует снижению потерь в магнитопроводах силовых трансформаторов и дросселях выходных фильтров при воздействиях высших гармоник [1, 2].

Преобразователи с РК имеют существенные преимущества по сравнению с классическими импульсными ПН с прямоугольной формой тока и напряжения. Это, однако, не позволяет использовать их взамен последних из-за более сложной схемотехники и неконтролируемых процессов в цепи КЭ. Таким образом, возникает задача определения таких параметров элементов силовой части ПН, при которых выполняется коммутация КЭ при нулевых значениях мощности в заданном диапазоне регулирования. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость исследования электромагнитных процессов, происходящих в цепях КЭ и РК при работе совместно с выходным фильтром.

В настоящей статье приведены результаты теоретического и экспериментального анализа режимов работы квазирезонансного ПН с переключением КЭ при нулевых значениях тока (что обозначим как ПНТ) [2—6]. Упрощенная схема такого преобразователя напряжения

представлена на рис. 1. Приведем краткое описание его работы. Пусть первоначально КЭ, в качестве которого используется МДП-транзистор VTI , заперт. Выходной ток протекает через рекуперативный диод $VD3$ за счет энергии, запасенной в дросселе выходного фильтра L_ϕ . В момент времени, определяемый схемой управления, КЭ открывается. Колебательный контур, образованный катушкой индуктивности L_p и конденсатором C_p , начинает получать энергию от первичного источника. Заряд конденсатора C_p и последующий его разряд будут происходить по синусоидальному закону с частотой, равной собственной частоте РК. Одновременно ток I_{L_p} , протекающий через индуктивность L_p , также будет изменяться по синусоидальному закону — вначале увеличиваться, затем уменьшаться. Когда ток I_{L_p} достигает нулевого значения,

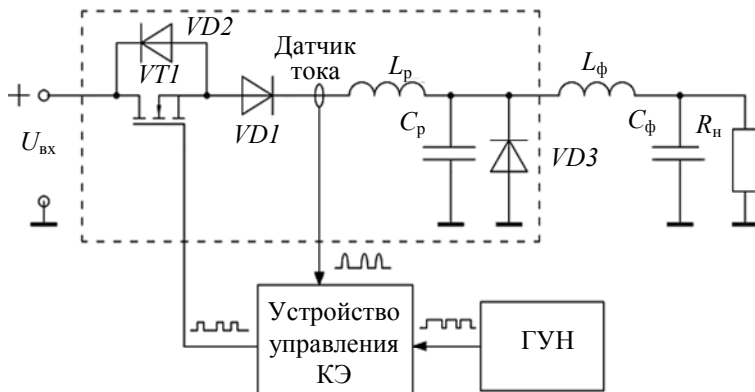


Рис. 1

ния, устройство управления КЭ формирует запирающий сигнал, вследствие чего VTI закрывается. При этом возможны два варианта описанного режима:

— режим половинного резонансного цикла (ПНТ-1), когда диод $VD1$ предотвращает протекание тока через диод $VD2$ в обратном направлении, что может быть вызвано продолжением резонансного процесса;

— режим полного резонансного цикла (ПНТ-2) при отсутствии диода $VD1$ и наличии шунтирующего диода $VD2$.

Когда ток I_{L_p} становится равным нулю и КЭ заперт, выходной ток протекает через дроссель фильтра L_ϕ и конденсатор C_p . Как только последний разрядится до нуля, открывается диод $VD3$. На этом резонансный цикл заканчивается и начинается следующий.

Выходное напряжение в обоих указанных режимах определяется средним по времени значением напряжения на конденсаторе РК и регулируется изменением длительности закрытого состояния КЭ. При этом посредством генератора, управляемого напряжением (ГУН), изменяется частота переключения КЭ, поскольку интервал времени, в течение которого осуществляется колебательный процесс в РК, практически постоянен при фиксированных значениях тока нагрузки и входного напряжения. Идеализированные временные диаграммы, поясняющие работу исследуемого ПН в режимах ПНТ-1 и ПНТ-2, приведены на рис. 2, а и б соответственно [3, 4].

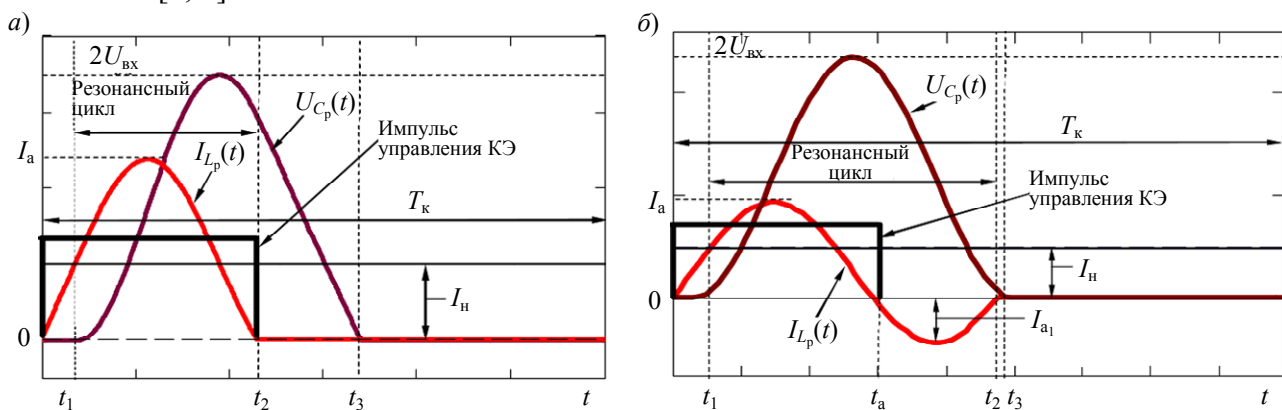


Рис. 2

В традиционном варианте, предложенном в [6], математическое описание работы ПН дано при допущении, что ток дросселя выходного фильтра является постоянной величиной,

равной току нагрузки в установившемся режиме. Один период работы КЭ в цепи РК преобразователя в режиме ПНТ-1 можно подразделить на четыре временных интервала (см. рис. 2, а), которые описываются следующими соотношениями:

$$0 \leq t < t_1 \begin{cases} I_{L_p}(t) = \frac{U_{\text{ВХ}} t}{L_p}, \\ U_{C_p}(t) = 0, \\ \Delta t_1 = t_1 = \frac{I_H L_p}{U_{\text{ВХ}}}; \end{cases} \quad (1)$$

$$t_1 \leq t < t_2 \begin{cases} I_{L_p}(t) = I_H + U_{\text{ВХ}} \frac{\sin(\omega_0(t-t_1))}{Z_0}, \\ U_{C_p}(t) = U_{\text{ВХ}} (1 - \cos(\omega_0(t-t_1))), \\ \Delta t_2 = t_2 - t_1 = \frac{\pi}{\omega_0} + \frac{1}{\omega_0} \arcsin\left(\frac{Z_0 I_H}{U_{\text{ВХ}}}\right); \end{cases} \quad (2)$$

$$t_2 \leq t < t_3 \begin{cases} U_{C_p}(t) = -\frac{(t-t_2) I_H}{C_p} + U_{\text{ВХ}} (1 - \cos(\omega_0(t-t_2))), \\ I_{L_p}(t) = 0, \\ \Delta t_3 = t_3 - t_2 = \frac{C_p}{I_H} U_{\text{ВХ}} (1 - \cos(\omega_0(t-t_2))); \end{cases} \quad (3)$$

$$t_3 \leq t < T_k \begin{cases} I_{L_p}(t) = 0, \\ U_{C_p}(t) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $I_{L_p}(t)$ — ток, протекающий через индуктивность L_p ; $U_{C_p}(t)$ — напряжение на конденсаторе РК; $Z_0 = (L_p/C_p)^{0,5}$; $\omega_0 = (L_p C_p)^{-0,5}$; I_H — ток нагрузки, равный среднему току дросселя в установившемся режиме; T_k — период коммутации.

Период работы ПН в режиме ПНТ-2 также можно разбить на четыре интервала (см. рис. 2, б); от предыдущего случая отличаются только интервалы $[t_1; t_2]$ и $[t_2; t_3]$, которые описываются выражениями [6]

$$t_1^* \leq t < t_2^* \begin{cases} I_{L_p}(t) = I_H + U_{\text{ВХ}} \frac{\sin(\omega_0(t-t_1))}{Z_0}, \\ U_{C_p}(t) = U_{\text{ВХ}} (1 - \cos(\omega_0(t-t_1))), \\ \Delta t_2 = t_2 - t_1 = \frac{2\pi - \arcsin\left(\frac{I_H Z_0}{U_{\text{ВХ}}}\right)}{\omega_0}; \end{cases} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned}
 & U_{C_p}(t) = U_{Bx} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{I_H Z_0}{U_{Bx}} \right)^2} \right] - \frac{I_H}{C_p} (t - t_2), \\
 & t_2^* \leq t < t_3^* \left\{ \begin{aligned}
 & I_{L_p}(t) = 0, \\
 & U_{Bx} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{I_H Z_0}{U_{Bx}} \right)^2} \right] \\
 & \Delta t_3 = t_3 - t_2 = \frac{\quad}{I_H Z_0 \omega_0}.
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь для отрицательной и положительной полуволн тока резонансного цикла интервал $[t_1; t_2]$ может быть разбит на $[t_1; t_a]$ и $[t_a; t_2]$.

Кривая тока диода $VD3$ применительно к обоим рассматриваемым режимам имеет в идеальном случае трапецеидальную форму и определяется кусочной функцией

$$I_{VD3}(t) = \begin{cases} I_H, & t_3 \leq t < T_K, \\ I_H - \frac{U_{Bx} t}{L_p}, & 0 \leq t \leq t_1. \end{cases} \quad (7)$$

Проверка корректности приведенного аналитического описания работы КЭ в цепи РК была проведена на экспериментальном макете последовательного понижающего квазирезонансного ПН. Исходя из условий $Z_0 I_{H \max} / U_{Bx \min} < 1$, $\omega_0 \gg (L_\phi C_\phi)^{-0,5}$, где $I_{H \max}$ — максимальный ток нагрузки, $U_{Bx \min}$ — минимальное входное напряжение, определены параметры элементов резонансного контура и выходного фильтра: $L_p = 1,04$ мкГн; $C_p = 22$ нФ; $L_\phi = 45$ мкГн, $C_\phi = 22,2$ мкФ.

На рис. 3, а, б приведены осциллограммы токов и напряжений для режимов соответственно ПНТ-1 и ПНТ-2, полученные при $I_H = 3,3 \pm 0,15$ А и $U_{Bx} = 56 \pm 1$ В, $U_{Bx \max} = 24 \pm 0,2$ В; сплошные кривые соответствуют экспериментальным данным, штриховые — аналитическому описанию (при $\Delta I_{L_\phi} = 0$), пунктирные — уточненному аналитическому описанию.

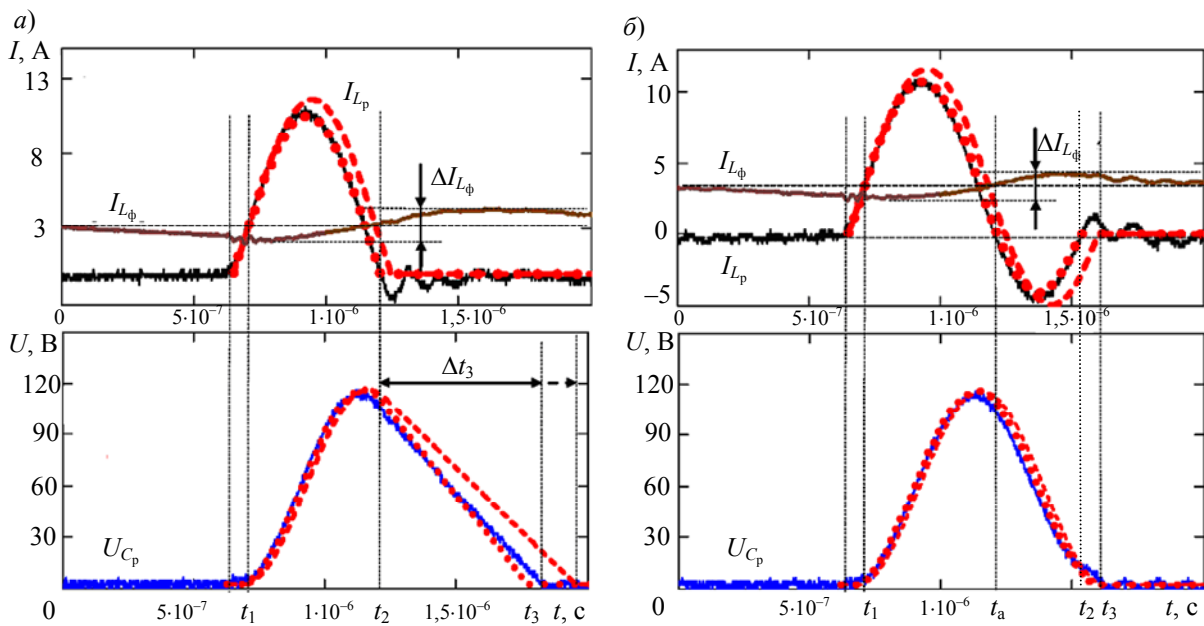


Рис. 3

Как видно из экспериментальных диаграмм, ток дросселя выходного фильтра I_{L_ϕ} изменяется в течение одного цикла преобразования и принимает различные значения на каждом

из трех интервалов резонансного цикла, при этом аналитические кривые, рассчитанные с использованием функций (1)—(6), имеют заметные расхождения с экспериментальными, что свидетельствует о влиянии работы дросселя фильтра на форму кривых тока и напряжения РК.

Решение задачи об оценке влияния переменной составляющей тока дросселя выходного фильтра на форму кривых тока и напряжения в течение резонансного цикла можно свести к определению фиксированного значения тока на каждом интервале в течение одного цикла коммутации. Далее, чтобы построить теоретические кривые тока и напряжения максимально близкими к экспериментальным, на интервале $[t_2; t_3]$ для режима ПНТ-1 и интервале $[t_a; t_3]$ для режима ПНТ-2 можно произвести замену I_H на $(I_H + \Delta I_{L\phi}/2)$, где $\Delta I_{L\phi}$ — размах пульсаций тока дросселя фильтра, так как на большей части интервала $[t_2; t_3]$ в режиме ПНТ-1 и интервала $[t_a; t_3]$ в режиме ПНТ-2 ток $I_{L\phi}$ изменяется незначительно. На интервале $[0; t_1)$ параметр I_H заменяется на $(I_H - \Delta I_{L\phi}/2)$ для обоих режимов. На интервале $[t_1; t_2)$ для режима ПНТ-1 и интервале $[t_1; t_a)$ для режима ПНТ-2 в функциях, описывающих ток и напряжение, также может быть произведена замена I_H на $(I_H - \Delta I_{L\phi}/2)$, а при малых значениях пульсаций тока дросселя выходного фильтра, когда $\Delta I_{L\phi} \ll I_H$, может сохраняться параметр I_H . Размах пульсаций тока дросселя в установившемся состоянии может быть определен как

$$\Delta I_{L\phi} = \frac{\int_{t_{L1}}^{t_{L2}} U_{Cp}(t) dt}{L_{\phi}},$$

где $(t_{L2} - t_{L1})$ — длительность положительной части полуволны напряжения на дросселе выходного фильтра при условии $U_{Cp}(t_{L1}) = U_{Cp}(t_{L2}) = U_{\text{вых}}$.

Аналитические кривые, полученные с учетом указанных уточнений (см. рис. 3, а, б), подтверждают справедливость предыдущих рассуждений, что характеризуется совпадением с экспериментальными осциллограммами.

Для учета пульсаций тока дросселя фильтра необходимо рассчитать коэффициент передачи K_U преобразователя напряжения данного типа [6]. Коэффициентом передачи по напряжению исследуемого преобразователя является величина $U_{Cp}/U_{\text{вх}}$, где U_{Cp} — усредненное значение напряжения на конденсаторе РК:

$$U_{Cp} = \frac{1}{T_k} \int_{t_0}^{T_k} U_{Cp}(t) dt = \frac{Q_1 + Q_2}{T_k}.$$

В режиме ПНТ-2 коэффициент K_U слабо зависит от тока нагрузки [6]. Таким образом, в соответствии с временными интервалами для выражений (1)—(4), определяем функции Q_1 и Q_2 только для режима ПНТ-1:

$$Q_1 = \int_{t_1}^{t_2} U_{\text{вх}} (1 - \cos(t - t_1)) dt = U_{\text{вх}} (t_2 - t_1) - \frac{U_{\text{вх}}}{\omega_0} [\sin \omega_0 (t - t_1)]_{t_1}^{t_2} = \frac{U_{\text{вх}}}{\omega_0} \left[\pi + \frac{I_H Z_0}{U_{\text{вх}}} + \arcsin \left(\frac{I_H Z_0}{U_{\text{вх}}} \right) \right],$$

$$Q_2 = U_{Cp}(t_2) \frac{t_3 - t_2}{2} = \frac{(U_{Cp}(t_2))^2}{2 \cdot I_H Z_0 \omega_0} = \frac{U_{\text{вх}}^2 \left[1 + \cos \left(\arcsin \frac{I_H Z_0}{U_{\text{вх}}} \right) \right]^2}{2 \cdot I_H Z_0 \omega_0} = \frac{U_{\text{вх}}^2 \left[1 + \sqrt{1 - \left[\frac{I_H Z_0}{U_{\text{вх}}} \right]^2} \right]^2}{2 \cdot I_H Z_0 \omega_0}.$$

Тогда с учетом пульсаций тока дросселя фильтра формула для коэффициента передачи ПН в режиме ПНТ-1 принимает вид

$$K_U = \frac{U_{Cp}}{U_{Bx}} = \frac{f_k}{f_0} \frac{1}{2\pi} \left\{ \pi + \frac{\left(I_H - \frac{\Delta I_{L\phi}}{2} \right) Z_0}{U_{Bx}} + \arcsin \left[\frac{\left(I_H - \frac{\Delta I_{L\phi}}{2} \right) Z_0}{U_{Bx}} \right] + \frac{U_{Bx}}{2 \left(I_H + \frac{\Delta I_{L\phi}}{2} \right) Z_0} \left[1 + \sqrt{1 - \left[\frac{\left(I_H + \frac{\Delta I_{L\phi}}{2} \right) Z_0}{U_{Bx}} \right]^2} \right] \right\},$$

где f_k — частота коммутации, $f_0 = \omega_0/2\pi$.

На рис. 4 представлены экспериментальные (сплошные кривые) и аналитические (без учета пульсаций тока дросселя и с его учетом — штриховые и пунктирные кривые соответственно) графики, показывающие зависимость частоты преобразования f_k от изменения входного напряжения при постоянном $U_{Вых} = 24$ В, $I_H = 6,2$ А для двух рассматриваемых режимов. При построении теоретических характеристик параметр $\Delta I_{L\phi}$ был определен экспериментально для минимальной частоты преобразования, которая в данном случае соответствует максимальному входному напряжению исследуемого ПН.

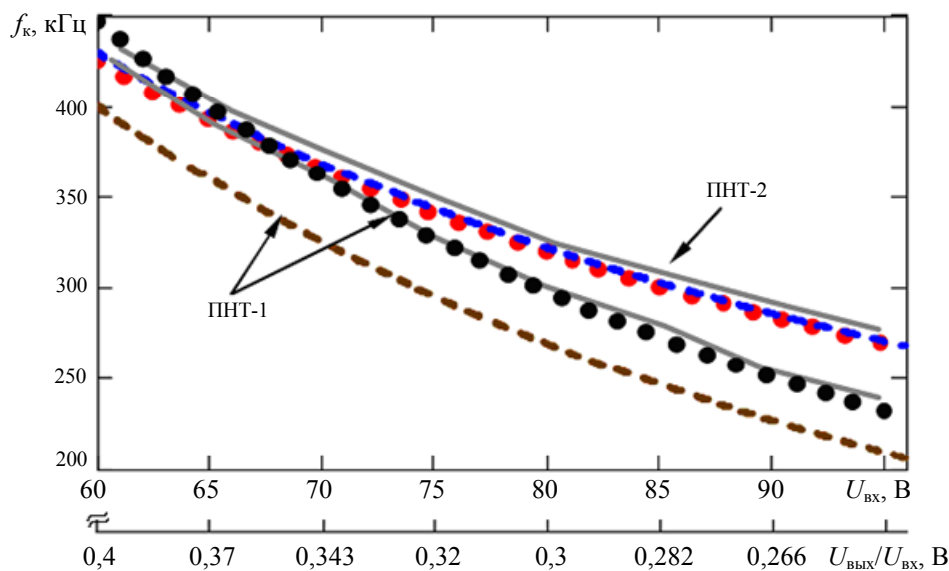


Рис. 4

Известное условие $Z_0 I_{H \max} / U_{Bx \min} < 1$ [4, 6], накладывающее ограничение на диапазон регулирования, преобразуется к виду $Z_0 (I_{H \max} - \Delta I_{L\phi}(f_k)/2) / U_{Bx \min} < 1$ как для режима ПНТ-1, так и для ПНТ-2, где размах пульсаций тока дросселя зависит от частоты преобразования.

В результате исследования установлено, что пульсации тока дросселя выходного фильтра оказывают существенное влияние на регулировочную характеристику квазирезонансного преобразователя напряжения в режиме ПНТ-1. Предложена и подтверждена экспериментально формула для коэффициента передачи ПН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукин А. В. Высоочастотные преобразователи постоянного напряжения и их классификация // Электроника: наука, технология, бизнес. 1998. № 1. С. 33—36.
2. Базилевский А. Б., Горяшин Н. Н. Исследование энергетических характеристик квазирезонансных преобразователей с целью их использования в системах электроснабжения космических аппаратов // Вестн. СибГАУ: Сб. науч. тр. 2004. Вып. 2. С. 63—69.
3. Abu-Qahouq J., Batareseh I. Unified steady-state analysis of soft-switching DC-DC converters // IEEE Trans. Power Electron. 2002. Vol. 17, N 5. P. 684—691.
4. Andreycaк W. 1 Megahertz 150 Watt resonant converter design review // Unitrode Power Supply Design Seminar Handbook SEM-600A. 1988.
5. Mammano R. Resonant mode converter topologies // Unitrode Power Supply Design Seminar SEM600. 1988. Topic 1. P. 1—12.
6. Erickson R. W. Fundamentals of Power Electronics. N. Y.: Chapman and Hall, 1997. 791 p.

Сведения об авторах

- Николай Николаевич Горяшин** — канд. техн. наук, доцент; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра автоматического управления, Красноярск; E-mail: gorkolya@mail.ru
- Михаил Васильевич Лукьяненко** — канд. техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра автоматического управления, Красноярск
- Анна Александровна Соломатова** — аспирант; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра автоматического управления, Красноярск
- Александр Юрьевич Хорошко** — аспирант; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра автоматического управления, Красноярск

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

УДК 629.783.05

А. И. ГОРНОСТАЕВ

**УНИФИКАЦИЯ ИНТЕРФЕЙСНЫХ МОДУЛЕЙ СОПРЯЖЕНИЯ
БЛОКОВ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ**

Рассматриваются проблемы унификации интерфейсных модулей сопряжения для аппаратуры бортовых комплексов управления космическими аппаратами. Представлены особенности построения интерфейсных блоков бортового комплекса с использованием интерфейсных модулей различного функционального назначения. Приведены примеры решения задач унификации модулей.

Ключевые слова: интерфейс, модуль сопряжения, бортовой комплекс управления, космический аппарат.

При разработке аппаратуры бортового комплекса управления (БКУ) современными космическими аппаратами (КА) в ОАО „Информационные спутниковые системы“ (Железногорск) широко применяется магистрально-модульный принцип, что позволяет осуществлять ее построение на базе центрального приборного модуля (ЦПМ) с использованием отдельных функциональных интерфейсных модулей сопряжения (ИМС) различного назначения. При

этом особую актуальность приобретает решение задач унификации ИМС, что позволит использовать такие модули при создании бортовой аппаратуры для различных платформ КА, сократить сроки ее разработки и повысить надежность [1].

При разработке аппаратуры БКУ задачи унификации ИМС целесообразно решать одновременно на двух уровнях:

1) разбиение аппаратуры на отдельные функциональные устройства, которые, независимо от принадлежности к конкретной платформе КА, необходимо реализовывать в виде набора унифицированных ИМС, обеспечивающих взаимодействие с ЦПМ по внутрисприборному последовательному периферийному интерфейсу (ППИ, далее I_1);

2) разбиение ИМС на отдельные функциональные узлы, которые необходимо реализовывать в виде набора унифицированных плат, обеспечивающих взаимодействие между платами по внутримодульному параллельному интерфейсу (ПИ, далее I_2).

На первом уровне не всегда удается достигнуть полной унификации ИМС вследствие частичного несоответствия выполняемых ими функций для различных платформ КА. В большинстве случаев, чтобы сохранить возможность использования ИМС в других устройствах, целесообразно ввести некоторую избыточность в модулях, учитывающую возможные существенные различия выполняемых функций. Однако для некоторых платформ КА эти различия носят существенный характер, что и обуславливает необходимость разработки модификаций ИМС.

На втором уровне унификация может быть достигнута путем выделения из набора плат ИМС базовой платы, выполняющей основные функции, и плат расширения, выполняющих дополнительные функции. Такое построение позволяет осуществлять взаимодействие базовой платы ИМС с центральным приборным модулем по интерфейсу I_1 и с платами расширения — по интерфейсу I_2 . Однако и здесь полной унификации достигнуть иногда не удается. В этом случае требуются разные варианты выполнения отдельных плат, при котором необходимо учитывать возможные различия функций ИМС, что позволит осуществлять модификацию многоплатных ИМС путем введения набора плат расширения без изменений в базовой плате.

В общем случае на втором уровне, независимо от функционального назначения ИМС, необходимо решить несколько задач унификации:

— выбор для набора плат ИМС единого унифицированного конструктивного исполнения, что позволит обеспечить преемственность решений при разработке бортовой аппаратуры для различных платформ КА;

— выделение из набора плат ИМС базовой платы, которая будет содержать окончательное устройство, обеспечивающее обмен с ЦПМ по интерфейсу I_1 и обмен с платами расширения по интерфейсу I_2 , и не будет подвергаться изменениям при модификации ИМС;

— введение в отдельные платы функциональной избыточности, учитывающей возможные отличия функций ИМС для различных платформ КА;

— определение для набора плат ИМС унифицированного способа контактного соединения, что позволит при модификации ИМС организовывать внешние, внутрисприборные и внутримодульные связи через стандартный набор кабелей без их изменения.

На обоих уровнях возможны различные варианты решения задач унификации в зависимости от функционального состава и особенностей построения конкретного типа аппаратуры БКУ. В настоящей статье представлены решения задач унификации на примере построения интерфейсных блоков БКУ и входящих в их состав ИМС.

Структура построения интерфейсных блоков БКУ определяется следующими факторами:

— внешним информационным взаимодействием с бортовым информационно-вычислительным комплексом (БИВК), которое осуществляется с ЦПМ по мультиплексному каналу обмена (МКО) в соответствии со стандартом [2];

— сопряжением с внешней бортовой аппаратурой, датчиками температуры (ДТ), электрообогревателями (ЭО) различных систем КА и исполнительными элементами агрегатов системы терморегулирования (СТР);

— наличием двух режимов работы КА (на участке выведения и в штатном режиме).

Перечисленные элементы сопряжения являются общими для всех платформ КА, отличие заключается только в их детализации.

Решение задачи унификации на первом уровне предполагает разбиение интерфейсных блоков БКУ по отношению к ЦПМ на отдельные ИМС по общему функциональному признаку независимо от детализации элементов сопряжения. В результате такого разбиения с учетом двух режимов работы КА получена обобщенная структурная схема (рис. 1), пригодная при построении интерфейсных блоков (на схеме — БИ) БКУ для различных платформ КА.

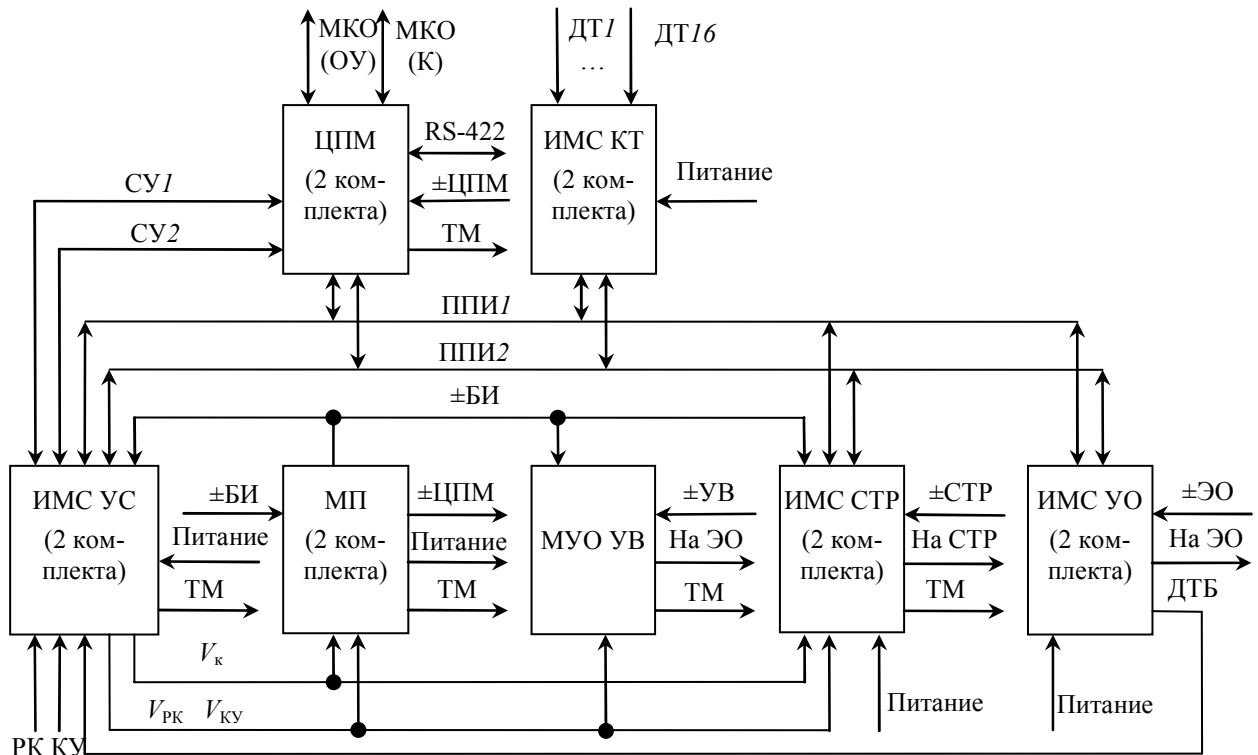


Рис. 1

В обобщенном варианте в состав схемы входят следующие ИМС, взаимодействующие с центральным приборным модулем:

— ИМС устройств согласования (ИМС УС), предназначенный для приема команд из ЦПМ по интерфейсу I_1 для формирования управляющих воздействий по цепям передачи командных сигналов V_k и приема разовых команд (РК) и команд управления (КУ) от внешней аппаратуры для формирования линейных управляющих воздействий $V_{рк}$ и $V_{ку}$ на другие модули;

— ИМС устройств контроля температур (ИМС КТ), предназначенный для контроля в циклическом режиме до 16 каналов датчиков температуры и преобразования их сигналов в цифровой код;

— ИМС систем терморегулирования (ИМС СТР), предназначенный для управления исполнительными элементами агрегатов СТР (гидронасосами, перепускными клапанами и клапан-регуляторами);

— ИМС устройств управления обогревателями (ИМС УО), предназначенный для коммутации электрообогревателей в штатном режиме работы КА.

Кроме того, в состав схемы входят не взаимодействующие с ЦПМ модуль питания (МП) и модуль управления обогревателями на участке выведения КА (МУО УВ), предназначенный для коммутации обогревателей до начала работы КА в штатном режиме.

Для обеспечения требуемой надежности интерфейсные блоки БКУ строятся с использованием двухкомплектного резервирования модулей; один из комплексов находится в холодном резерве (кроме МУО УВ, который выполняется по схеме горячего резервирования), поэтому в схеме предусмотрена возможность передачи информации по дублирующему внутриприборному периферийному интерфейсу через перекрестные связи. Для контроля работоспособности модулей в схеме предусмотрена выдача телеметрической (ТМ) информации.

Для информационного доступа БИВК к внутренним регистрам ИМС в схеме применяется дополнительный ЦПМ (с процессорным ядром). Такой ЦПМ обеспечивает выполнение ряда вычислительных функций при работе схемы в автономных режимах, благодаря чему удалось добиться упрощения и частичной унификации ИМС. ЦПМ позволяет осуществлять обмен информацией с вычислительным комплексом по дублирующему МКО в режиме оконечного устройства (ОУ) и с внешней бортовой аппаратурой в режиме контроллера; кроме того, ЦПМ осуществляет выдачу 16-битовой ТМ-информации о работе схемы в штатном режиме. Это требует создания для ЦПМ унифицированного общего программного обеспечения (ПО), на базе которого разрабатывается специальное ПО, предназначенное для реализации конкретных функций интерфейсных блоков БКУ на различных платформах КА. Для информационного доступа к программному обеспечению в ЦПМ предусмотрен интерфейс RS-422, что позволяет производить отладку специального ПО, не внося изменений в общее.

При обмене информацией все ИМС по отношению к ЦПМ также работают в режиме оконечного устройства и имеют каждый свой адрес, что дает возможность использовать во всех модулях одинаковые устройства. Между ЦПМ и ИМС устройств согласования предусмотрены дублирующие обменные сигналы управления (СУ), что позволяет реализовать унифицированную схему контроля работоспособности ЦПМ и управления режимом начального тестирования. Использование в схеме интерфейсных блоков БКУ унифицированных ИМС и входящих в их состав плат также позволяет частично унифицировать для ЦПМ и специальное ПО, что способствует сокращению времени его разработки и отладки.

Способы решения задач унификации на втором уровне в схеме интерфейсных блоков БКУ зависят от функционального назначения отдельных ИМС. Рассмотрим задачи унификации для ИМС устройств управления обогревателями. При построении различных вариантов таких многоплатных ИМС возникают специфические задачи унификации, связанные с различными значениями коммутируемых токов и напряжений обогревателей.

Анализ технических требований к цепям коммутации электрообогревателей для различных платформ КА показал, что их питание может производиться от бортовых источников напряжением 27 В при токах 0,1—5 А либо напряжением 100 В при токах 0,1—2 А. При этом число обогревателей с токами нагрузки более 1 А на различных КА не должно превышать 50 % от общего количества.

На основе проведенного анализа в ОАО „Информационные спутниковые системы“ для ИМС устройств управления обогревателями разработан на базе электронных силовых ключей на МДП-транзисторах с трансформаторной развязкой цепей управления [3] следующий набор унифицированных плат:

— базовая плата для коммутации восьми обогревателей с токами нагрузки до 3 А при напряжении 27 В;

— плата расширения для коммутации шести обогревателей с токами нагрузки до 2 А и восьми обогревателей с токами нагрузки до 1 А при напряжении 27 В;

— плата расширения для коммутации четырех обогревателей с токами нагрузки до 5 А при напряжении 27 В;

— плата расширения для коммутации восьми обогревателей с токами нагрузки до 2 А при напряжении 100 В.

Набор унифицированных плат позволяет производить простые модификации этого модуля и обеспечить снижение трудоемкости их разработки для различных платформ КА. В перспективе также можно обеспечить снижение массогабаритных характеристик модуля при разработке новых разновидностей унифицированных плат, например для коммутации шестнадцати электрообогревателей на токи нагрузки до 1 А. Модуль допускает объединение по параллельному интерфейсу до семи унифицированных плат. Обобщенный вариант конфигурации ИМС устройств управления обогревателями из приведенного набора четырех унифицированных плат показан на рис. 2.

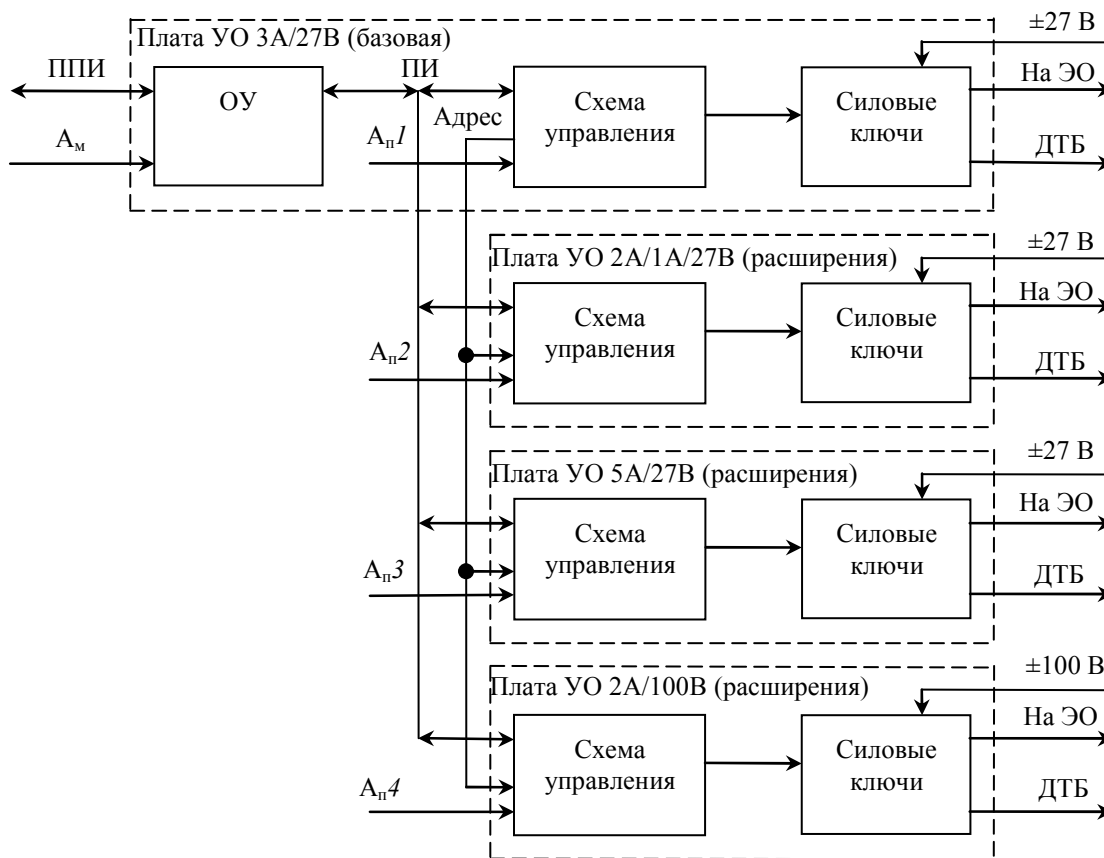


Рис. 2

Для обеспечения обмена информацией по интерфейсу I_1 (ППИ) адрес модуля задается внешними переключателями (A_m) в оконечном устройстве базовой платы. Для обеспечения обмена информацией по интерфейсу I_2 (ПИ) адрес требуемой платы задается внешними переключателями ($A_{п1}$ — $A_{п4}$) в схемах управления каждой платы. В базовой плате предусмотрено управление силовыми ключами в импульсном режиме с возможностью модуляции длительности импульса. Для телеметрического контроля значения суммарного тока, протекающего при включении силовых ключей через отдельные группы электрообогревателей, в каждой плате предусмотрены бесконтактные датчики тока (ДТБ).

В базовой плате модуля в качестве оконечного устройства для обмена информацией с ЦПМ по интерфейсу I_1 использован базовый матричный кристалл H5503MX5-171, а в качестве схемы управления — программируемая логическая интегральная схема.

Рассмотренные унифицированные ИМС нашли практическое применение в бортовой аппаратуре для КА „ГЛОНАСС-М“ и используются при разработке аппаратуры для КА „ГЛОНАСС-К“.

„Луч-5А“, „Amos-5“, „Telkom-3“ и „Ямал-300К“. Созданные унифицированные ИМС и их модификации на основе унифицированных плат могут быть использованы в новых разработках бортовой аппаратуры для КА „Экспресс-АМ5,6“ и др. Однако дальнейшие перспективы связаны с более глубоким анализом возможности унификации технических решений на уровне КА в целом, а также с разработкой дополнительного ряда унифицированных плат для обеспечения простой модификации ИМС. Это позволит улучшить основные технические характеристики ИМС, а также сократить сроки их разработки для различных платформ КА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горностаев А. И., Капустин А. Н., Зубавичус В. А., Колесников С. М. Применение магистрально-модульного принципа при построении бортовой аппаратуры бортового комплекса управления космических аппаратов // Решетневские чтения: Материалы XIII Междунар. науч. конф.; Под общ. ред. Ю. Ю. Логинова / Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2009. Ч. 1. С. 20—22.
2. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральной последовательной системы электронных модулей. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 2003.
3. Горностаев А. Разработка электронных силовых ключей на МДП-транзисторах с гальванической развязкой цепей управления // Современная электроника. 2009. № 1. С. 62—63.

Сведения об авторе

Алексей Иванович Горностаев — канд. техн. наук, доцент; ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; нач. сектора; E-mail: galiv@iss-reshetnev.ru

Рекомендована ОАО „ИСС“

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

УДК 621.318.5:681.3

И. А. АФИНОГЕНОВ, А. В. КОНЬКИН, П. Б. ЭННС, А. Н. КАПУСТИН

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ РЕЛЕ НА БАЗЕ МЭМС-ТЕХНОЛОГИИ

Рассматриваются принципы разработки слаботочных микрореле и микропереключателей для аппаратуры космического применения с использованием технологии микроэлектромеханических систем.

Ключевые слова: МЭМС-технология, микропереключатель, микрореле, оптический преобразователь, микросистемная техника.

Снижение массогабаритных, динамических и энергетических параметров коммутационных элементов бортовой аппаратуры космических аппаратов (КА) — неизменно актуальная задача. Инновационным направлением в релейной технике является разработка коммутационных элементов для перспективных КА на базе МЭМС-технологии (объединяющей технологии разработки микроэлектронных и микромеханических устройств). Для разработки компонентов МЭМС (микроэлектромеханических систем) созданы специализированные системы проектирования, с помощью которых реализуются одновременно и механическая, и электрическая части микросистемы.

Благодаря использованию кремния в технологии производства интегральных схем и миниатюрных прецизионных механических систем был разработан новый класс механических мембранных микропереключателей, реализованных на подложке из кремния. Такие электростатические микропереключатели по размерам значительно меньше традиционных

электромагнитных реле и приближаются к размерам ключей на кремниевых транзисторах [см. лит.].

Электростатические микрореле можно подразделить на несколько групп по различным признакам:

- 1) по характеру коммутируемого сигнала:
 - слаботочные;
 - высокочастотные;
 - оптические;
- 2) по виду исполнительного механизма:
 - мембранные;
 - консольные;
 - встречно-штыревые;
- 3) по принципу коммутации:
 - с резистивным контактом (металл—металл);
 - с емкостным контактом (металл—диэлектрик—металл);
 - с отражением сигнала.

Для формирования структур микрореле, в которых перемещения исполнительного механизма составляют единицы микрометров, наиболее подходящими являются мембранные и консольные актюаторы с электростатическим управлением. Такие структуры просты и могут быть выполнены сверхминиатюрными.

Микрореле с резистивным соединением консольного типа (рис. 1) служат для создания омического контакта. Такие реле могут коммутировать как постоянные токи, так и сигналы в СВЧ-диапазоне до 18 ГГц и более. Ресурс таких реле ограничен вследствие износа контактных площадок: в настоящее время при мощности передаваемого сигнала до 50 мВт удается достигнуть 1,5 млн переключений без значительного увеличения сопротивления контактов. В перспективе совершенствование контактной системы позволит достичь 1 млрд переключений.

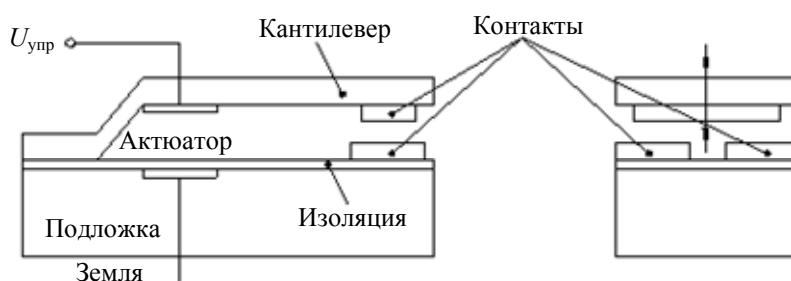


Рис. 1

В микрореле с емкостным соединением мембранного типа (рис. 2) используется эффект различия емкостей во включенном и выключенном состояниях. Применение емкостных ключей не позволяет обеспечить их функционирование на низких частотах. Преимущество таких микрореле — отсутствие омического контакта; ограничением при их использовании является усталостное разрушение мембранного исполнительного механизма.

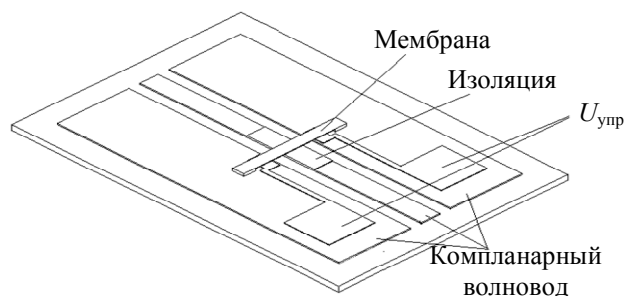


Рис. 2

В особую группу можно выделить оптические микрореле (рис. 3, а). Синергетическая комбинация МЭМС-технологий и оптоэлектроники привела к появлению класса интегрированных микросистем, которые называют микрооптоэлектромеханическими системами. Основой таких реле является подвижная зеркальная поверхность. Механическая часть

оптического переключателя формируется в объеме кремния, что позволяет создавать за одну операцию одновременно актюатор, микрзеркало и каналы для подводящего оптоволоконна (рис. 3, б) и упрощает сборку конечного изделия.

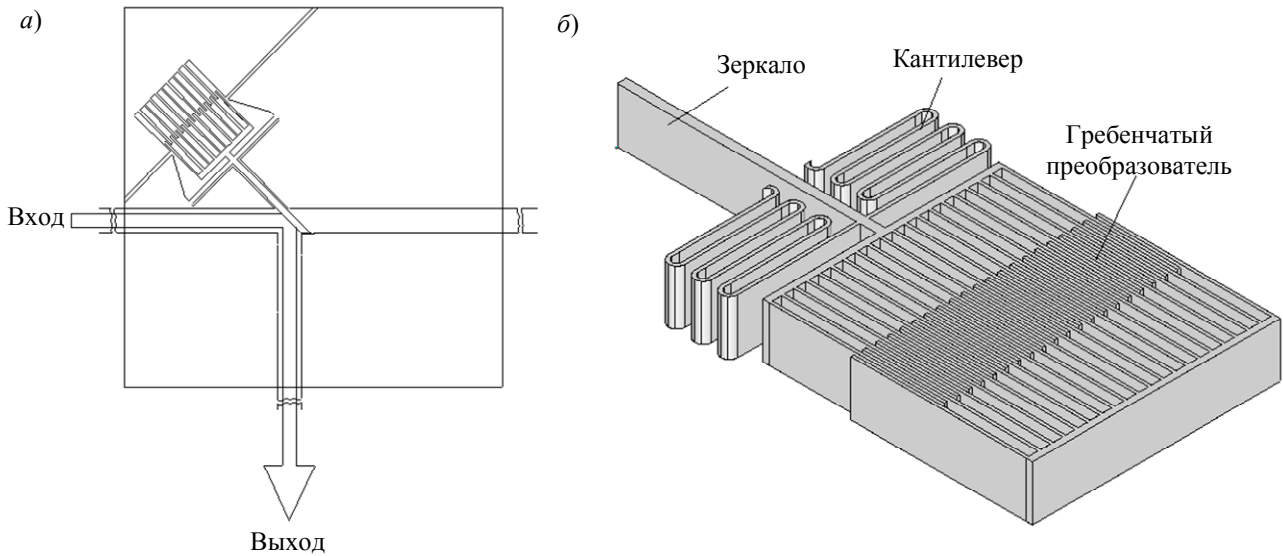


Рис. 3

В разрабатываемом оптическом переключателе применен встречно-штыревой преобразователь с диаметром оптического канала $d = 125$ мкм и линейным перемещением $\Delta x = 2\sqrt{d}$. Такие перемещения можно обеспечить за счет применения сложной схемы упругих подвесов. Для формирования такой структуры применяется глубинное анизотропное плазмохимическое травление кремния в среде элегаза (SF₆) с автопассивацией кислородом. Высокая скорость травления (1—2 мкм/мин) обеспечивается путем получения высокоплотной плазмы источником мощностью порядка 1 кВт. Для формирования зеркальной поверхности кремний после травления подвергается обработке полирующими травителями с последующим осаждением никеля. Соединение подвижной части переключателя со стеклянным основанием осуществляется методом анодной сварки. Ячейки оптических переключателей могут быть объединены в матрицы, на которых реализуются переключатели типа многие-ко-многим.

Данный вид переключателей используется при построении широкополосных оптических сетей (по одному кабелю передается несущий сигнал на различных длинах волн), что позволяет на порядки увеличить их пропускную способность.

Моделирование оптического переключателя на начальных стадиях разработки позволяет находить оптимальные варианты конструкции и избежать появления дефектов. Также моделирование может частично заменить натурные испытания. Аналитический метод используется при определении параметров простых конструкций. Более сложные конструкции, такие как меандровые участки крепления, спиралевидная или пилообразная форма подвеса, рассчитать не всегда удастся. Кроме того, возможен расчет только первой моды колебаний. Моделирование же позволяет исследовать геометрическую структуру, отличную от стандартных вариантов (балок, стержней), благодаря чему сокращается время расчета. Кроме того, при моделировании можно рассчитать колебания не только первой резонансной частоты, но и последующих. Это обусловлено тем, что для некоторых форм исполнительных механизмов необходимо знать особенности влияния резонанса на такие эффекты, как кручение.

Моделирование в программе “Ansys” позволяет определять резонансную частоту подвеса любой сложности и построить зависимости изменения резонансной частоты не только при варьировании топологии конструкции, но и при ее изменениях. По результатам моделирования выбирается оптимальный вариант конструкции исполнительного механизма, удовлетворяющий

требованиям по стойкости к воздействию внешних механических факторов, что, в свою очередь, позволяет облегчить проектирование МЭМС-устройств.

На базе программного комплекса CST STUDIO было проведено моделирование ВЧ-структур переключателя и расчет его характеристик. В основу расчета, как и при моделировании механических свойств, был положен метод конечных элементов, использование которого позволяет осуществлять расчет и сложных 3D-структур. Результаты моделирования и анализа высокочастотных характеристик 3D-структур обеспечивают 80 %-ную сходимость с экспериментальными данными.

При моделировании микрореле, выполненного на основе электростатического преобразователя, управляющие обкладки могут быть представлены в виде плоского конденсатора, в котором силы притяжения равномерно распределены по его эффективной площади. В этом случае силу $F_{ст}$, действующую на подвижную консоль (мембрану), можно рассчитать по формуле

$$F_{ст} = \frac{\epsilon_0 A U^2}{2q^2},$$

где U — напряжение, прикладываемое к обкладкам конденсатора; A — эффективная площадь конденсатора, q — зазор между его обкладками; ϵ — диэлектрическая проницаемость материала.

Условие „падения“ консоли (мембраны) под действием напряжения управления определяется как

$$F_{упр} \leq F_{ст} \text{ при } x = q_0/3,$$

где q_0 — величина первоначального зазора, x — смещение, и устанавливается на уровне, составляющем 2/3 от начального зазора, при котором система становится нестабильной, и мембрана резко падает на нижнюю пластину (согласно графику зависимости величины зазора от приложенного напряжения [см. лит.]).

На рис. 4 представлен график зависимости изменения величины зазора от приложенного напряжения для микрореле с напряжением срабатывания 100 В и напряжением отпускания на уровне 40—50 В.

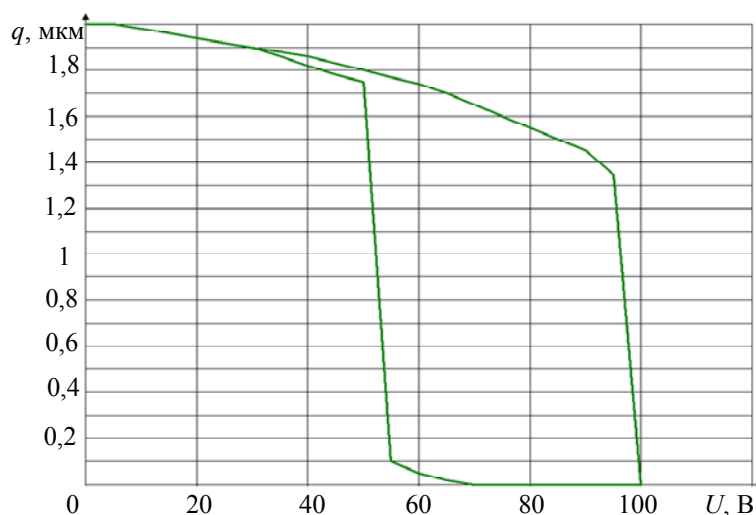


Рис. 4

Для разработанной конструкции микрореле электростатическая сила в начальный момент времени (при q_0) меньше, чем в конце переключения (при $q=0$) приблизительно в 44,5 раза.

Если необходимо снизить напряжение управления, можно использовать конструкцию микрореле, в котором диапазон перемещений механической структуры находится в зоне

стабильности: см. рис. 5, где *а* — микрореле при $q = 0,6$ мкм, разомкнуто; *б* — микрореле при $q = 0,6$ мкм, замкнуто; *в* — микрореле при $q = 1,3$ мкм, разомкнуто; *г* — микрореле при $q = 1,3$ мкм, замкнуто. При начальном зазоре в 2 мкм максимально возможное перемещение консоли (мембраны) составляет 0,5—0,7 мкм.

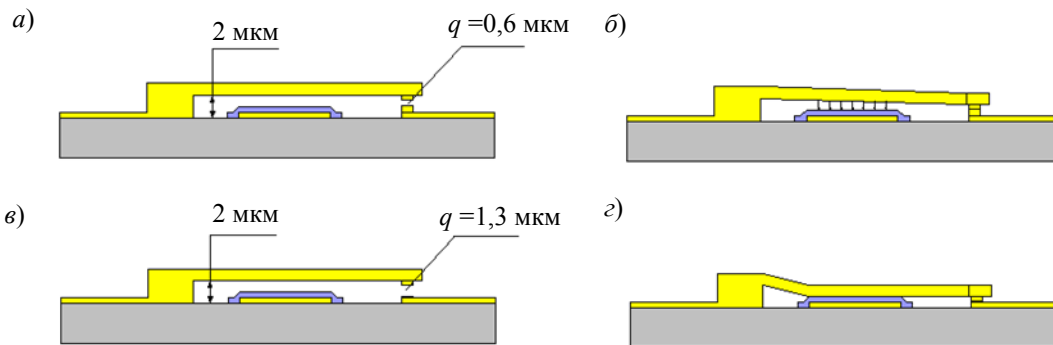


Рис. 5

Уменьшению величины зазора в слаботочных микрореле в разомкнутом режиме препятствует значение коммутируемого напряжения, так как при достаточно малых зазорах и больших напряжениях возможен пробой межконтактного пространства.

Немаловажным критерием выбора величины начального зазора в контактной системе является ударостойкость. Так, под воздействием ударов в 150g длительностью 3 мс максимальный прогиб консольной структуры микрореле составил 3,90 мкм, а мембранной механической системы — 0,37 мкм. Данные результаты показывают, что консольная структура может иметь несанкционированные срабатывания при ударных воздействиях: это не позволит избежать замыканий без изменения величины начального зазора или топологических размеров. Другая ситуация наблюдается при механической структуре, основанной на двухопорной мембране. Устойчивость к ударным воздействиям и величина прогиба свидетельствуют не только об отсутствии несанкционированных срабатываний, но и о возможности увеличения высоты нижних контактов, что позволяет формировать механическую структуру, работающую в зоне стабильности с узкой петлей гистерезиса по напряжению управления.

В ОАО „СКТБ релейной техники“ (Великий Новгород) разработано слаботочное МЭМС-реле с электростатическим принципом управления, предназначенное для коммутации токов до 50 мА и напряжения до 60 В, напряжение управления — порядка 100 В. Реле изготовлено по поверхностной технологии с применением жертвенного слоя. Подвижная структура сформирована на кремниевой подложке толщиной 450 мкм. Подложка покрыта термическим слоем SiO_2 толщиной 0,3 мкм. Консоль состоит из высокотемпературного сплава PoSi и Al . В качестве жертвенного слоя применена тонкая пленка SiO_2 . Консоль после удаления оксида кремния прогибалась, и начальный зазор в контактной системе составлял от 10 до 15 мкм. Размеры кристалла $1,5 \times 2,2 \times 0,5$ мм.

Продолжением работ по созданию слаботочных реле на основе МЭМС-технологии стала разработка серии СВЧ-микрореле. Для их изготовления также была выбрана поверхностная технология, базирующаяся на классических технологиях микроэлектроники. Так, было разработано ВЧ-реле (РНА 12), которое изготавливается на подложке из Al_2O_3 с односторонней полировкой. Термовакuumным напылением золота формируются сигнальная линия и управляющие элементы. Подвижная механическая структура, выполненная из двух слоев золота (последовательное термовакuumное и гальваническое осаждение), формирует консоль электростатического актюатора. Зазор в контактной системе обеспечивается жертвенным слоем толщиной от 3 до 5 мкм. На контактную систему химическим методом осажден тонкий слой родия, предназначенный для обеспечения износостойкости поверхностей контактов.

Реле изготавливаются в керамическом корпусе с планарными выводами (РНА 12), а также в BGA-корпусе с шариковыми выводами (РНА 11). Последнее представляет собой переключатель с двумя контактными системами. Применение дисковых с тремя опорами исполнительных механизмов позволяет реализовать высоконадежную к воздействию внешних факторов конструкцию микропереключателя. Реле могут быть выполнены и в бескорпусном варианте.

Характеристики высокочастотных МЭМС-реле представлены ниже.

Габаритные размеры (без выводов), мм:	
с планарными выводами	5,0×5,0×1,5
с шариковыми выводами	3,0×4,0×1,5
Диапазон коммутируемых частот, ГГц.....	0—6
Напряжение срабатывания, В	27—100
Затухание (контакты замкнуты), дБ, менее	1,5
Затухание (контакты разомкнуты), дБ, более	20
КСВн, менее.....	2

Для ВЧ-реле перспективным частотным диапазоном является 0—18 ГГц. В настоящее время проводятся работы по дальнейшей миниатюризации реле, что позволит изготавливать реле с улучшенными в 2—3 раза массогабаритными характеристиками и в 2 раза большим частотным диапазоном. В перспективе уменьшение топологических размеров микрореле позволит сократить время срабатывания с 50 до 5 мкс с одновременным увеличением ресурса контактной системы микрореле (10^9 — 10^{10} циклов коммутации); логичным будет снижение мощности коммутируемого сигнала до уровня 500 мВт.

ЛИТЕРАТУРА

Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.

Сведения об авторах

- Иван Анатольевич Афиногенов** — ОАО „СКТБ релейной техники“, Великий Новгород; инженер-конструктор E-mail: torrp2001@yandex.ru
- Александр Владимирович Конькин** — ОАО „СКТБ релейной техники“, Великий Новгород; инженер-конструктор
- Павел Борисович Эннс** — ОАО „СКТБ релейной техники“, Великий Новгород; инженер-технолог
- Александр Николаевич Капустин** — ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; нач. отдела; E-mail: kapustin@iss-reshetnev.ru

Рекомендована ОАО „ИСС“

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

А. А. ЛОГАНОВ, Э. М. ЯМАШЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСОВ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассматриваются вопросы моделирования характеристик центробежных насосов для различных видов теплоносителей систем терморегулирования космических аппаратов. Получена зависимость, определяющая оптимальное сочетание характерного размера отводного устройства жидкостного насоса и физических свойств теплоносителя. Предложена методика физического моделирования характеристик насосов, обеспечивающая достижение наибольшей эффективности системы терморегулирования.

Ключевые слова: центробежный насос, отводное устройство, физическое моделирование.

Введение. На современных спутниках связи устанавливаются до 50—60 транспондеров, осуществляющих трансляцию телевизионного сигнала. Увеличение суммарной выходной мощности полезной нагрузки спутников вызывает возрастание тепловых потоков до такой степени, что отработанные жидкостные системы терморегулирования (СТР) на основе изооктана становятся недостаточно эффективными. Так как значение скрытой теплоты парообразования жидкости на порядок выше теплоемкости, то для обеспечения тепловых режимов аппаратуры применяется активная двухфазная СТР. Следствием использования в такой системе фазового перехода „жидкость—пар“ является резкое сокращение расхода жидкого теплоносителя при одновременном увеличении перепада давления из-за наличия паровой фазы. При равной полезной мощности и скорости вращения центробежные насосы, обеспечивающие более высокий перепад давления, имеют большие объемные потери и потери на трение [1], поэтому КПД, максимально достижимый насосом в двухфазной СТР, получается заведомо ниже КПД насоса в жидкостной СТР.

Характерные для активной двухфазной СТР малые значения объемного расхода теплоносителя делают первоочередным требование достижения максимально возможного КПД насоса. Необходимость этого требования обусловлена более интенсивным разогревом теплоносителя двухфазной СТР за счет больших потерь мощности, чем в насосе жидкостной СТР. Например, при заданной полезной гидравлической мощности 10 Вт при КПД насоса 25 % потери мощности составляют 30 Вт, а при КПД 18 % значение потерь превышает 45 Вт. Увеличение температуры теплоносителя при его прохождении через насос двухфазной СТР более существенно и вследствие уменьшения перепада температур между охлаждаемым прибором и теплоносителем, а также вследствие снижения скрытой теплоты парообразования. Поэтому достижение максимально возможного КПД в этих условиях является основной проблемой при создании насосов для активной двухфазной СТР.

Известные методы проектирования и обработки насосов СТР не удовлетворяют в полной мере современным требованиям по энергопотреблению и ресурсу.

Применение аммиака в качестве теплоносителя двухфазной СТР ставит перед разработчиками насосных агрегатов несколько новых задач. Одна из них — обеспечение функционирования агрегата в химически активной среде. В настоящее время в насосах жидкостной активной СТР используются электродвигатели с так называемым „мокрым“ ротором, где смазывание шарикоподшипниковых опор качения осуществляется собственно теплоносителем. Другая задача, обусловленная использованием нового теплоносителя, — обеспечение максимально возможного КПД насоса с учетом того, что плотность и вязкость аммиака существенно отличаются от этих параметров традиционного теплоносителя (98%-ный изооктан). Срав-

нение характеристик насосных агрегатов, полученных при испытаниях с использованием воды и штатного (изооктан) теплоносителя, подтвердило наличие влияния физических свойств жидкости на КПД насосов.

Использование аммиака в качестве теплоносителя исключает применение в электродвигателе подшипниковых опор качения. Одним из наиболее перспективных вариантов решения представляется применение электродвигателя также с „мокрым“ ротором, но с гидродинамическими опорами. Совершенно очевидно, что создание нового электродвигателя потребует значительных временных затрат (не менее трех лет). Соответственно требование постоянного повышения конкурентоспособности предполагает необходимость сокращения общего срока разработки за счет совмещения по времени создания собственно электродвигателя и гидравлической части насоса.

Постановка задачи. Так как реализуемый в активной двухфазной СТР диапазон рабочих расходонапорных характеристик до настоящего времени плохо изучен, расчетным методам проектирования во многих случаях следует предпочесть экспериментальные исследования. Основная проблема состоит в необходимости учитывать влияние различных свойств модельного и натурного теплоносителей на характеристики насоса. Сравнение свойств аммиака и используемого в жидкостной СТР теплоносителя (изооктан) показало различие по вязкости в 2,5 раза и по плотности в 1,2 раза при нормальных условиях. Предметом исследования в настоящей статье является оценка влияния свойств теплоносителя на характеристики насосного агрегата, а также на геометрические параметры элементов конструкции при обеспечении заданных характеристик.

Для оценки влияния свойств теплоносителя на характеристики насоса были исследованы два набора экспериментальных данных. Первый набор составили результаты испытаний 12 различных вариантов насосов жидкостной СТР [2] с использованием штатного теплоносителя (изооктан), второй — 8 вариантов насосов жидкостной СТР, испытанных на воде [3], которая отличается от изооктана по плотности в 1,4 раза и практически не отличается от него по вязкости.

Результаты исследования. Определяющими конструктивными параметрами центробежного насоса являются наружный диаметр D рабочего колеса и площадь поперечного сечения „горла“ спирального сборника отводного устройства: см. рис. 1, где представлена схема поперечного сечения центробежного насоса.

Для установления зависимости между характеристиками и геометрическими параметрами конструкции насоса введен безразмерный коэффициент мощности Φ , определяемый следующим образом:

$$\Phi = \frac{N}{u^3 F_r \rho}, \quad (1)$$

где N — полезная мощность, Вт; u — линейная скорость рабочего колеса на наружном диаметре, м/с; F_r — теоретическая площадь „горла“ спирального сборника отводного устройства, м²; ρ — плотность теплоносителя, кг/м³.

Скорость рабочего колеса на наружном диаметре определяется по формуле

$$u = \omega D / 2,$$

где ω — угловая скорость рабочего колеса насоса, с⁻¹.

Для оценки характеристики энергетической эффективности обеспечения расхода теплоносителя вводится безразмерная величина ϑ :

$$\vartheta = \varphi / \Phi, \quad (2)$$

здесь φ — коэффициент расхода теплоносителя [1]:

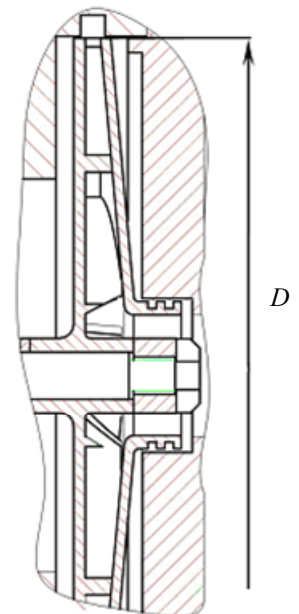


Рис. 1

$$\varphi = \frac{Q}{D^3 \omega}, \quad (3)$$

где Q — объемный расход (подача насоса), м³/с.

Значение N в формуле (1) определяется как $N = QH\rho$, где H — напор насоса, Дж/кг.

Физический смысл величины ϑ — приведенный расход на единицу приведенной мощности. Так как в ходе исследований выполнялось сопоставление насосов с различными расчетными режимами работы, то сравнение их характеристик проводилось согласно зависимости $\vartheta = \vartheta(n_s)$, где n_s — безразмерный коэффициент быстроходности насоса [1]:

$$n_s = 193,3 \frac{\omega \sqrt{Q}}{H^{0,75}}.$$

Коэффициент быстроходности насоса n_s вычисляется для расчетного режима работы и представляет собой удельный показатель, определяющий геометрическую форму рабочих органов насоса. Коэффициент быстроходности определяет частоту вращения геометрически подобного насоса, имеющего такой размер, что при напоре 9,82 Дж/кг обеспечивается объемный расход 0,075 м³/с. Соотношения геометрических параметров однотипных насосов различного размера, но идентичной быстроходности, примерно одинаковы.

Способ задания величины ϑ был выбран таким образом, чтобы гарантированно получить монотонную зависимость от n_s для любого теплоносителя, так как при увеличении коэффициента быстроходности n_s объемный расход, приведенный к единице мощности, монотонно возрастает.

В результате подстановки последовательно формулы (1) в выражение (2) и (3) в (2) получим

$$\vartheta = \frac{\omega^2 F_r}{H}. \quad (4)$$

Графики зависимости (4) для 1-го и 2-го наборов данных приведены на рис. 2.

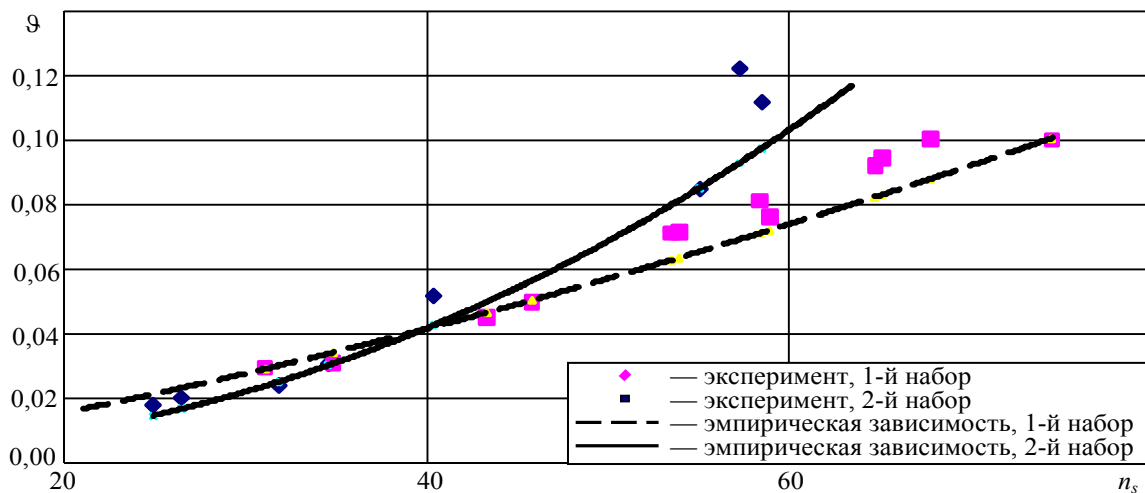


Рис. 2

Представленные на рис. 2 зависимости получены методом наименьших квадратов для насосов с наиболее высоким КПД для каждого набора данных. Из графиков следует, что характерные размеры отводного устройства, обеспечивающие наиболее высокий КПД, для насосов, использующих воду и изооктан, заметно отличаются. Так как по кинематической вязкости вода и изооктан отличаются несущественно, а по плотности — в 1,4 раза, можно сделать вывод, что определяющее влияние на характеристики отводного устройства оказывает плотность жидкости.

Для проверки влияния наружного диаметра рабочего колеса на характеристики насоса при различных свойствах теплоносителя использована зависимость, приведенная в работе [1]:

$$\lambda = \frac{D^4 \sqrt{H}}{\sqrt{Q}}.$$

Величина λ представляет собой безразмерный коэффициент наружного диаметра рабочего колеса насоса, определяемый значением его коэффициента быстроходности. Сравнение зависимостей $\lambda = \lambda(n_s)$, полученных для насосов с наиболее высоким КПД, показало отсутствие влияния свойств теплоносителя на характеристики насоса (рис. 3).

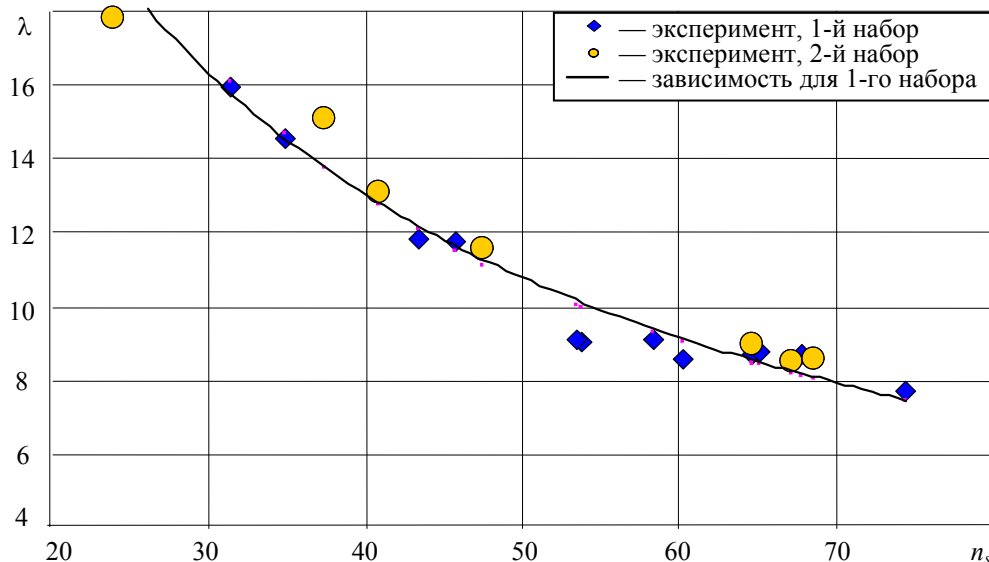


Рис. 3

Анализ результатов. В соответствии с зависимостью (4) и графиками, представленными на рис. 2, можно сделать вывод, что моделирование характеристик насоса при плотности теплоносителя $\rho = 605 \text{ кг/м}^3$ (плотность аммиака) возможно. Для этого следует оценить несколько экспериментальных значений рабочей расходонапорной характеристики в окрестности расчетной точки для выбранного теплоносителя, проведя испытания с комплектом сменных спиральных отводных устройств (4—5 вариантов). Испытания необходимо повторить при различных значениях плотности теплоносителя (в диапазоне 580—800 кг/м^3), изменяя его температуру.

Полученные теоретически и экспериментально подтвержденные результаты обеспечивают точную оценку наиболее эффективного значения характерного размера отводного устройства насосного агрегата для широкого диапазона физических свойств применяемых теплоносителей.

Одновременная разработка гидравлической части и специального электродвигателя сокращает общий фактический срок создания электронасосного агрегата с принципиально новыми возможностями.

На основе полученных результатов можно утверждать, что зависимость (4) представляет собой критерий, определяющий оптимальный для данной жидкости и заданных рабочих характеристик размер отводного устройства насосного агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривченко Г. И. Насосы и гидротурбины. М.: Энергия, 1970. 448 с.
2. Логанов А. А. Выбор критериев для оценки оптимальности конструктивных элементов электронасосного агрегата системы терморегулирования по результатам испытаний // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. III Сибир. аэрокосм. салона. Красноярск: СибГАУ, 2004. С. 84—89.

3. Логанов А. А., Соколов М. И. Оценка резервов повышения эффективности конструкций агрегатов терморегулирования модуля служебных систем космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 10. С. 41—44.

Сведения об авторах

- Александр Анатольевич Логанов** — канд. техн. наук; ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; E-mail: loganov@iss-reshetnev.ru
- Эдуард Магазович Ямашев** — канд. техн. наук; ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; E-mail: yamashev@iss-reshetnev.ru

Рекомендована ОАО „ИСС“

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

УДК 681.333

Е. А. МИЗРАХ, А. С. СИДОРОВ

**ОБ АБСОЛЮТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССОВ
В ИМИТАТОРАХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ**

Рассмотрены условия абсолютной устойчивости процессов в имитаторах солнечных батарей. Показано, что абсолютная устойчивость процессов определяется соотношением адмитанса имитатора и адмитанса нагрузки.

Ключевые слова: имитатор солнечной батареи, абсолютная устойчивость процессов, нелинейные системы, адмитанс имитатора.

Имитаторы солнечных батарей (ИСБ) получили широкое распространение при наземных экспериментальной отработке и испытаниях энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов (КА). Имитаторы СБ с формированием вольт-амперных характеристик (ВАХ) по цепи обратной связи [1, 2] представляют собой сложные многоконтурные нелинейные динамические системы и характеризуются следующими особенностями, существенно влияющими на устойчивость процессов в имитаторах:

— внешняя характеристика ИСБ является нелинейной функцией, имитирующей ВАХ солнечной батареи;

— внешняя характеристика ИСБ искажается при имитации изменений освещенности, температуры и других факторов околоспутниковой среды, являющихся функциями времени, что требует анализа работы имитатора СБ как нестационарной нелинейной системы.

Вопросы обеспечения устойчивости работы ИСБ при широкодиапазонном регулировании ВАХ и нагрузки изучены недостаточно. Цель настоящей статьи — решение задачи абсолютной устойчивости процессов в имитаторах СБ как частного случая нестационарных нелинейных систем.

Для анализа абсолютной устойчивости процессов в имитаторах СБ, имеющих нелинейные нестационарные ВАХ $I_{ИСБ}(U, t)$, предложено применить критерий абсолютной устойчивости процессов в нелинейных САУ, разработанный Наумовым и Цыпкиным [3].

В работе [1] показано, что ИСБ наиболее рационально выполнять в виде стабилизатора тока с функциональной обратной связью по напряжению. Данную структуру можно разделить на две группы: ИСБ последовательного типа (рис. 1, а), ИСБ параллельного типа (рис. 1, б) [4].

ИСБ последовательного типа содержит стабилизатор тока, в котором источник питания (ИП), усилитель мощности (УМ) и нагрузка (Н) включены последовательно, а ИСБ парал-

лельного типа содержит стабилизатор тока, в котором ИП, УМ и Н включены параллельно. Стабилизаторы тока состоят из ИП, УМ, измерителя тока (ИТ) и усилителя-сумматора (УС). Источником питания ИСБ последовательного типа является источник напряжения, а ИСБ параллельного типа — источник тока. Усилитель мощности осуществляет регулирование тока нагрузки. Устройство функциональной обратной связи (УФОС) воспроизводит ВАХ (статическую характеристику) солнечной батареи $I_{СБ}(U_H)$ и описывается выражением $U_{эТ}(U_H) = K_{ИТ} I_{СБ}(U_H)$, где коэффициент передачи измерителя тока $K_{ИТ}$ — масштабный коэффициент. Усилитель-сумматор осуществляет сравнение эталонного напряжения $U_{эТ}$ и напряжения $U_{ИТ}$, а также обеспечивает требуемый коэффициент передачи в контуре стабилизации тока.

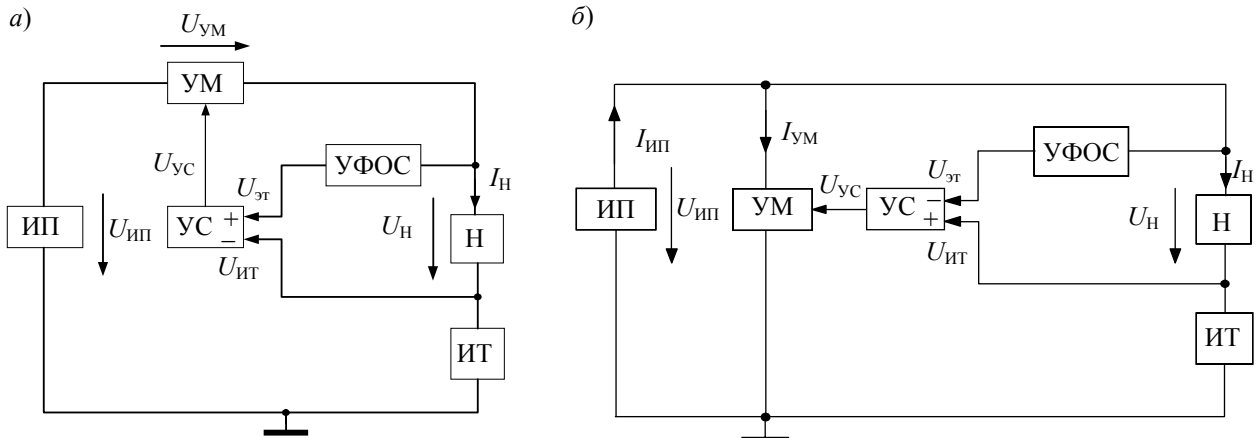


Рис. 1

В работе [5] показано, что малосигнальную модель УФОС можно представить в виде произведения дифференциального коэффициента передачи $K_{ФОС}(U_{H0}) = \partial U_{эТ} / \partial U_H |_{U_H=U_{H0}} = K_{ИТ} \partial I_{ИСБ} / \partial U_H |_{U_H=U_{H0}}$, зависящего от точки линеаризации U_{H0} на ВАХ ИСБ, и передаточной функции $W_{ФОС}(s)$ с единичным коэффициентом передачи, постоянные времени которой не зависят от точки на ВАХ.

Согласно рис. 1, а система уравнений для приращений переменных имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{ИП} &= \Delta U_H + \Delta U_{ИТ} + \Delta U_{УМ} + \Delta U_{Z_{ИП}}; \\ \Delta U_{эТ} &= -K_{ФОС}(U_{H0}) W_{ФОС}(s) \Delta U_H; \\ \Delta U_{УС} &= W_{УС}(s) (\Delta U_{эТ} - \Delta U_{ИТ}); \\ \Delta I_H &= W_{УМ}(s) \Delta U_{УС} + Y_{УМ}(s) \Delta U_{УМ}; \\ \Delta U_{Z_{ИП}} &= Z_{ИП}(s) \Delta I_H; \\ \Delta U_{ИТ} &= K_{ИТ} \Delta I_H; \\ \Delta U_H &= Z_H(s) \Delta I_H, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $W_{УС}(s)$ — передаточная функция усилителя-сумматора; $W_{УМ}(s)$ — передаточная функция усилителя мощности по управлению; $Z_H(s)$ — импеданс нагрузки; $Y_{УМ}(s)$ — полная выходная проводимость (адмитанс) усилителя мощности, $Z_{ИП}(s)$ — импеданс источника питания.

Системе (1) соответствует функциональная схема ИСБ (рис. 2), в передаточной функции которого, согласно критерию Наумова — Цыпкина, необходимо выделить линейную часть (ЛЧ). Передаточная функция ЛЧ имеет вид

$$W_{посл}(s) = \frac{\Delta U_{ФОС}(s)}{\Delta U_{эТ}(s)} = \frac{W_{ФОС}(s) W_{УС}(s) W_{УМ}(s) Z_H(s)}{1 + W_{УС}(s) W_{УМ}(s) K_{ИТ} + Y_{УМ}(s) (K_{ИТ} + Z_{ИП}(s)) + Z_H(s) Y_{УМ}(s)}. \quad (1)$$

В соответствии с критерием Наумова — Цыпкина для абсолютной устойчивости процессов в ИСБ последовательного типа достаточно, чтобы линейная часть системы была устойчива, а частотная характеристика ЛЧ $W_{\text{посл}}(j\omega)$ удовлетворяла для всех частот $\omega \geq 0$ условию

$$\operatorname{Re}(W_{\text{посл}}(j\omega)) + \frac{1}{K_{\text{ФОС max}}} \geq 0$$

или

$$\operatorname{Re}(K_{\text{ФОС max}} W_{\text{посл}}(j\omega)) \geq -1, \quad (2)$$

где $K_{\text{ФОС max}}$ — максимальное значение дифференциального коэффициента передачи устройства ФОС.

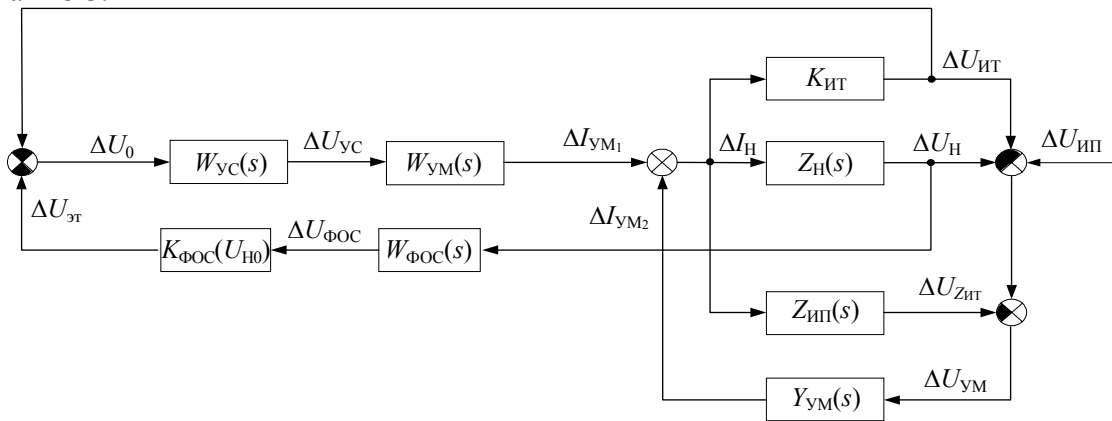


Рис. 2

При воспроизведении конкретной ВАХ коэффициент $K_{\text{ФОС}}$ достигает максимума в режиме холостого хода [5], т.е.

$$K_{\text{ФОС max}} = K_{\text{ФОС}}(U_{\text{х.х}}). \quad (3)$$

При имитации изменений освещенности, температуры и т.п. величина $K_{\text{ФОС max}}$ может изменяться и достигать наибольшего значения для ВАХ с параметрами $I_{\text{к.з max}}$ и $U_{\text{х.х min}}$.

Динамические свойства имитаторов СБ принято характеризовать полным выходным сопротивлением (проводимостью), т.е. импедансом или адмитансом, которые, естественно, должны воспроизводить полное внутреннее сопротивление СБ. Между адмитансом имитатора и условием абсолютной устойчивости процессов существует связь.

Исключив из функциональной схемы (см. рис. 2) звено $Z_{\text{H}}(s)$, получим, что адмитанс ИСБ последовательного типа определяется выражением

$$Y_{\text{посл}}(s, U_{\text{H}}) = \frac{\Delta I_{\text{H}}(s)}{\Delta U_{\text{H}}(s)} = \frac{Y_{\text{УМ}}(s) + K_{\text{ФОС}}(U_{\text{H}})W_{\text{ФОС}}(s)W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + Y_{\text{УМ}}(s)(K_{\text{ИТ}} + Z_{\text{ИП}}(s))}. \quad (4)$$

Разделив в уравнении (4) почленно числитель на знаменатель, представим адмитанс ИСБ последовательного типа в виде суммы двух слагаемых:

$$Y_{\text{посл}}(s, U_{\text{H}}) = Y_{\text{СТ}}(s) + Y_{\text{ФОС}}(s, U_{\text{H}}), \quad (5)$$

где $Y_{\text{СТ}}(s)$ — адмитанс стабилизатора тока:

$$Y_{\text{СТ}}(s) = \frac{Y_{\text{УМ}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + Y_{\text{УМ}}(s)(K_{\text{ИТ}} + Z_{\text{ИП}}(s))}, \quad (6)$$

$Y_{\text{ФОС}}(s, U_{\text{H}})$ — адмитанс, вносимый устройством ФОС:

$$Y_{\text{ФОС}}(s, U_{\text{H}}) = \frac{K_{\text{ФОС}}(U_{\text{H}})W_{\text{ФОС}}(s)W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + Y_{\text{УМ}}(s)(K_{\text{ИТ}} + Z_{\text{ИП}}(s))}. \quad (7)$$

Введем понятие нормированной передаточной функции:

$$W_{н.посл}(s) = K_{ФОС \max} W_{посл}(s) = \frac{W_{УС}(s)W_{УМ}(s)Z_H(s)W_{ФОС}(s)K_{ФОС}(U_{х.х})}{1 + W_{УС}(s)W_{УМ}(s)K_{ИТ} + Y_{УМ}(s)(K_{ИТ} + Z_{ИП}(s)) + Z_H(s)Y_{УМ}(s)}, \quad (8)$$

при этом условие абсолютной устойчивости процессов принимает вид

$$\operatorname{Re}(W_{н.посл}(j\omega)) \geq -1. \quad (9)$$

Выделяя из знаменателя уравнения (8) выражение $1 + W_{УС}(s)W_{УМ}(s)K_{ИТ} + Y_{УМ}(s)(K_{ИТ} + Z_{ИП}(s))$ и учитывая формулы (6), (7), получаем для режима холостого хода связь нормированной передаточной функции с адмитансными характеристиками подсистем имитатора СБ и нагрузки:

$$W_{н.посл}(s) = \frac{Y_{ФОС}(s, U_{х.х})}{Y_{ст}(s) + Y_H(s)}. \quad (10)$$

Подставляя уравнение (10) в (9), получаем

$$\operatorname{Re}\left(\frac{Y_{ФОС}(j\omega, U_{х.х})}{Y_{ст}(j\omega) + Y_H(j\omega)}\right) \geq -1. \quad (11)$$

Условие (11) показывает, что абсолютная устойчивость процессов в системе ИСБ—Н зависит от соотношения адмитанса имитатора и адмитанса нагрузки.

Рассмотрим абсолютную устойчивость процессов в ИСБ параллельного типа. Согласно рис. 1, б система уравнений в этом случае имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_{ИП} &= Y_{ИП}(s)\Delta U_{УМ} + \Delta I_{УМ} + \Delta I_H; \\ \Delta U_{эт} &= -K_{ФОС}(U_{Н0})W_{ФОС}(s)\Delta U_H; \\ \Delta U_{УС} &= W_{УС}(s)(\Delta U_{ИТ} - \Delta U_{эт}); \\ \Delta I_{УМ} &= W_{УМ}(s)\Delta U_{УС} + Y_{УМ}(s)\Delta U_{УМ}; \\ \Delta U_{УМ} &= \Delta U_H + \Delta U_{ИТ}; \\ \Delta U_{ИТ} &= K_{ИТ}\Delta I_H, \\ \Delta U_H &= Z_H(s)\Delta I_H. \end{aligned} \right\}$$

Этой системе соответствует функциональная схема, представленная на рис. 3.

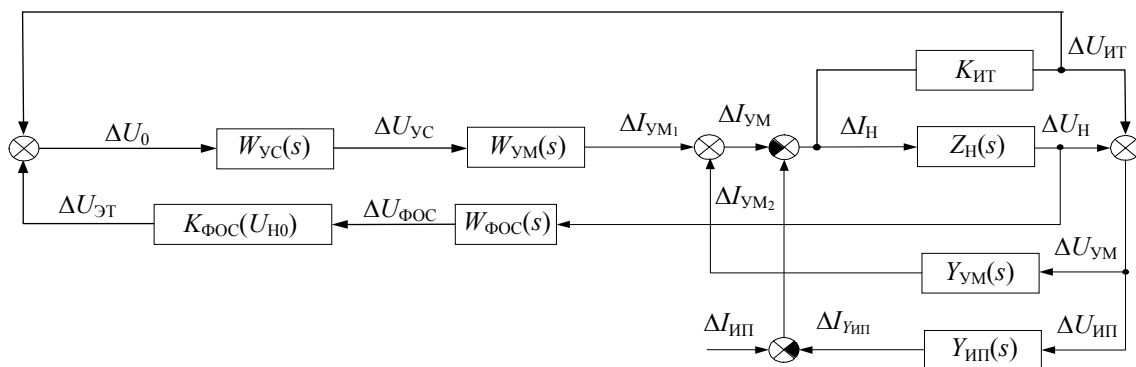


Рис. 3

Проведя аналогичные приведенным выше рассуждения для ИСБ параллельного типа, получим, что передаточная функция ЛЧ определяется как

$$W_{пар}(s) = \frac{W_{ФОС}(s)W_{УС}(s)W_{УМ}(s)Z_H(s)}{1 + W_{УС}(s)W_{УМ}(s)K_{ИТ} + K_{ИТ}(Y_{УМ}(s) + Y_{ИП}(s)) + Z_H(s)(Y_{УМ}(s) + Y_{ИП}(s))}. \quad (12)$$

Адмитанс ИСБ параллельного типа имеет следующий вид:

$$Y_{\text{пар}}(s, U_H) = \frac{\Delta I_H(s)}{\Delta U_H(s)} = \frac{Y_{\text{УМ}}(s) + K_{\text{ФОС}}(U_H)W_{\text{ФОС}}(s)W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + K_{\text{ИТ}}(Y_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s))}. \quad (13)$$

Разделив почленно в уравнении (13) числитель на знаменатель, представим адмитанс ИСБ параллельного типа в виде суммы трех слагаемых:

$$Y_{\text{пар}}(s, U_H) = Y_{\text{ст}}(s) + Y_{\text{ФОС}}(s, U_H) + Y_{\text{пр}}(s), \quad (14)$$

где

$$Y_{\text{ст}}(s) = \frac{Y_{\text{УМ}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + K_{\text{ИТ}}(Y_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s))},$$

$$Y_{\text{ФОС}}(s, U_H) = \frac{K_{\text{ФОС}}(U_H)W_{\text{ФОС}}(s)W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + K_{\text{ИТ}}(Y_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s))},$$

а $Y_{\text{пр}}(s)$ — адмитанс источника питания, приведенный к выходу ИСБ:

$$Y_{\text{пр}}(s) = \frac{Y_{\text{ИП}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + K_{\text{ИТ}}(Y_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s))}.$$

Нормированная передаточная функция для ИСБ параллельного типа имеет следующий вид:

$$W_{\text{н.пар}}(s) = K_{\text{ФОС max}} W_{\text{пар}}(s) = \frac{Y_{\text{ФОС}}(s, U_{\text{x.x}})}{Y_{\text{ст}}(s) + Y_{\text{пр}}(s) + Y_H(s)}. \quad (15)$$

Подставляя уравнение (15) в (9), получаем

$$\text{Re} \left(\frac{Y_{\text{ФОС}}(j\omega, U_{\text{x.x}})}{Y_{\text{ст}}(j\omega) + Y_{\text{ИП}}(j\omega) + Y_H(j\omega)} \right) \geq -1. \quad (16)$$

Условие (16) аналогично условию (11), т.е. независимо от структуры ИСБ абсолютная устойчивость в системе ИСБ—Н определяется соотношением адмитанса имитатора и адмитанса нагрузки.

Для сравнения запишем условие абсолютной устойчивости процессов в системе солнечная батарея—нагрузка:

$$\text{Re} \left(\frac{Y_{\text{д}}(U_{\text{x.x}})}{Y_C(j\omega) + Y_H(j\omega)} \right) \geq -1, \quad (17)$$

где приняты следующие параметры СБ [6]: $Y_{\text{д}}(U) = \partial I_{\text{СБ}}(U) / \partial U$ — дифференциальная проводимость, $Y_C(s) = C_{\text{СБ}}s$ — емкостная проводимость, $C_{\text{СБ}}$ — емкость СБ.

Сравнивая уравнения (11) и (17), получаем условия соответствия адмитансов ИСБ последовательного типа и СБ:

$$\left. \begin{aligned} Y_{\text{ФОС}}(j\omega, U_{\text{x.x}}) &= Y_{\text{д}}(U_{\text{x.x}}), \\ Y_{\text{ст}}(j\omega) &= Y_C(j\omega). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Сравнивая уравнения (16) и (17), получаем условия соответствия адмитансов ИСБ параллельного типа и СБ:

$$\left. \begin{aligned} Y_{\text{ФОС}}(j\omega, U_{\text{x.x}}) &= Y_{\text{д}}(U_{\text{x.x}}), \\ Y_{\text{ст}}(j\omega) + Y_{\text{ИП}}(j\omega) &= Y_C(j\omega). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Полученные условия (18) и (19) позволяют сформулировать требования к адмитансам подсистем имитаторов солнечных батарей исходя из условий эквивалентности абсолютной устойчивости процессов в системах ИСБ—Н и СБ—Н.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мизрах Е. А. О выборе структуры имитатора первичного источника электроэнергии космического аппарата // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнёва / Под ред. Г. П. Белякова. Красноярск, 2002. Вып. 3.
2. Lloyd S. H., Smith G. A., Infield D. G. Design and construction of a modular electronic photovoltaic simulator // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Power Electronics and Variable Speed Drives, London, UK, Sept. 2000. P. 120—123.
3. Наумов Б. Н. Теория нелинейных автоматических систем. Частотные методы. М.: Наука, 1972. 544 с.
4. Мизрах Е. А., Сидоров А. С. Исследование имитатора солнечных батарей с параллельным непрерывным усилителем мощности // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнёва / Под ред. Г. П. Белякова. Красноярск, 2007. Вып. 4(17). С. 4—8.
5. Мизрах Е. А., Петунин В. М., Сидоров А. С. Проектирование быстродействующего устройства функциональной обратной связи для имитаторов солнечных батарей // Там же. 2010. Прил. к вып. 31.
6. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.

*Сведения об авторах***Енис Аврумович Мизрах**

— канд. техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра систем автоматического управления, Красноярск; E-mail: enis-home@mail.ru

Александр Сергеевич Сидоров

— Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра систем автоматического управления, Красноярск; ст. преподаватель; E-mail: aladdin_sane@mail.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

УДК 616-073.75 + 621.791.92

А. Н. КАШУБСКИЙ, Г. Г. КРУШЕНКО

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАРОК СПЛАВОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Представлена комплексная методика идентификации марок сплавов при входном и пооперационном контроле металлоизделий, используемых в составе высокоэнергетических силовых установок. Основу разработанной методики составляют три метода неразрушающего контроля: с помощью определения термоЭДС, вихретоковый и магнитный методы.

Ключевые слова: идентификация, сплавы, дефекты, неразрушающие методы контроля, рентгенография.

При создании сложных и наукоемких изделий, широко используемых в ракетно-космической технике, особо важное значение имеют процессы испытания и контроля, цель которых — обеспечение гарантийной надежности летательных аппаратов (ЛА) [1].

При производстве деталей, используемых в силовых агрегатах ЛА, применяется широкий диапазон сплавов, что требует проведения входного и пооперационного контроля поставляемой на предприятие металлопродукции на предмет ее соответствия технической документации.

Надежным методом идентификации сплавов мог бы стать химический анализ, однако если его проведение допустимо на исходной металлопродукции в виде заготовок, то контроль готовых изделий таким методом не представляется возможным вследствие нарушения их целостности. В связи с этим для идентификации марок сплавов применяются экспресс-методы

неразрушающего контроля. В настоящее время насчитываются десятки таких методов, однако предпочтение отдается тем из них, которые выполняются с помощью малогабаритных приборов.

В настоящей статье представлены результаты выполненных в производственных условиях исследований по разработке комплексной методики идентификации марок сплавов, а также по выявлению дефектов в литых деталях с помощью рентгенографии.

Для достижения поставленной цели были предприняты следующие действия:

— произведена классификация сплавов, обладающих близкими физическими характеристиками;

— проанализированы и усовершенствованы применительно к конкретному производству существующие методики проведения неразрушающего контроля, используемые для идентификации марок сталей и сплавов, их физико-механических свойств и структур;

— усовершенствована система контроля качества термической обработки деталей и сборочных единиц с учетом их физико-механических характеристик.

В результате были выбраны три метода неразрушающего контроля: с помощью определения термоЭДС, вихретоковый метод и магнитный. Однако их раздельное применение не во всех случаях обеспечивает точную идентификацию марок сплавов, в связи с чем была разработана комплексная методика, позволяющая идентифицировать марки, структуры и физико-механические свойства сталей и сплавов, используемых в силовых агрегатах. Кроме того, разработана методика выборочного неразрушающего входного контроля поступающей на предприятие металлопродукции, а также пооперационного контроля изделий.

Удельная электропроводность немагнитных сплавов определялась вихретоковым методом: нержавеющей сталей и никелевых сплавов — с помощью прибора ВЭ-37НЦ, а алюминиевых сплавов и латуни — с помощью прибора ВЭ17-НЦ. Коэрцитивная сила на магнитных сталях измерялась с помощью структуроскопа МФ-32КЦ путем намагничивания и размагничивания локального участка металла. ТермоЭДС определялась с помощью приборов ТЭП-10К и ПКММ-2 с использованием медных, никелевых, кадмиевых и алюминиевых наконечников.

Установлено, что в результате измерения термоЭДС, электропроводности и тока размагничивания представляется возможным определить принадлежность марки стали внутри групп 20Х13Ш6 40Х13, 30ХН2МФА6 40Х, 38ХА6 95Х18, 03Х11Н10М2Т, 12Х18Н9Т, 60С2А, 10Х12Н20Т2-ВД, 08Х18Н10ТМ, 25Х17Н2Б, 07Х16Н6 и 12Х21Н5Т.

Было проведено сравнение деталей из сталей 12Х18Н10Т-ВД и 10Х12Н20Т2, термообработанных путем измерения термоЭДС. Результаты термообработки деталей из стали 10Х12Н20Т2 (закалка при 1000 ± 10 °С, охлаждение водой, старение при 730 ± 10 °С, выдержка от 15 до 16 ч, охлаждение воздухом) позволяют сделать вывод о возможности различать марки деталей, изготовленных из указанных сталей.

Определение коэрцитивной силы H_c (пропорциональной току размагничивания) и термоЭДС E для термообработанных сталей производилось с целью оценить возможность идентификации структуры термообработанной стали мартенситного класса. При этом был произведен перегрев образцов выше температуры аустенитного превращения. При температуре, превышающей 1200 °С, происходит стабилизация аустенита, рост размера зерна и растворение избыточных карбидов Сг. При токе размагничивания 50 мА и более возможна идентификация режима термообработки стали 95Х18.

Равнораспределенные значения термоЭДС не позволяют идентифицировать процесс стабилизации аустенитной фазы для стали 95Х18, разброс значений при этом составляет от 0,44 до 2,06 мВ. Чувствительность метода определения термоЭДС недостаточна для идентификации фазового состава указанного материала.

Для интегральной оценки свойств металла в локальном объеме была установлена взаимосвязь между механическими свойствами металла, его структурой и результатами, получен-

ными при неразрушающем контроле каким-либо из методов. Детали, изготовленные из стали 95X18, были подвергнуты термообработке в следующем режиме: нагрев до 1050 ± 20 °С с последующей закалкой в масле → криогенная обработка (от -80 до -60 °С) в смеси ацетон/спирт + жидкий азот → отпуск детали. Оказалось, что структура, а следовательно, и связанные с ней механические свойства, в значительной степени определяются температурой отпуска детали.

Полученные результаты для стали 95X18 (рис. 1) показывают, что с повышением температуры отпуска (T) от 150 до 550 °С значение H_c несколько уменьшается, а в интервале от 550 до 600 °С происходит его резкое снижение. Характер изменения твердости HRC совпадает с изменением H_c , что свидетельствует о корреляции этих параметров в исследуемом температурном диапазоне. Снижение твердости является следствием превращения мартенситной структуры стали 95X18 в перлитно-карбидную. Значение временного сопротивления разрушению σ , связанного (согласно ОСТ 92-1311-77) с изменением твердости, может быть также определено с помощью измерения H_c .

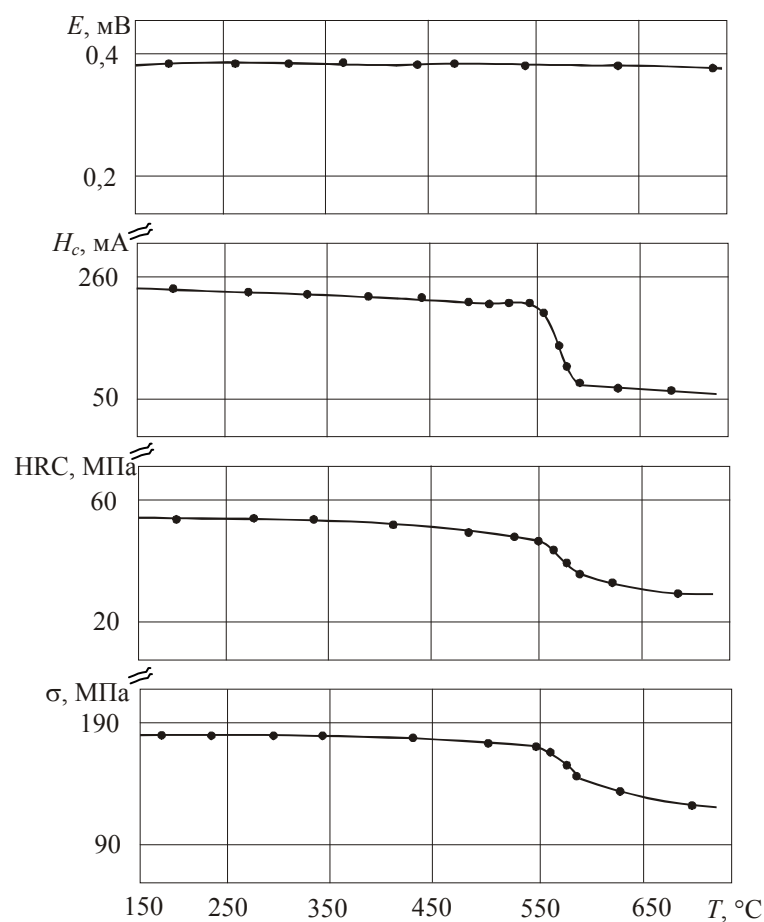


Рис. 1

В результате исследований было установлено, что метод контроля с помощью определения термоЭДС обладает наибольшей чувствительностью к химическому составу материала и практически не имеет ограничений, связанных с геометрическими размерами деталей. Метод определения удельной электропроводности сплавов применяется при контроле немагнитных материалов, а метод измерения коэрцитивной силы — при контроле магнитных сталей; при определении химического состава стали эти методы используются как дополнительные.

Разработанная на основе полученных данных комплексная методика (рис. 2) рекомендуется для идентификации марок сталей аустенитного, ферритного, аустенитно-мартенситного и мартенситного классов при входном и пооперационном контроле изделий.

Качество деталей зависит не только от того, как соблюдаются требования к химическому составу сплава [2], но и от наличия в них внутренних дефектов, что особенно важно для литых корпусных деталей, представляющих собой достаточно массивные изделия. В процессе затвердевания металла в их объеме возможно образование различного рода дефектов (включений, раковин газового и усадочного происхождения, трещин и др), которые в случае их невыявления могут привести к возникновению аварийной ситуации даже при кратковременной эксплуатации силовой установки.

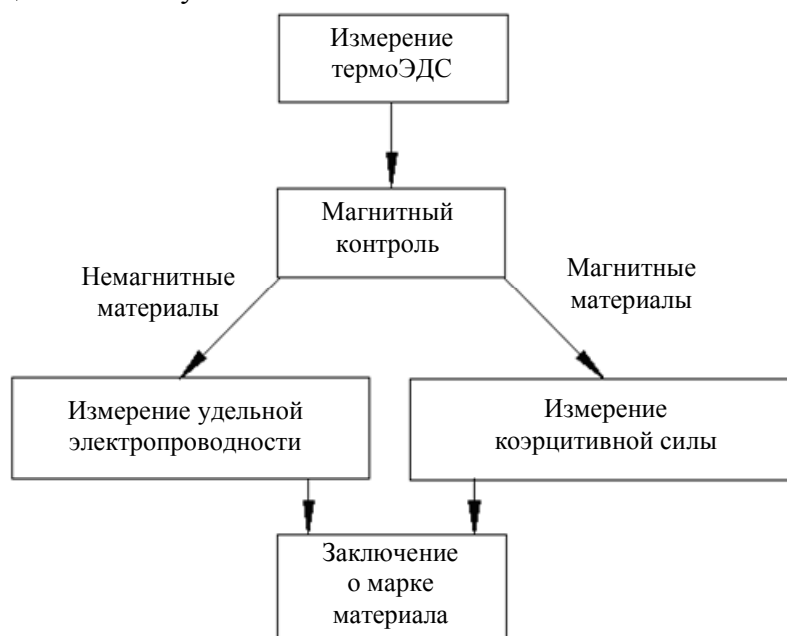


Рис. 2

Одним из эффективных способов обнаружения таких дефектов является рентгенография [3]. В производственных условиях применяется следующая техника рентгенографии. Отливка с помощью специальных приспособлений устанавливается внутри изолированного свинцовым листом бокса. Внутри отливки помещается рентгеновская пленка. Режим просвечивания (длительность экспозиции и мощность излучения) устанавливается в зависимости от вида сплава и толщины стенки отливки. После просвечивания пленка проявляется и исследуется на предмет наличия дефектов, которые фиксируются в виде темных пятен. Для уточнения местонахождения дефекта на участок отливки (с помощью пластилина) прикрепляется свинцовая „метка“ (крестик), и этот участок повторно просвечивается. Ввиду того что рентгеновские лучи не проходят сквозь свинец, метка фиксируется на пленке в виде белого крестика. После установления точных координат и контуров дефекта в этом месте осуществляется вырубка металла на нужную глубину, место вырубki зачищается и производится его „заварка“, затем деталь снова просвечивают в целях гарантии устранения дефекта. Окончательная пригодность деталей проверяется при испытаниях на герметичность.

Такая технология была применена, например, при работе с литой деталью турбонасосного агрегата (<http://www.yuzhmash.com/ru/product.php?page=uzliavto>). При отработке технологии измерялась электропроводность заваренных участков и литого материала отливки в целях проверки химического состава наплавленного материала.

Аналогичная технология применяется для выявления литейных дефектов в отливках корпуса коробки перемены передач автомобилей, производимых фирмой “Nissan Casting Australia Pty Ltd” [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шолом А. М., Борисова Е. В., Бирюков Д. А. Повышение качества контроля сложных технических систем // Технология металлов. 2009. № 4. С. 35—40.
2. Кашубский А. Н., Крушенко Г. Г. Идентификация марок сталей и сплавов инструментальными методами // Технология машиностроения. 2005. № 9. С. 15—17.
3. Русаков А. А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.
4. Tian C., Law J., J. van der Touw et al. Effect of melt cleanliness on the formation of porosity defects in automotive aluminium high pressure die castings // J. of Materials Processing Technology. 2002. Vol. 122, Is. 1. P. 82—93.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Кашубский** — канд. техн. наук; ООО „Независимый инженерный центр технической диагностики, экспертизы и сертификации“ — „Регионтехсервис“, Красноярск; нач. отдела; E-mail: nicka7@yandex.ru
- Генрих Гаврилович Крушенко** — д-р техн. наук, профессор; Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск; E-mail: genry@icm.krasn.ru

Рекомендована ОАО „ИСС“

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

УДК 621.3.019.31

С. В. Покидько, С. Г. Кочура

КОРРЕКТИРОВКА РЕЗУЛЬТАТОВ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПРИ МАЛЫХ ВЫБОРКАХ

Предложен метод обработки результатов ресурсных испытаний электромеханических устройств при их малых выборках в целях выявления аномальных наблюдений и корректировки данных для повышения точности прогноза ресурса.

Ключевые слова: ресурсные испытания, корректировка данных, малая выборка, бутстреп-метод.

Корректировка данных является наиболее трудной проблемой при обработке результатов испытаний. Это обусловлено наличием в наборах данных аномальных величин (выбросов), связанных с ошибками результатов наблюдений или погрешностями их регистрации, сбоями аппаратуры и неоднородностью данных [1]. Поскольку неоднородность данных при испытаниях устройств космических аппаратов (КА) наблюдается нечасто, интерес представляют первые два случая.

С ростом требований к точности оценки технического состояния устройств, связанных с необходимостью увеличения сроков службы КА, методы, основанные на упрощенном прогнозировании нестационарных процессов деградации аппаратуры, становятся неэффективными. Прогнозирование технического состояния устройств по данным ресурсных испытаний на основе традиционных методов без предварительной обработки данных существенно затруднено. Например, при оценке параметров электромеханических устройств и прогнозировании их ресурса по результатам испытаний в условиях мелкосерийного производства необходимо учитывать следующие ограничения:

— малое количество устройств, подвергаемых ресурсным испытаниям (менее десяти образцов);

— незначительные изменения параметров, характеризующих техническое состояние устройств в ходе испытаний;

— дискретность измерений, обусловленная интенсивностью изменений контролируемых параметров, что не позволяет получить достаточное количество значений параметров в течение определенного интервала времени;

— зашумленность результатов испытаний вследствие изменения уровней внешних воздействующих факторов, влияние которых обычно не учитывается, а также возможное наличие выбросов данных (аномальных наблюдений).

В таких условиях прогнозирование ресурса устройств без использования априорной информации о законах распределения параметров и предварительной обработки данных

(в частности, отбраковки аномальных наблюдений) с учетом новых методов — весьма сложная задача.

Для оценки технического состояния электромеханических устройств в целях повышения точности прогноза их ресурса по результатам испытаний разработана помехоустойчивая процедура предварительной обработки данных, позволяющая в большинстве случаев исключать выбросы и осуществлять сглаживание временного ряда. Процедура основана на таких непараметрических методах многомерного статистического анализа данных, как „бутстреп“ и „складной нож“ [2—4], которые инвариантны к закону распределения обрабатываемых данных. Процедура применима в следующих условиях:

- проведение испытаний одновременно для всех образцов;
- моменты измерений равномерно распределены во времени;
- изменение параметра, характеризующее техническое состояние устройства за время, прошедшее между измерениями, много меньше ошибки измерений;
- осуществление измерений после завершения этапа „приработки“ устройств.

Рассмотрим два случая:

1) в некоторый момент времени $t = t_j$ значения параметров всех испытываемых устройств (будем называть эти данные j -м временным сечением) определены неверно (вследствие отказа оборудования или наличия устойчивых внешних помех);

2) данные измерений j -го временного сечения содержат выброс (вследствие ошибки оператора или существенного отклонения одного из воздействующих факторов от его среднего значения).

При определении сечений, содержащих аномальные наблюдения, учитывается, что при отсутствии выбросов среднее значение параметра и его дисперсия с течением времени изменяются незначительно, т.е. распределение параметров, определяющих техническое состояние устройства в смежных временных сечениях, практически одинаково [5]. Такой подход может быть реализован при условии, что выборочные характеристики (статистики) в каждом временном сечении определены корректно. При малом объеме выборки и неизвестном законе распределения вероятностей применение асимптотических формул для расчета выборочных статистик (в предположении, что распределения данных подчиняются нормальному закону) нецелесообразно, так как может привести к значительным ошибкам при прогнозе ресурса вследствие отклонения выборочных оценок от их истинных значений. „Бутстреп“ и „складной нож“ — методы, позволяющие обоснованно перейти к использованию асимптотических соотношений при обработке выборочных данных.

Рассмотрим суть предлагаемого подхода. Пусть в результате ресурсных испытаний ограниченного количества устройств — выборки объемом n — получены значения выходных параметров X_j^i , $i=\overline{1, n}$, $j=\overline{1, k}$, где k — количество временных сечений, используемых для прогноза ресурса. Необходимо получить оценки средних значений \bar{X}_j в каждом временном сечении, учитывающие отклонение выборочных оценок и дисперсии S_j^2 , а также проверить гипотезу о равенстве средних значений в смежных временных сечениях. Для проверки выводов, основанных на сравнении средних значений, рассчитывается коэффициент корреляции $\rho_{j,j+1}$ для каждой пары смежных сечений, показывающий меру линейной связи выборочных значений параметров. При отсутствии выбросов коэффициенты $\rho_{j,j+1}$ для любой пары смежных временных сечений не будут значимо отличаться друг от друга.

Задача статистического оценивания выборочных характеристик в каждом временном сечении, когда случайная выборка $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ объемом n осуществляется с использованием неизвестного распределения вероятностей F и необходимо по ее наблюдаемой

реализации $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ оценить выборочное распределение анализируемых статистик $R(X, F)$ (среднего, дисперсии, коэффициента корреляции), решается бутстреп-методом.

Бутстреп-метод для одновыборочной задачи крайне прост, для ее реализации необходимо [2]:

— осуществить выборочное распределение вероятностей \hat{F} (непараметрическую оценку наибольшего правдоподобия для F), полагая, что в каждой из точек x_1, x_2, \dots, x_n реализуется равномерное распределение;

— при фиксированном \hat{F} произвести случайную выборку $X_i^* = x_i^*$ объемом n , где $X^* (X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*)$ — бутстреп-выборка; $x^* (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ — ее реализация;

— аппроксимировать распределение $R(X, F)$ выборочным бутстреп-распределением $R^* = R(X^*, \hat{F})$ с помощью случайного механизма для \hat{F} , значение которого зафиксировано в результате наблюдений.

Повторные реализации X^* генерируются с помощью случайных выборок объемом n из распределения \hat{F} вида $x^{*1}, x^{*2}, \dots, x^{*N}$, где N — количество бутстреп-выборок, а гистограмма $R(x^{*1}, \hat{F}), R(x^{*2}, \hat{F}), \dots, R(x^{*N}, \hat{F})$ рассматривается как аппроксимация физического распределения R по повторным выборкам, произведенным методом Монте-Карло. Несложно получить бутстреп-повторения $R^{*1}, R^{*2}, \dots, R^{*N}$, модифицировав исходный алгоритм вычисления R .

Применяя бутстреп-процедуру к выборочным данным каждого j -го временного сечения, получаем бутстреп-распределения $\bar{X}_j^N, S_j^{N2}, \rho_{j,j+1}^N$, по которым вычисляем бутстреп-оценки $\bar{X}_j^*, S_j^{*2}, \rho_{j,j+1}^*$, учитывающие отклонения (смещения выборочных оценок).

Используя бутстреп-распределения и бутстреп-оценки и задавая требуемый уровень значимости, определяем пары сечений, в которых средние значения \bar{X}_j, \bar{X}_{j+1} и дисперсии S_j, S_{j+1} существенно отличаются. По результатам проверки в простейшем случае исключаются данные сечений, содержащих выбросы.

Более сложной задачей является распознавание неявных выбросов среди результатов измерений в заданный момент времени $t = t_j$. Такая задача может быть решена путем комбинированного применения методов „складной нож“ и „бутстреп“.

При использовании метода „складной нож“ из данных измерений x_1, x_2, \dots, x_n последовательно удаляется каждое i -е наблюдение и по каждому из n наборов данных размерностью $n-1$ рассчитываются оценки дисперсии S_i^2 . Оценка дисперсии, рассчитанная согласно данным, из которых исключен выброс, будет меньше остальных. Применяя бутстреп-процедуру к каждому из n усеченных наборов данных, получаем для каждого распределения бутстреп-оценку дисперсии. Использование бутстреп-метода в данном случае позволяет не только обеспечить уменьшение отклонения выборочных оценок, но и проверить гипотезу об однородности дисперсий по бутстреп-распределениям, которые можно применять так же, как и реальные распределения [3]. Поскольку для бутстреп-распределений справедливы центральная предельная теорема и закон больших чисел, то справедливы будут и любые асимптотические соотношения, например, для бутстреп-распределений средних, дисперсий и т.д. Применение методов „бутстреп“ и „складной нож“ позволяет уменьшить отклонение выборочных

оценок от значения $\approx 1/n$ до $\approx 1/n^2$ [2, 3] и обоснованно перейти к использованию асимптотических выражений для расчета выборочных статистик.

Рассмотрим возможности применения этих методов при обработке результатов ресурсных испытаний электродвигателя вентилятора системы терморегулирования. Техническое состояние устройства определяется, в том числе, параметрами шарикоподшипниковых опор: искажением окружности беговых дорожек, радиальным зазором и различными размерами шариков. Объем выборки $n = 6$, дискретность измерений $\Delta t = 1000$ ч, контролируемый параметр a — изменение диаметра беговой дорожки внутреннего кольца шарикоподшипника за время между измерениями.

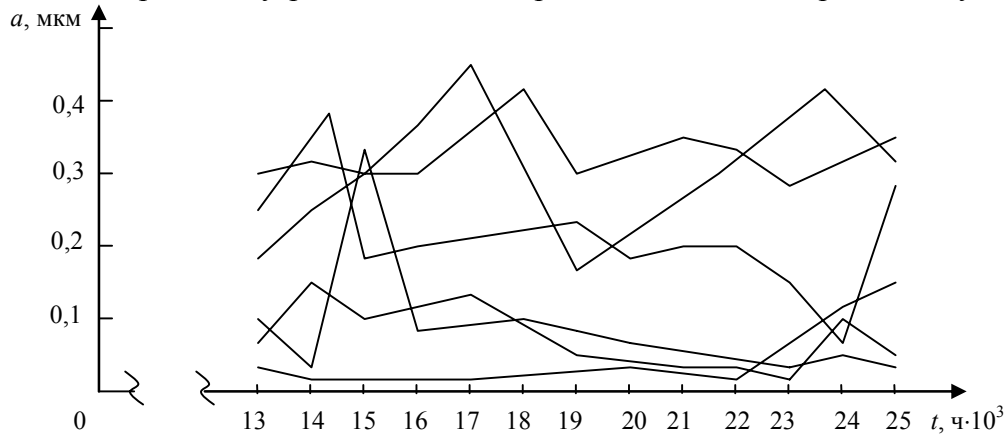


Рис. 1

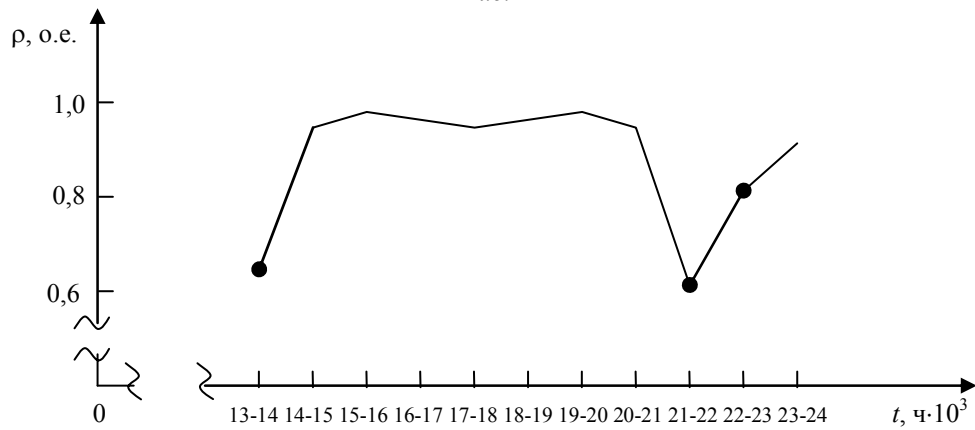


Рис. 2

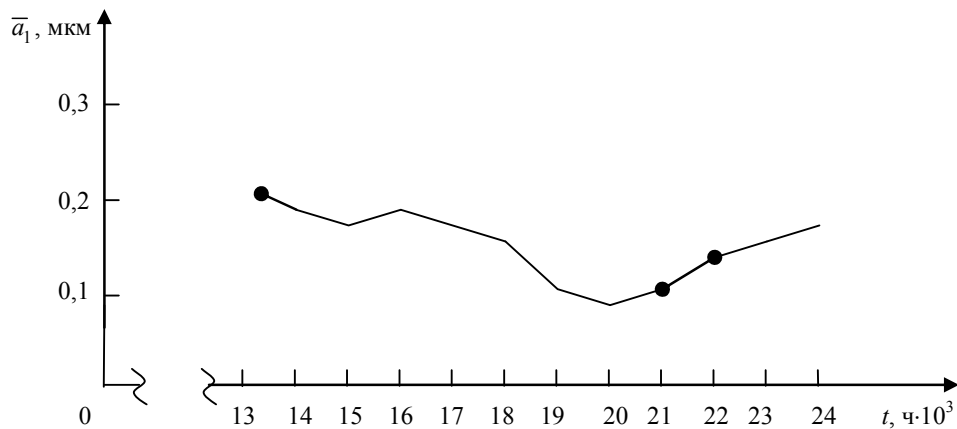


Рис. 3

Результаты испытаний с момента завершения этапа „приработки“ устройств приведены на рис. 1; на рис. 2 — значения коэффициентов парной корреляции данных смежных временных сечений; на рис. 3 — откорректированные с помощью бутстреп-процедуры средние значения параметра a , точками выделены значения, не корректные согласно данным аномальных наблюдений.

С учетом возможного отклонения оценок из-за малого объема выборки использование в этом случае известных методов не позволяет классифицировать выбросы и строить аппроксимирующую функцию для прогноза ресурса с удовлетворительной точностью.

Сглаживание данных, учитывающее отклонение средних оценок, позволяет увеличить точность прогноза ресурса на 10 %, а удаление сечений, в которых нарушается линейная зависимость результатов испытаний в смежных временных сечениях, обеспечивает увеличение точности прогноза еще на 4 %. Несмотря на отсутствие строгого математического обоснования эта мера может быть принята как дополнительная для сглаживания временного ряда и, в частности, для коротких временных рядов, полученных по результатам испытаний устройств при малой выборке.

Применение предложенного подхода при обработке данных ресурсных испытаний электромеханических устройств КА при малых ($n < 10$) выборках показало повышение точности прогноза ресурса устройств в среднем на 12 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартин Р. Д. Устойчивый авторегрессионный анализ временных рядов // Устойчивые статистические методы оценки данных: Сб. М.: Машиностроение, 1984. С. 121—146.
2. Efron B. Bootstrap methods: another look at the jack-knife // The Annals of Statistics. 1979. Vol. 7, N 1. P. 1—26.
3. Efron B. The Jack-Knife, the Bootstrap and Other Resampling Plans. Philadelphia: PaiSTAM, 1982. 115 p.
4. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа: Сб. статей. М.: Финансы и статистика, 1988. 263 с.
5. Коптев В. М., Покидько С. В., Баянова С. В. Оценка тренда технического состояния электромеханических устройств при ограниченном объеме ресурсных испытаний. М., 1989. Деп. в ЦНТИ „Поиск“, № 035-4408. 7 с.
6. Покидько С. В. Отбраковка аномальных наблюдений при ограниченном объеме ресурсных испытаний // Материалы науч.-техн. конф. „Надежность и эксплуатация технических систем и комплектующих изделий“. Симферополь, 1990. С. 40—43.

Сведения об авторах

- Сергей Владимирович Покидько** — канд. техн. наук; Сибирский федеральный университет, Железногорский филиал; E-mail: elin@krasmail.ru
- Сергей Григорьевич Кочура** — ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; зам. генерального конструктора; E-mail: KOCHURA@iss-reshetnev.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

С. Г. КОЧУРА, Н. А. КУЗНЕЦОВ, А. А. НОСЕНКОВ

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СВЯЗИ

Проанализирована известная математическая модель, рекомендуемая для использования при испытаниях устройств космической техники. Представлена математическая модель, позволяющая устранить недостатки анализируемой модели, но сочетающая ее достоинства с предложениями авторов по повышению комплексности и практической ценности математического моделирования электрических испытаний космических аппаратов связи.

Ключевые слова: математическое моделирование, электрические испытания, космическая техника, космические аппараты связи.

Электрические испытания относятся к важнейшим и наиболее трудоемким видам испытаний изделий приборостроения, в том числе космической техники (КТ), требующим достаточно четкого планирования и совершенной технологии выполнения [1—5]. Для повышения эффективности и качества испытаний применяются методы математического моделирования. Однако математическое моделирование испытаний устройств КТ еще далеко от практической реализации. Кроме того, теоретическая его разработка не может быть признана достаточно завершённой.

Тем не менее известна математическая модель, рекомендуемая для использования при испытаниях устройств КТ [6], которая рассматривалась рядом отечественных авторов (см. например, [2]) и заслуживает детального изучения на предмет ее приемлемости для моделирования электрических испытаний космических аппаратов (КА) связи, в частности. Основным постулатом модели является утверждение о том, что программы испытаний предназначены для обнаружения и локализации N дефектов, первоначально (до испытаний) имеющихся в изделиях (как результат несовершенства их разработки и производства). Кроме того, сам процесс обнаружения дефектов обладает случайными характеристиками, подобными рассматриваемым в теории надежности. Например, время до обнаружения дефекта является аналогом времени наработки на отказ элементов изделия. Эта аналогия, а также ряд принятых допущений легли в основу анализируемой модели.

Рассмотрим исходные математические положения модели. Так, случайная величина $Q_j(\tau)dt$ определена как вероятность обнаружения дефекта на интервале $\tau \leq t \leq \tau + dt$ при условии, что на этом интервале проводится испытание j -го типа и дефект не был обнаружен до момента $t = \tau$. При этом предполагается, что тип рассматриваемого одиночного испытания не изменяется в течение всего процесса. Значит, индекс j в обозначении $Q_j(t)$ может быть опущен. Другая случайная величина $P(t)$ определена как вероятность того, что дефект не был обнаружен по прошествии времени t процесса испытаний. На основании этих предпосылок получено уравнение для вероятности $P(t+dt)$ того, что дефект не будет обнаружен за время $t + dt$.

$$P(t+dt) = P(t) [1 - Q(t)dt], \quad (1)$$

откуда следуют дифференциальные уравнения

$$\frac{d}{dt} \ln P(t) = -Q(t); \quad (2)$$

$$Q(t) = -\frac{d}{dt} \ln P(t), \quad (3)$$

являющиеся фундаментальными при описании процесса обнаружения дефектов (т.е. процесса испытаний) и аналогичными дифференциальному уравнению для функции надежности $R(t)$, где роль переменной $Q(t)$ играет интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Решение уравнения (2) для $P(t)$ имеет следующий вид:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t Q(t) dt \right]. \quad (4)$$

Если проводится испытание одного типа (например, электрическое), то решением уравнения (4) при $Q(t) = \text{const} = b$ будет выражение

$$P(t) = \exp(-bt), \quad t \geq 0. \quad (5)$$

Когда программой испытания определена его полная длительность T , то

$$P(T) = \exp(-bT). \quad (6)$$

При многофазном характере испытания

$$Q_1(t) = b_1, \quad Q_2(t) = b_2, \quad \dots, \quad Q_n(t) = b_n, \quad (7)$$

где n — количество фаз испытания.

Описание модели одиночного испытания завершается введением такого параметра, как безусловная плотность распределения $\Phi(\tau)$, для которой $\Phi(\tau)d\tau$ — вероятность того, что дефект будет обнаружен в интервале $\tau \leq t \leq \tau + d\tau$. При этом

$$P(t) = \int_t^{\infty} \Phi(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Дифференцирование по t обеих частей уравнения (8) и деление их на $P(t)$ приводят к соотношению

$$\frac{d}{dt} \ln P(t) = -\Phi(t) / P(t), \quad (9)$$

а с учетом уравнения (2) — к соотношению

$$\Phi(t) = P(t) Q(t). \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) — основные уравнения рассматриваемой модели [6], они получены для одиночного испытания, но носят достаточно общий характер и рекомендованы к использованию даже при комплексных испытаниях.

Здесь же рассмотрена ситуация, когда тип испытания, при котором можно выявить наибольшее количество дефектов, не определен и величина $Q(t)$ задана в виде суммы $\sum_{i=1}^n b_i \rho_i$ (где ρ_i — интервал времени T , затрачиваемого на i -ю фазу испытания), обозначенной через B . Для этого случая получены уравнения

$$\frac{d}{dt} \ln P(t) = -B, \quad t \geq 0; \quad (11)$$

$$P(t) = \exp(-Bt), \quad t \geq 0, \quad (12)$$

которые совместно с уравнениями (9) и (10) позволяют определить функциональную зависимость

$$\Phi(t) = B \exp(-Bt), \quad t \geq 0. \quad (13)$$

Оценка параметров B и N рассматриваемой математической модели проблематична в двух аспектах: во-первых, в оценке качества (эффективности) испытаний, т.е. определении величины B , и, во-вторых, в оценке качества изделия, т.е. в оценивании количества дефектов N ,

априори имеющихся в объекте испытаний. Суть проблемы заключается в неразрывной связи оценок величин B и N . Так, если при испытании изделия дефекты в нем не обнаружены, то этот факт может быть объяснен как высоким качеством объекта испытаний, так и низким качеством процесса испытаний. Следовательно, результат испытания зависит и от B , и от N . В такой ситуации оценивать эти параметры предложено двумя статистическими методами: методом максимального правдоподобия и байесовским методом анализа априорного и апостериорного распределений. Однако оба метода имеют серьезные недостатки.

Недостаток первого метода заключается в отсутствии практически полезных результатов, если априори не известны величины обоих параметров. Реализация второго метода дает уверенный результат, если время проведения оцениваемого испытания $T \rightarrow \infty$. Такое условие, разумеется, не может быть практически выполнено, особенно для изделий КТ, поскольку одним из основных требований к их испытаниям является оперативность, диктуемая различными обстоятельствами: фиксированной датой запуска, жестким графиком выполнения работ, ограниченными ресурсами и т. д.

Кроме того, если при испытаниях даже с использованием сложного оборудования не обнаружены дефекты в объекте, то причиной тому, скорее, является несовершенство испытаний, чем высокое качество изделия. Правда, предлагается учесть это мнение путем введения дельта-функции Дирака $\delta(B)$ в априорное распределение параметров B и N , определяемой соотношениями

$$\delta(B) = \begin{cases} 0 & \text{при } B \neq 0; \\ \infty & \text{при } B = 0, \end{cases} \quad (14)$$

$$\int_{0-}^{0+} \delta(B) dB = 1. \quad (15)$$

Но эта математическая мера не исключает полностью тот факт, что отсутствие выявленных дефектов в ходе длительных испытаний изделий современной (тем более, космической) техники свидетельствует об их бесполезности. Однако создатель анализируемой модели [6] не считает ее в чем-либо неполноценной и в подтверждение этому предлагает ряд мероприятий, „вроде бы“ позволяющих позиционировать данную модель как единственную и незаменимую при решении задач подобного класса, а именно:

1) ввести классификацию дефектов по степени трудности их выявления; при этом утверждается, что обнаружение дефектов электрического характера менее проблематично, чем механических;

2) для оценки эффективности испытаний использовать соотношение количества обнаруженных дефектов к количеству априорных;

3) на стадиях разработки и модификации программ испытаний использовать математические методы линейного и нелинейного программирования.

Факт единственности рассматриваемой модели авторы настоящей статьи не намерены опровергать, поскольку другой вариант подобной модели им действительно не известен. В то же время не известны и факты практической реализации этой модели для современных изделий КТ. А ранг незаменимости сам по себе противоречит диалектике научно-технического прогресса. (Общеизвестно, что все в мире, даже самое оригинальное, устаревает.) Тем более, что предложенные мероприятия не являются неоспоримыми. Например, предложение по классификации дефектов. Здесь вызывает несогласие суждение о том, что электрические дефекты более легко выявляются, чем механические. По мнению авторов, наоборот, механические дефекты, как правило, более легко выявляемы, так как сопровождаются визуальными, акустическими, тепловыми и другими признаками. А электрические дефекты обычно являются „вещью в себе“, т.е. относятся к категории наиболее скрытых дефектов. Они могут стихийно возникать и неконтролируемо расти до катастрофических размеров. Причем этот процесс далеко

не всегда заранее предсказуем. С другой стороны, испытателям изделий КТ, конечно, известны проблематичные по непредсказуемости дефекты любой физической природы. Но формировать из них самостоятельный класс дефектов нет смысла по причине именно их непредсказуемости и крайне низкой вероятности проявления даже для однотипных изделий.

Реальность второго предложения также вызывает большое сомнение. Дефекты КТ являются случайными событиями и в количественном отношении, и по своей физической природе. Здесь ситуация аналогична предыдущей, т.е. совокупность потенциальных априорных дефектов какого-либо изделия может оказаться неповторимой для других изделий. Теория вероятности вполне допускает такие случаи. Тогда какой же смысл производить общую оценку эффективности испытаний на основании статистики дефектов какого-то конкретного изделия?

Что касается третьего предложения, то, как известно, основное назначение математического программирования — поиск экстремума в исследуемых процессах, т.е. их оптимальности. Об оптимальности же электрических испытаний КА связи весьма проблематично вести речь, поскольку количество только штатно контролируемых параметров этих изделий уже превысило 10^4 , а зависимости их значений от потенциальных дефектов носят случайный характер, и, кроме того, физическая суть этих зависимостей, как правило, априори не поддается определению.

Изложенными обстоятельствами, видимо, и объясняется скептическое отношение испытателей к математическому моделированию электрических испытаний КТ. Тем не менее, по мнению авторов, для КА связи, например, существует возможность построения комплексной и практически полезной модели электрических испытаний с использованием математических методов. Но для этого необходимо указать на еще один недостаток анализируемой модели, представленной выражениями (1)—(15).

Дело в том, что в этих выражениях не учитывается полная совокупность выполняемых при электрических испытаниях работ и влияние на них человеческого фактора, который играет определяющую роль на всех этапах испытаний объекта и при его проектировании. Для устранения этого недостатка авторы настоящей статьи предлагают вариант математической модели оценки вероятности обнаружения дефектов:

$$Q(t) = G_1(t_1) G_2(t_2) G_3(t_3) G_4(t_4), \quad (16)$$

где $G_1(t_1)$, $G_2(t_2)$, $G_3(t_3)$, $G_4(t_4)$ — вероятности полноценного выполнения этапов создания объекта, планирования, разработки и проведения его электрических испытаний соответственно, t_1 , t_2 , t_3 , t_4 — продолжительности выполнения каждого из этапов.

Первый компонент $G_1(t_1)$ выражения (16) характеризует уровень управляемости и контролепригодности объекта испытаний, заложенный разработчиками и реализованный изготовителями изделия. Компонент $G_2(t_2)$ определяет место, средства и порядок испытаний, а также состав группы специалистов для их выполнения. При реализации компонента $G_3(t_3)$ должны быть определены контролируемые режимы, последовательность выполнения испытательных операций, порядок и методика оценки результатов испытаний. Основное содержание четвертого компонента $G_4(t_4)$ — качество работы персонала, аппаратно-программных средств и процесса электрических испытаний в целом.

Методическое обеспечение каждого из рассмотренных компонентов выражения (16) предполагает разработку детальных математических моделей с учетом достоинств проанализированной модели [6] (например, ряда ее математических выражений и умозаключений), а также необходимость выполнения совокупности исследовательских работ с учетом имеющихся статистических данных и анализа полноценности полученных результатов. При этом авторы намерены рассмотреть вопрос обеспечения технической совместимости процессов изготовления изделия и метода его контроля (испытаний) [7] с использованием аппарата математического планирования эксперимента [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарактанэ А. С., Железнов И. Г. Испытания сложных систем. М.: Высш. школа, 1974. 184 с.
2. Элементы теории испытаний и контроля технических систем / В. И. Городецкий, А. К. Дмитриев, В. М. Марков и др.; Под ред. Р. М. Юсупова. Л.: Энергия, 1978. 192 с.
3. Носенков А. А. Исследование путей повышения эффективности контроля технического состояния космических аппаратов связи: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск-26, 1979. 23 с.
4. Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. Г. Планирование эксперимента в технике. Киев: Техника, 1984. 200 с.
5. Федоров В. К., Сергеев Н. П., Кондрашин А. А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств. М.: Техносфера, 2005. 500 с.
6. Линд М. М. Математическая модель процесса испытаний изделий // Военная авиация и ракетная техника. 1977. № 7. С. 1—14.
7. ГОСТ 30709-2002. Техническая совместимость. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 2003.

Сведения об авторах

- Сергей Григорьевич Кочура** — ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; зам. генерального конструктора; E-mail: KOCHURA@iss-reshetnev.ru
- Николай Анатольевич Кузнецов** — ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; зам. нач. отдела; E-mail: NK230@iss-reshetnev.ru
- Александр Алексеевич Носенков** — д-р техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, Красноярск

Рекомендована ОАО „ИСС“

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

УДК 621.396.6-001.4

А. А. КОВЕЛЬ, С. В. ПОКИДЬКО

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА
В УСЛОВИЯХ ФАКТОРНОЙ НИШИ**

Рассмотрена специфика математического планирования эксперимента при разработке электронных устройств космической аппаратуры, функционирующих в одинаковых эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: планирование эксперимента, функциональный узел, факторная ниша.

Практика математического планирования эксперимента (МПЭ) широко применяется в технологии наземной экспериментальной отработки [1, 2] электронных устройств космического приборостроения. Использование МПЭ [3] в этой области позволило расширить спектр прикладных и интерпретационных возможностей метода посредством введения понятия групповых математических моделей, формирования испытательных тестов, „восстановления“ результатов нереализованных экспериментов, оценки запасов работоспособности функциональных узлов и их совместимости в единой структуре и др. [1]. Одной из таких возможностей МПЭ стало моделирование процесса совместного функционирования узлов аппаратуры, исследованных автономно (иногда на разных предприятиях), но предназначенных для работы в составе одного прибора или устройства бортовой аппаратуры космического аппарата (КА),

когда эксплуатационные воздействия являются общими для всех ее составляющих. Такими воздействиями (факторами) могут быть температура, напряжения питания, уровни помех, механические воздействия и др. Единство уровней факторов и их случайных изменений позволяет объединить их понятием факторная ниша.

Проиллюстрируем это на примере двух функциональных узлов (далее — узлов 1 и 2), работающих в составе одного устройства (рис. 1).

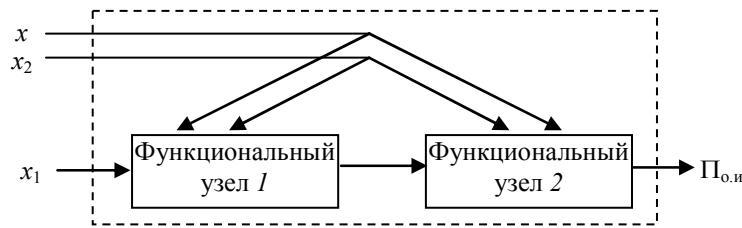


Рис. 1

Исходным массивом являются результаты МПЭ при обработке первого узла. Для выявления влияния внутренних факторов (разброса параметров активных и пассивных элементов узла), МПЭ проводят на κ образцах [2], и результаты планирование формируют коридор откликов (рис. 2), которые являются отражением малой выборки [4] и не охватывают весь диапазон возможных разбросов параметров объекта исследования ($\Pi_{o,и}$). Вследствие ограниченных ресурсов экспериментальной отработке, как правило, подвергаются не более 10 образцов ($\kappa \leq 10$), поэтому разбросы результатов опытов на других образцах могут быть спрогнозированы, например, путем использования аппарата толерантных пределов [5, 6]:

$$\Pi'_{o,и} = \Pi_{ср} \pm \kappa^t S(\Pi)_N,$$

где $\Pi'_{o,и}$ — возможные толерантные пределы ($\underline{\Pi}'$ — нижний, $\bar{\Pi}'$ — верхний) для каждого опыта; $\Pi_{ср}$ — среднее значение результатов $\Pi_{o,и}$ для κ образцов при каждом опыте; κ^t — табулированный коэффициент; $S(\Pi)_N$ — оценка среднеквадратичного отклонения $\sigma(\Pi)$ при каждом опыте.

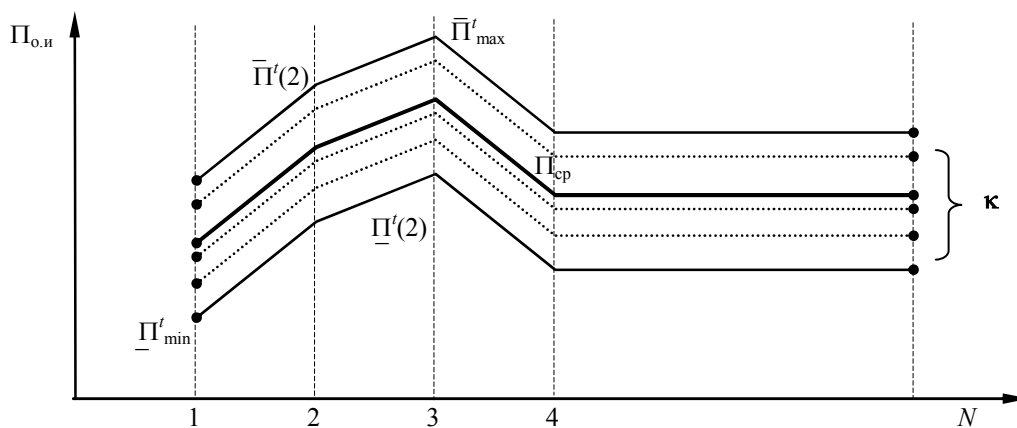


Рис. 2

Пусть представленная факторограмма (см. рис. 2) отражает результаты МПЭ для узла 1 (по оси абсцисс — номера 1, 2, 3, ..., N опытов согласно матрице планирования, по оси ординат — результаты, полученные в ходе каждого опыта). Тогда экстремальные отклонения ($\underline{\Pi}'_{min}, \bar{\Pi}'_{max}$) при традиционном планировании должны быть выбраны в качестве уровней

варьирования $(-1, +1)$ выходного параметра $\Pi_{\text{вых}}$ узла 1, являющегося входным фактором для узла 2 (см. рис. 1). Однако анализ совместной работы двух узлов, функционирующих в условиях общей факторной ниши, показывает, что при 1-м опыте фиксируются одни параметры Π_{min} и Π_{max} [$\underline{\Pi}^t(1), \overline{\Pi}^t(1)$], при 2-м опыте — другие параметры $\underline{\Pi}^t(2), \overline{\Pi}^t(2)$ и т.д. Таким образом, только варьируя значение $\Pi_{\text{вх}}$ узла 2 на уровнях, соответствующих $\underline{\Pi}^t(N), \overline{\Pi}^t(N)$, т.е. на нижнем и верхнем уровнях $\Pi_{\text{о.и}}$ при каждом $(N\text{-м})$ опыте, полученных для узла 1, можно корректно воспроизвести совместную работу узлов 1 и 2 в условиях общей факторной ниши.

Если МПЭ для узла 2 будет проведено при других уровнях входных воздействий, то полученные результаты не будут корректно отражать предстоящую совместную работу функциональных узлов.

Рассмотрим матрицу планирования (МП) (рис. 3), отражающую результаты, представленные на факторограмме (см. рис. 2). Так как на функциональные узлы воздействуют три фактора (x_1, x_2, x_3) , в традиционной МП предусмотрены 8 опытов (в предположении линейной модели), но, учитывая результаты опытов для \mathbf{k} образцов при одинаковой совокупности факторов, следует каждый опыт связывать с двумя результатами: в первом опыте — $\underline{\Pi}^t(1), \overline{\Pi}^t(1)$, во втором — $\underline{\Pi}^t(2), \overline{\Pi}^t(2)$ и т.д.

Номер опыта	x_1		x_2	x_3	$\Pi_{\text{о.и}}$
1	+	$\overline{\Pi}^t(1)$	+	+	
	+	$\underline{\Pi}^t(1)$	+	+	
2	-	$\overline{\Pi}^t(2)$	+	+	
	-	$\underline{\Pi}^t(2)$	+	+	
3	+	$\overline{\Pi}^t(3)$	-	+	
	+	$\underline{\Pi}^t(3)$	-	+	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
8	-	$\overline{\Pi}^t(8)$	-	-	
	-	$\underline{\Pi}^t(8)$	-	-	

Рис. 3

Для исследования узла 2 в тех же условиях (одна факторная ниша) факторы взаимодействия ($\Pi_{\text{вых}}$ узла 1 = $\Pi_{\text{вх}}$ узла 2) воспроизводятся на тех уровнях, которые могли быть зафиксированы при совместной работе узлов 1 и 2. Тогда в МП для узла 2, составленной с учетом этих соображений, будет отражено при трех факторах (x_1, x_2, x_3) вдвое больше опытов, но воспроизведены результаты для \mathbf{k} образцов обоих узлов (см. рис. 3). Полученные результаты при реализации МП позволяют построить математические модели для параметра $\Pi_{\text{ср}}$ узлов 1 и 2 (базовая модель) и возможных нижних и верхних толерантных пределов $(\underline{\Pi}^t, \overline{\Pi}^t) \Pi_{\text{о.и}}$.

Такое моделирование совместной работы функциональных узлов продуктивно и при другом их количестве (рис. 4). При этом чтобы моделировать совместную работу, например,

трех узлов при возможных вариациях внутренних факторов каждого (k -выборки), в МП должно быть представлено варьирование уровней $\underline{\Pi}^t(N), \overline{\Pi}^t(N)$ каждого узла, как при традиционном планировании эксперимента [3].

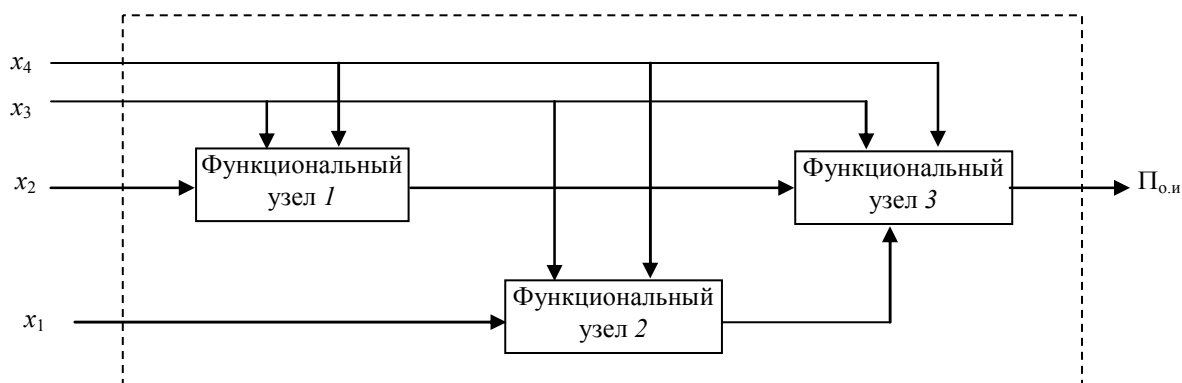


Рис. 4

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, выполнены в рамках Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг., гос. контракт № 02.740.11.0621.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковель А. А., Покидько С. В. Математическое планирование эксперимента при отработке электронных устройств // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 13—18.
2. Ковель А. А. Установление допусков на параметры электронных устройств по результатам многофакторного эксперимента // Там же. С. 18—22.
3. Барабашук В. И. и др. Планирование эксперимента в технике. Киев: Техника, 1984.
4. Гаскаров Д. В., Шаповалов В. И. Малая выборка. М.: Статистика, 1978.
5. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1969.
6. Мюллер П. и др. Таблицы по математической статистике. М.: Финансы и статистика, 1982.

Сведения об авторах**Анатолий Архипович Ковель**

— д-р техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнёва, кафедра космических информационных систем, Красноярск; E-mail: kovel.bogdan@mail.ru

Сергей Владимирович Покидько

— канд. техн. наук; Сибирский федеральный университет, Железногорский филиал; E-mail: elin@krasmail.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

Д. А. Гришелёнок, А. А. Ковель

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ НЕЙРОСЕТИ

Рассмотрены результаты применения метода математического планирования эксперимента при формировании обучающей выборки нейронной сети.

Ключевые слова: математическое планирование, нейросеть, обучающая выборка, космический аппарат.

Увеличение срока активного существования космических аппаратов (КА) до 10—15 лет, а также эксплуатация бортовой аппаратуры вне гермоконтейнера предопределяют строгие требования к надежности КА. Эксплуатация бортовой аппаратуры в условиях открытого космического пространства значительно усложняет задачу точного измерения параметров, так как под влиянием внешних факторов может происходить деградация электрорадиоизделий (ЭРИ) и, как следствие, увеличение погрешности измерений. Повышение точности измерений за счет усложнения схемотехнической части измерительных систем снижает их надежность. Решение проблемы компенсации внешних воздействий и упрощения схемотехнического исполнения заключается в математической обработке данных непосредственно при проектировании бортовой аппаратуры КА.

Нейронные сети и проблемы их обучения. Для решения задач компенсации внешних воздействий математическими методами целесообразно применение аппарата нейросетей. Нейронные сети (НС) — это современные вычислительные системы, в которых процесс преобразования информации аналогичен процессам, происходящим в мозге человека. Обработываемая информация имеет цифровое представление, что позволяет использовать нейронную сеть, например, в качестве модели объекта с совершенно неизвестными характеристиками.

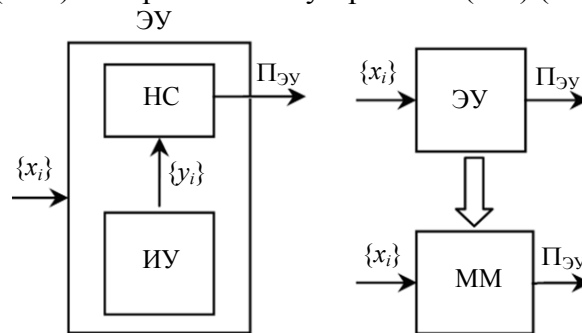
Возможности искусственных нейронных сетей ограничены методом их обучения. Наиболее известным методом обучения нейросетей является алгоритм обратного распространения ошибки [1]. Существенные недостатки этого метода заключаются в непредсказуемости результата, а также длительности процесса обучения, в худшем случае нейросеть может оказаться вообще не обученной. Длительность обучения может быть результатом неоптимального выбора длины шага, а неудачи в обучении обычно возникают по двум причинам: паралича сети и попадания ее в локальный минимум.

Если в процессе обучения нейросети значения весов в результате коррекции становятся очень большими, это может привести к тому, что нейроны будут функционировать в области, где производная сжимающей функции очень мала. Так как посылаемая обратно в процессе обучения ошибка пропорциональна этой производной, то процесс обучения может практически приостановиться. Такое поведение нейросети в процессе обучения называют ее параличом. При обратном распространении ошибки используется разновидность градиентного спуска, т. е. осуществляется спуск по поверхности ошибки с непрерывным подстраиванием веса в направлении минимума. Поверхность ошибки сложной сети сильно изрезана и состоит из холмов, долин, складок и оврагов в пространстве высокой размерности. Сеть может попасть в локальный минимум, когда рядом имеется гораздо более глубокий минимум. В точке локального минимума все направления ведут вверх, и сеть неспособна из него выбраться [2].

Информационная модель объекта исследования. В условиях промышленного производства измерительной аппаратуры, базирующейся на использовании математического аппарата нейросетей, актуальным является уменьшение количества экспериментов для получения обучающих пар. Количество обучающих выборок должно в достаточной степени описывать модель поведения прибора, т.е. содержать максимум информации о взаимном влиянии параметров. С этих позиций представляет интерес использование результатов математического планирования эксперимента (МПЭ) [3].

Важно отметить, что вся информация, которую нейронная сеть имеет о задаче, содержится в наборе примеров. Поэтому качество обучения нейронной сети непосредственно зависит от количества примеров в обучающей выборке, а также от того, насколько полно эти примеры описывают данную задачу.

Для минимизации количества экспериментальных данных при обучении нейросети целесообразно синтезировать недостающие обучающие пары из предварительно построенной математической модели (ММ) измерительного устройства (ИУ) (см. рисунок).



При построении математической модели сложной измерительной системы (например, электронного устройства — ЭУ) на основе экспериментов или наблюдений определяется системная функция F лишь для конечного количества параметров $\{x_i\}$:

$$\{x_i\} = \{x_{\text{вх}}, x_{\text{внт}}, x_{\text{внш}}\}, \quad (1)$$

где $x_{\text{вх}}$ — входные, $x_{\text{внт}}$ — внутренние (отклонения параметров ЭРИ, взаимовлияние ЭРИ и др.), $x_{\text{внш}}$ — внешние (температура, напряжение питания, радиация и др.) воздействия соответственно.

При этом значения $\{y_i\}$ данной функции и параметры $\{x_i\}$ вычисляются приближенно, так как измерения подвержены ошибкам различной природы. Целью моделирования является получение значений системных откликов при изменении $\{x_i\}$.

При моделировании сложных технических систем широко используются статистические модели, но в условиях промышленного производства (когда по экономическим причинам или вследствие временных ограничений нельзя получить достаточное количество данных) применение статистических моделей невозможно. В данном случае более эффективна математическая модель, построенная с использованием метода МПЭ. Применение этого метода для построения полиномиальной математической модели, отражающей функционирование электронного устройства в условиях $\{x_i\}$ (см. формулу (1)), позволяет сократить количество проводимых экспериментов [3].

$$П_{\text{ЭУ}} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1, j>i}^n b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i=1, j>i}^n b_{ij} x_i^2, \quad (2)$$

где $П_{\text{ЭУ}}$ характеризует реакцию ЭУ на воздействие совокупности факторов, b — коэффициенты регрессии, n — количество факторов.

Точность поведения объекта исследования и его информационной модели определяется свойствами этой модели (порядком нелинейности) и экспериментальными данными. Множество входных и выходных переменных не может содержать все параметры, существенные для

описания поведения системы. Это связано как с техническими условиями, так и с ограниченностью представлений о моделируемой системе. Кроме того, при увеличении числа переменных ужесточаются требования к объему необходимых экспериментальных данных для построения модели. База экспериментальных данных, на которых основывается построение математической модели, рассматривается как объективная реальность. При этом в данных всегда присутствуют погрешности разной природы и шум. Такие особенности базы данных и постановки задач требуют особого подхода к анализу ошибок информационных моделей [4].

При построении математической модели следует учитывать, что из-за разброса внутренних параметров $\{x_{внт}\}$ пассивных и активных ЭРИ измерительного устройства влияние факторов $\{x_{вх}\}$, $\{x_{внш}\}$ на выходной параметр $\{y_i\}$ будет различным для каждой реализации ЭУ. Так как речь идет о промышленном изготовлении устройств, то использование индивидуальной математической модели для каждой реализации нецелесообразно, и осуществляется построение обобщенной модели [5].

Формирование обучающей и тестовой выборки. В качестве обучающей выборки используются те же экспериментальные результаты, что и для построения обобщенной математической модели. Если объем данных ограничен, то требуется анализ его достаточности для решения поставленной задачи. В любом случае обучающих данных должно быть больше, чем обучаемых параметров НС. Если результатов эксперимента оказалось недостаточно, то для дополнения обучающей выборки используется обобщенная модель. Такой прием позволяет увеличить количество обучающих пар без увеличения количества экспериментов.

Невязка выхода НС и системной функции на обучающем множестве называется ошибкой обучения НС. Основным интерес представляет отклик НС на новое воздействие, пример которого отсутствует в обучающей выборке. Неизвестная ошибка, допускаемая НС при воздействиях, не использовавшихся при обучении, называется ошибкой обобщения. Основной целью при обучении НС является уменьшение именно ошибки обобщения.

Важно отметить, что незначительность ошибки обучения не гарантирует малого значения ошибки обобщения. Поскольку истинное значение ошибки обобщения недоступно, на практике используется ее оценка. Для ее получения проводится анализ части примеров из имеющейся базы данных, для которых известны отклики системы, но которые не использовались при обучении. Эта выборка примеров называется тестовой. Ошибка обобщения оценивается на множестве примеров из тестовой выборки.

После построения обобщенной математической модели устройства определяются факторы, изменение которых в процессе эксплуатации ЭУ вызывает наибольшее влияние на выходной параметр $P_{ЭУ}$. Определив наиболее критичные из факторов $\{x_{внш}\}$, проводят дополнительный эксперимент при значениях $\{x_{внш}\}$, соответствующих нормальным условиям эксплуатации ЭУ. Результаты дополнительного эксперимента используются в дальнейшем в качестве тестовой выборки для определения ошибки обобщения.

Применение метода математического планирования эксперимента для получения обучающих пар НС и использование обобщенной математической модели исследуемого устройства позволяют выбрать оптимальное количество проводимых экспериментов.

Рассмотренный подход при формировании обучающей выборки нейросети внедряется в практику разработки бортовой аппаратуры КА.

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, выполнены в рамках Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг., гос. контракт № 02.740.11.0621.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия—Телеком, 2006. 252 с.
2. Пауков Д. Прогнозирование с помощью искусственных нейронных сетей [Электронный ресурс]: <<http://paukoff.fromru.com/neuro/wneuro/index.html>>.
3. Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике. Киев: Техника, 1984.
4. Горбань А. Н., Дунин-Барковский В. Л., Кирдин А. Н. и др. Нейроинформатика. Новосибирск: Наука, 1998. 296 с.
5. Ковель А. А. Установление допусков на параметры электронных устройств по результатам многофакторного эксперимента // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 18—22.

Сведения об авторах

- Дмитрий Анатольевич Гришелёнок** — ОАО „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва, Железногорск, Красноярский край; инженер-конструктор; E-mail: dimass_13@mail.ru
- Анатолий Архипович Ковель** — д-р техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра космических информационных систем, Красноярск; E-mail: kovel.bogdan@mail.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

УДК 621.396.6-001.4

А. А. КОВЕЛЬ, С. В. ПОКИДЬКО

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ
В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

Рассмотрен принцип организации исследований элементной базы бортовой аппаратуры в условиях воздействия факторов космического пространства.

Ключевые слова: элементная база, параллельные исследования, воздействие факторов космического пространства, наземные условия.

Проблемы увеличения сроков активного существования космических аппаратов (КА) приобрели особую актуальность при разработке космической техники в середине прошлого века. Потенциальные возможности совершенствования схемотехники, резервирования и конструирования бортовой аппаратуры были практически исчерпаны, и сдерживающим фактором развития космической техники оказалась элементная база КА (электрорадиоизделия — ЭРИ). При ее разработке не учитывалась специфика условий эксплуатации КА, более того, опыт эксплуатации КА с малым ресурсом показал избыточность массогабаритных параметров контейнерных КА и перспективность использования бесконтейнерных аппаратов. Накопленная информация об эксплуатационной среде КА свидетельствовала о значительном разрыве между требуемыми и возможными качественными показателями существовавших тогда ЭРИ.

В состав систем КА входит широкий спектр устройств различного назначения (механических, электромеханических, электрохимических, оптических, электронных и др.). Очевидно, что корректное комплексное воспроизведение всего спектра эксплуатационных воздействий (тем более, длительное) при наземно-эксплуатационной отработке элементов КА невозможно. Это обусловлено тем, что оборудование, используемое при наземных испытаниях,

позволяет воспроизводить лишь монофакторные воздействия, и результаты испытаний неадекватны результатам стохастических (по времени и уровням воздействий) полифакторных условий эксплуатационной среды [1, 2]. Особое значение в этом спектре имеют корпускулярно-волновые воздействия естественного (галактические, солнечные) и искусственного происхождения, объединенные понятием „факторы космического пространства“ (ФКП).

Информация о функционировании ЭРИ в составе устройств КА по результатам телеметрических (ТМ) измерений также была некорректной, так как формировалась по результатам работы ЭРИ при большом количестве схмотехнических решений и, соответственно, электрических режимов. В этой связи вполне понятен интерес к исследованию в натуральных условиях работы ЭРИ в „чистом“ виде. Это обстоятельство определило попытки исследовать процессы, протекающие в ЭРИ (пассивных и активных) как в контейнере КА, так и вне его [3]. Проблематика исследования ЭРИ в эксплуатационных условиях была включена в перечни научно-исследовательских работ по обеспечению длительных сроков активного существования КА, в том числе с проработкой возможности реализации КА в бесконтейнерном варианте.

С использованием накопленных данных и результатов пассивных экспериментов (наземных и в составе КА), в том числе при ограниченных пределах случайного изменения воздействий (электропитания, температуры и др.) и наличии факторов космического пространства в условиях реального времени, были сделаны следующие выводы об оптимизации процесса сбора информации и возможных технологических аспектах исследования ЭРИ в условиях натурной эксплуатации.

1. Предпочтительным является метод математического планирования эксперимента (МПЭ), что позволит увеличить объем получаемой информации, упростить обработку и интерпретацию результатов [4].

2. ЭРИ, входящие в состав выборок одинакового объема, должны одновременно использоваться как в контейнере КА, так и вне его.

3. Параллельно с выборкой, исследуемой в условиях космического пространства, необходимо исследовать выборки эквивалентного объема в наземных условиях.

4. Исследованию должны подлежать наборы ЭРИ с учетом рекомендаций разработчика в целях установления корреляции между результатами проводимых им испытаний и данными, получаемыми с борта КА, что позволит повысить их статистическую достоверность.

5. Исследованию должны подлежать элементы, изготавливаемые по однотипной технологии.

6. В процессе исследований должен быть воспроизведен весь комплекс электрических и других режимов для одноименных ЭРИ.

Реализация одного из вариантов исследования показана на рис. 1. Исследованию подвергались три набора ЭРИ — три выборки одинакового объема, два из которых устанавливались вне контейнера КА, а один — внутри. Это позволяло осуществить варьирование температуры от T_{\min} до T_{\max} (вне контейнера КА), соответствующее условиям эксплуатационной среды, путем установки плат с ЭРИ на „солнечной“ и „теневого“ сторонах КА. Одновременно контрольная плата устанавливалась в контейнере КА в условиях относительно стабильной температуры контейнера, которая обеспечивалась системой терморегулирования (СТР).

Посредством генератора управляющих воздействий, расположенного в контейнере КА, непрерывно по случайному закону обеспечивалось изменение на заданных уровнях питающих напряжений ($U_{\text{п}}$), величин нагрузки, напряжений смещения ($U_{\text{см}}$) и других воздействий в зависимости от конкретного типа ЭРИ, подвергаемых исследованию. При этом варьировался также уровень ФКП: максимальный — на выборке ЭРИ вне контейнера КА („солнечная“ сторона), минимальный — на „теневого“ стороне КА (или в контейнере). Уровни воздействий фиксировались специальными датчиками.

Параллельно эквивалентный набор ЭРИ (k образцов) подвергался таким же воздействиям (кроме ФКП) в наземных условиях.

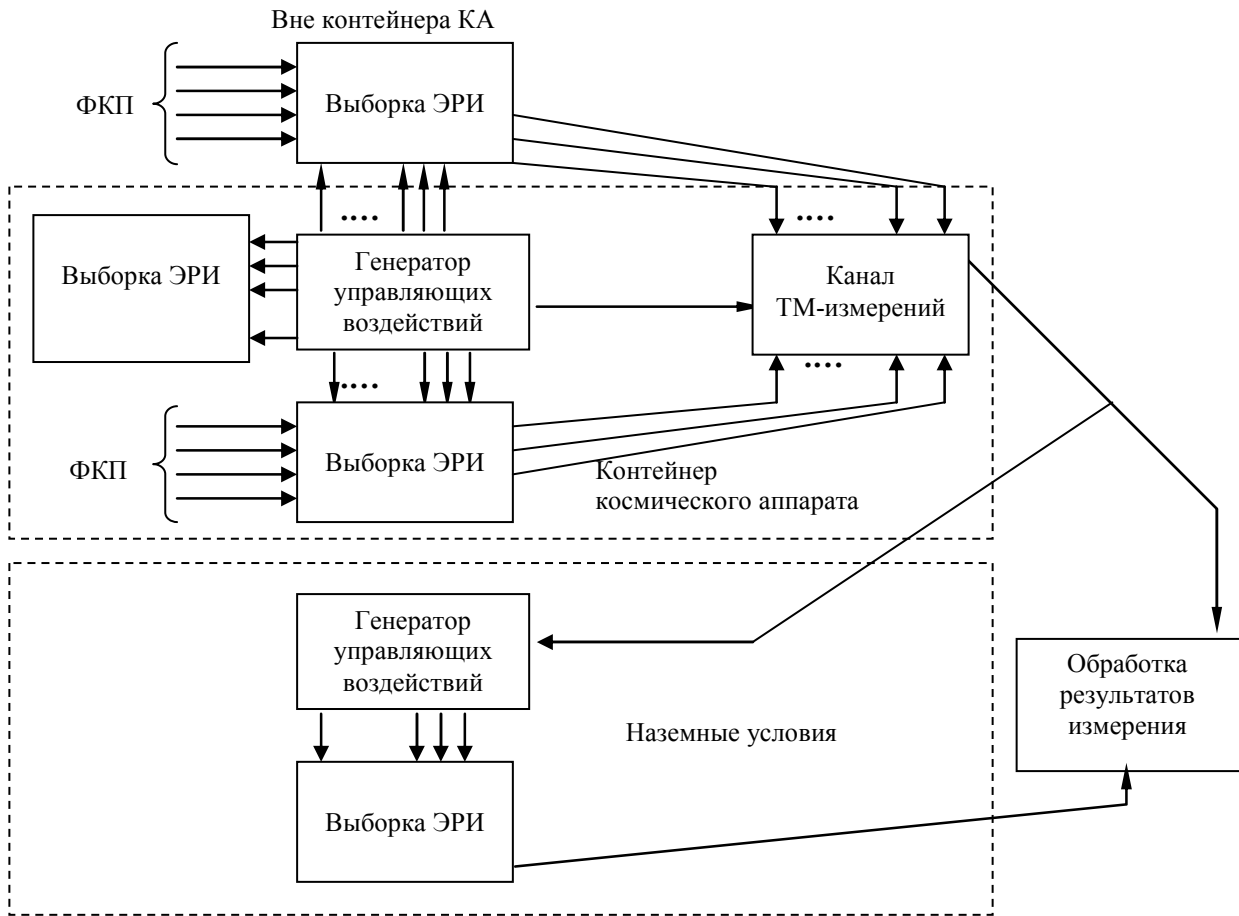


Рис. 1

С учетом результатов исследования был сформирован возможный вариант матрицы планирования, не содержащий ФКП (рис. 2) для выборки при наземных условиях.

N	U_{Π}	R_{Π}	$U_{\text{СМ}}$	T	$U_{\text{ВХ}}$	ФКП	...	$\Pi_{\text{ЭРИ}}$
1	-	-	-	-	-	-		Π_1
2	+	-	-	-	-	-		Π_2
3	-	+	-	-	-	-		Π_3
4	+	+	-	-	-	-		Π_4
5	-	-	+	-	-	-		Π_5
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
N	+	+	+	+	+	+		Π_N

Рис. 2

По результатам, полученным по каналам ТМ-измерений, были синтезированы зависимости $\Pi_{\text{ЭРИ}}^{\text{КА}} \left(\sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right)$ — полиномиальные математические модели параметров ЭРИ, построенные с использованием метода МПЭ с учетом всех воздействий, варьируемых искусственным или естественным путем (ФКП). Последний фактор, по сути, является результатом накопленных дефектов, вызывающих деградацию внутренней структуры ЭРИ с течением времени [5].

Одновременно аналогичные значения воздействий (кроме ФКП) устанавливались и для набора ЭРИ, подвергаемых исследованию в наземных условиях. По результатам была сформирована зависимость $\Pi_{\text{ЭРИ}}^3 \left(\sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right)$.

Таким образом, в течение времени эксплуатации КА в фиксированных временных сечениях формируются результаты измерений по каждой выборке, отражающие влияние различных случайных сочетаний уровней воздействий. По разности результатов между выборками, полученных при одних и тех же сочетаниях воздействий, но при разных уровнях ФКП, формировалась информация об изменениях вследствие влияния ФКП.

При реализации эксперимента был выявлен ряд обстоятельств, потребовавших уточнения методологии реализации эксперимента и обработки информации: наличие выборок ЭРИ позволяет рассматривать варианты варьирования уровней внешних воздействий и синтеза разных математических моделей по результатам исследования; сопоставление результатов бортовых и наземных измерений позволяет получать статистические данные для формирования оценочных поправок значений $P_{ЭРИ}$ за счет влияния ФКП.

Исследования ряда ЭРИ, входящих в состав устройств КА, показали:

— принципиально новые возможности метода, позволяющего максимально приблизить режимы испытаний к условиям реальной эксплуатации;

— возможность параллельной реализации и синхронизации натуральных и наземных экспериментов и получения дополнительных экспериментальных данных, которые невозможно получить в наземных условиях;

— целесообразность аккумулирования информации по применяемым ЭРИ всеми предприятиями, участвующими в создании КА, а также минимизации номенклатуры ЭРИ; актуальность планирования необходимых экспериментов и выработки единых рекомендаций по режимам применяемых ЭРИ;

— необходимость постоянного предоставления возможностей для исследования в натуральных условиях перспективных комплектующих и материалов для космической техники.

Проведенные исследования ЭРИ в наземных условиях и на борту КА позволили создать перечень ЭРИ отечественного производства для космических аппаратов со сроками активного существования 7—10 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криницкий Е. И., Александровская Л. Н. Летные испытания летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1975.
2. Баклашов Н. И. и др. Натурный эксперимент. М.: Радиосвязь, 1982.
3. Ковель А. А., Покидько С. В. Исследование влияния факторов космического пространства на параметры элементов радиоэлектронной аппаратуры // Материалы науч.-техн. конф. „Надежность и эксплуатация технических систем и комплектующих изделий“. Симферополь, 1990. С. 25—29.
4. Ковель А. А., Покидько С. В. Математическое планирование эксперимента при отработке электронных устройств // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 13—18.
5. Покидько С. В. Учет влияния внешних факторов на деградацию параметров устройств РЭА при ресурсных испытаниях // Материалы науч.-техн. конф. „Моделирование отказов и имитация на ЭВМ статистических испытаний ИМС и их элементов“. Суздаль, 1989. С. 202—203.

Сведения об авторах

- Анатолий Архипович Ковель** — д-р техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра космических информационных систем, Красноярск; E-mail: kovel.bogdan@mail.ru
- Сергей Владимирович Покидько** — канд. техн. наук; Сибирский федеральный университет, Железногорский филиал; E-mail: elin@krasmail.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

В. В. ФЕДОСОВ, В. И. ОРЛОВ

МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМЫЙ ОБЪЕМ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА ЭТАПЕ ВХОДНОГО КОНТРОЛЯ

Определен минимально необходимый объем отбраковочных испытаний изделий микроэлектроники для космических аппаратов. Предложенный подход позволяет минимизировать затраты на проведение испытаний, реализация которых способствует обеспечению надежности функционирования аппаратуры и КА в целом.

Ключевые слова: электрорадиоизделия, дополнительные отбраковочные испытания, разрушающий физический анализ, электротермотренировка.

В России отсутствуют специализированные производства электрорадиоизделий (ЭРИ) для космической отрасли, требования к качеству которых чрезвычайно высоки. Основное требование заключается в необходимости обеспечения их длительной непрерывной работоспособности в течение 10—15 лет активного существования космического аппарата (КА). Учитывая, что в партиях изделий, поступающих к изготовителю аппаратуры, всегда содержатся ЭРИ с дефектами (потенциально ненадежные), на стадии входного контроля необходимо выявить такие изделия и не допустить их к установке в аппаратуру.

Одним из наиболее эффективных методов предотвращения отказов аппаратуры являются дополнительные отбраковочные испытания и разрушающий физический анализ (РФА) [1]. Суть метода состоит в том, что потенциально ненадежные ЭРИ выявляются до момента их отказа.

В настоящее время общепринятыми считаются два направления повышения надежности ЭРИ [2]:

- устранение причин отказов за счет совершенствования конструкции изделий и технологии их изготовления;
- выявление и удаление из готовой партии изделий с дефектами до поставки потребителю.

Оба варианта обычно не реализуются, так как поставки осуществляются строго в соответствии с техническими условиями и практически отсутствует обратная связь потребитель — изготовитель. Поэтому используется третий вариант: выявление и удаление из готовой партии изделий с отказами (действительными и потенциальными) при входном контроле на предприятии-потребителе ЭРИ.

Очевидно, что при прогнозировании работоспособности ЭРИ практически невозможно учесть реальный разброс времени наработки на отказ, что связано с разбросом параметров ЭРИ и наличием в структуре изделий дефектов и неоднородностей. Поэтому даже при оптимистических результатах прогноза необходимым условием является научно-обоснованный выбор и введение дополнительных методов отбраковочных испытаний и, в первую очередь, эффективных методов диагностирования ЭРИ до установки их в бортовую аппаратуру. Физические и методологические основы применения методов диагностирования известны [3, 4].

Основными целями разработки программ дополнительных отбраковочных испытаний изделий микроэлектроники являются:

- обеспечение требуемого уровня качества и надежности;
- выявление номенклатуры потенциальных дефектов, генерируемых технологическим процессом;

— выявление эксплуатационных факторов, обуславливающих развитие дефектов и приводящих к отказам.

Необходимый уровень качества и надежности ЭРИ определяется на этапе оценки вероятности безотказной работы аппаратуры. Принципиально задача отбраковки потенциально ненадежных ЭРИ может быть решена двумя путями:

- испытанием в форсированных режимах до начала развития отказа изделия;
- применением диагностического неразрушающего контроля.

Физической основой испытаний в форсированных режимах является различная стойкость потенциально ненадежных и качественных ЭРИ к электрическим, механическим, климатическим и радиационным нагрузкам.

Показатели безотказности являются функцией внутренних параметров (X), формируемых в процессе производства, электрических нагрузок (Y) и условий эксплуатации (Z) аппаратуры. Тогда время безотказной работы можно оценить как $T_0=f(X,Y,Z)$. Так как в процессе эксплуатации электрические и механические нагрузки, а также климатические факторы неизменны для всех элементов партии изделий, то разброс времени наработки на отказ будет полностью определяться внутренними параметрами: $T_0=f(X)$.

Совокупность диагностических методов контроля основана на контроле информативных параметров. При этом предполагается, что отказы обуславливаются деградационными физико-химическими процессами, влияющими на измеряемые параметры.

Отбраковочные испытания базируются на следующих основных принципах:

- форсированная нагрузка не должна приводить к появлению новых механизмов отказов, т. е. должно выполняться условие автоточности механизмов отказов;
- каждый из видов отбраковочных испытаний направлен на активацию лишь определенных типов деградационных процессов.

Физический подход к выбору факторов, влияющих на скорость развития деградационного процесса, предполагает знание закономерностей возникновения и развития отказов. Поэтому при определении условий форсированных испытаний необходимо выбирать факторы, характерные для условий эксплуатации.

Примерный перечень потенциальных дефектов кристаллов интегральных схем (ИС) и видов отбраковочных испытаний, позволяющих выявлять эти дефекты, приведен в работе [5].

Необходимо отметить, что применение в ходе дополнительных испытаний выборочного разрушающего физического анализа позволяет существенно ограничить количество испытаний для выявления отказов, связанных с дефектами кристаллов ИС (например, таких, как загрязнение поверхности, трещина на кристалле, дефекты фотолитографии и др.), и отказов при сборке кристалла в корпусе (например, таких, как разрыв проволочного соединения, дефекты сварки, дефекты посадки кристалла и др.).

На основе проведенных исследований [5] были выделены наиболее распространенные методы отбраковочных испытаний. В табл. 1 приведены данные о среднем уровне отказов ИС при различных видах испытаний.

Таблица 1

Метод испытаний	Процент отбракованных ИС
Измерение электрических параметров	0,32
Термоциклирование	1,08
Тепловой удар	0,67
Выдержка при высокой температуре	0,04
Электротренировка	1,19—10,5
Проверка герметичности	6,21

Следует отметить, что в перечнях, приведенных в работе [5] и в табл. 1, содержатся данные, полученные при изготовлении изделий. Однако при входном контроле на предприятии-

потребителе нецелесообразно проводить такие виды испытаний, как термоциклирование и проверка герметичности. В частности, контроль герметичности в процессе изготовления проводят после операции герметизации до нанесения на корпус защитных покрытий [6]. Использование уайт-спирита и последующая промывка могут оказать негативное воздействие на защитные покрытия корпуса и маркировку готовых изделий. Контроль герметичности масс-спектрометрическим методом приводит к ложному бракованию ЭРИ из-за растворения гелия в защитном покрытии.

При изготовлении интегральных схем проводятся 100%-ные отбраковочные испытания, в состав которых включено и испытание на воздействие температуры среды. При приемосдаточных испытаниях на заводе-изготовителе испытания на воздействие температуры среды проводят на выборке изделий, которые не подлежат поставке потребителю [7]. Известно [8], что этот вид испытаний проводится для выявления дефектов корпуса. Так как данные испытания относятся к разрушающим, существует опасность не только повредить элемент и отбраковать его, но, что намного опаснее, — внести дефекты, которые могут проявиться при последующей эксплуатации.

Необходимо особо отметить, что дополнительные отбраковочные испытания — это не повторение испытаний, проводимых на заводе-изготовителе, а испытания, направленные на реализацию повышенных требований к ЭРИ для космической техники.

Таким образом, минимально необходимый объем отбраковочных испытаний должен включать:

- измерение электрических параметров;
- выборочный разрушающий физический анализ;
- испытания на наличие посторонних частиц в объеме изделия;
- электротермотренировку.

Для оценки достаточности мероприятий, проводимых при входном контроле, очень важна информация о надежности ЭРИ. Оперативность получения такой информации по результатам эксплуатации чрезвычайно низка. В этой связи актуальной становится разработка и применение специальных методов прогнозирования надежности ЭРИ. Дополнительные испытания на предприятии-потребителе ЭРИ [1, 9, 10]) позволяют повысить качество партий изделий, предназначенных для установки в бортовую аппаратуру, снизить интенсивность отказов определенного количества (выборки) ЭРИ за счет исключения изделий со скрытыми дефектами, а также оценить коэффициент, уточняющий приводимые в справочных данных значения базовой интенсивности отказов [11]. При этом наиболее эффективным видом испытаний является электротермотренировка (ЭТТ) с обязательной оценкой дрейфа параметров и классификацией изделий по данному признаку [1].

Определив виды дополнительных испытаний, необходимо выбрать и их режимы. Только ЭТТ требует выбора температурного режима испытаний и его продолжительности, причем в зависимости от технологии изготовления и типов изделий микроэлектроники ЭТТ может быть динамической, статической, с обратным напряжением смещения $p-n$ -переходов и др. При выборе температуры ЭТТ следует принимать во внимание коэффициенты ускорения деградационных явлений для различных энергий активации дефектов, а также факт отсутствия достаточно точных количественных оценок коэффициентов ускорения развития потенциальных дефектов. Это связано с недостаточным знанием закономерностей дефектообразования в реальных элементах, а также сложностью и высокой стоимостью экспериментального получения таких оценок [12].

В табл. 2 приведены значения коэффициента (K) ускорения деградационных явлений относительно $T = 25$ °С при различных значениях энергии активации (E).

Таблица 2

Условная температура, °С	K, при E, эВ				
	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2
50	2,47	4,51	11,1	20,3	37,1
75	5,35	16,4	87,7	268	8,22
100	10,5	50,1	524	2507	1210
125	18,8	133	2500	1770	1250
150	31,5	315	9920	9910	9880

При определении необходимого объема дополнительных отбраковочных испытаний нельзя не упомянуть о таком критерии, как допустимый процент отказов ЭРИ в проверяемой партии изделий. Данный критерий установлен в программах испытаний для КА различного назначения в разных вариациях (от 0 до 15 %). Применение этого критерия, возможно, оправдано при изготовлении изделий микроэлектроники, так как согласно общим техническим условиям [7] приемосдаточные испытания ИС проводятся на выборке от партии изделий. Учитывая, что отбраковочным испытаниям подвергаются все элементы проверяемой партии (100 %), то определение допустимого процента отказов не имеет физического смысла (не отражает качества изготовления производственной партии) и зависит только от объема закупленной партии ЭРИ.

Итак, определен минимально необходимый состав 100%-ных дополнительных испытаний изделий микроэлектроники для применения в аппаратуре космических аппаратов; при этом учтено, что отбраковочные испытания — это испытания, направленные на реализацию повышенных требований к ЭРИ для космической техники. Предложенный подход позволяет минимизировать затраты на проведение испытаний, так как их объем строго подчинен технической целесообразности.

Реализация дополнительных отбраковочных испытаний ЭРИ при создании КА „SESAT“ [13], первого отечественного КА с гарантируемым (и фактическим на сегодня) сроком активного существования — 10 лет, стала одним из основных факторов обеспечения надежности функционирования аппаратуры и КА в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов В. В., Патраев В. Е. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 10. С. 50—55.
2. Горлов М., Ануфриев Л., Строгонов А. Отбраковочные технологические испытания как средство повышения надежности партий ИС // Chip News. 2001. N 5.
3. РД 11 0682-89. Микросхемы интегральные. Методы неразрушающего контроля диагностических параметров. Введ. с 01.01.90.
4. РД В 22.32.119-89. Методическое пособие по выбору и использованию методов и средств электрофизического диагностирования электрорадиоизделий. 1989.
5. Андреев А. И., Катеринич И. И., Попов В. Д. Надежность и контроль качества интегральных микросхем (конспект лекций) Ч. 2. Контроль качества. М.: МИФИ, 2004. 120 с.
6. ОСТ В 11 0219. Приборы полупроводниковые. Методы технологических (отбраковочных) испытаний. М.: 1985.
7. ОСТ В 11 0998. Микросхемы интегральные. Общие технические условия. М.: 1999.
8. Горлов М. И., Королев С. Ю. Физические основы надежности интегральных схем: Учеб. пособие. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1995. 200 с.

9. ОТ 510-5608-05. Анализ технического состояния и оценка уровня фактической надежности и готовности к целевому использованию космических аппаратов народно-хозяйственного назначения по результатам изготовления и эксплуатации в 2005 г. Анализ динамики изменения показателей надежности за период с 1994 по 2005 гг. Железногорск, 2005.
10. Данилин Н. С. Информационные технологии и сертификация элементной базы новых российских телекоммуникаций: Учеб. пособие. М., 2000. 47 с.
11. Надежность ЭРИ: Справочник М.: Изд. 22 ЦНИИИ МО, 1992; 2000; 2002; 2006.
12. Урличич Ю. М., Данилин Н. С. Управление качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях глобальной открытой экономики. М.: Макс Пресс, 2003.
13. Космический аппарат „SESAT“ со сроком активного существования 10 лет. Принципы, методы и результаты комплектации аппаратуры электрорадиоизделиями: Техн. отчет / НПО прикладной механики; А. Г. Козлов, Ш. Н. Исляев, В. В. Федосов и др. Красноярск, 1999. 408 с.

Сведения об авторах

- Виктор Владимирович Федосов** — ОАО „Испытательный технический центр — НПО ПМ“, Железногорск, Красноярский край; зам. директора
- Виктор Иванович Орлов** — ОАО „Испытательный технический центр — НПО ПМ“, Железногорск, Красноярский край; директор

Рекомендована ОАО „ИСС“

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОТРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

УДК 519.688

К. В. БОГДАНОВ, А. Н. ЛОВЧИКОВ

АРХИТЕКТУРА EDA-СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КОНКУРИРУЮЩИХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Предлагается архитектура EDA-системы, в которой отсутствует единая математическая модель анализируемого устройства и вместо этой модели реализуется совокупность элементарных моделей, при этом для каждой из них выделен отдельный вычислительный процесс. Вычислительные процессы выполняются в распределенной виртуальной вычислительной машине, и обмен асинхронными сообщениями между процессами осуществляется по маршрутам, определяемым топологией исходной системы. Данный подход позволяет избежать влияния нелинейностей на точность моделирования.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, EDA-системы, архитектура программного обеспечения.

Моделирование и анализ работы электронного оборудования — весьма сложная задача, для решения которой активно используется специализированное программное обеспечение — EDA-системы. Развитие таких систем осуществляется в основном экстенсивным путем. Как правило, улучшаются пользовательские интерфейсы, расширяются базы данных электронных компонентов и т.п., в то время как основные вычислительные алгоритмы остаются прежними. Существующие методы анализа, используемые в EDA-системах, сводятся к решению результирующей системы линеаризованных дифференциальных уравнений, являющейся математической моделью моделируемого устройства. Численные методы решения при этом позволяют получать весьма точные результаты, но проблемы возникают при моделировании систем с большим количеством электронных компонентов, что приводит к усложнению математической модели, а также при моделировании систем, имеющих существенные нелинейности, которые значительно огрубляют результаты моделирования либо вообще приводят к расхождению вычислительного процесса [1—3].

В связи с этим предлагается диаметрально противоположный подход: каждый блок либо компонент устройства должен быть смоделирован отдельно. Реализация полученных моделей должна осуществляться с использованием отдельных вычислительных процессов. При этом если моделирование выполняется в некотором диапазоне времени, то на один или несколько логических входов каждого из таких вычислительных процессов должны поступать некоторые параметры (например, мгновенное значение напряжения относительно общей шины питания). Эти процессы также должны выдавать в качестве выходных данных результаты обработки входных параметров.

Основные проблемы, связанные с такой схемой работы, заключаются в том, что необходимо обеспечить высокую степень взаимной изолированности вычислительных процессов, сохраняя возможность синхронизированного обмена данными. Можно провести аналогию с современными вычислительными сетями, где каждый компьютер максимально „самостоятелен“, но имеет возможность обмена данными, разбитыми на пакеты, с любым другим компьютером сети в произвольный момент времени. Существенным отличием предлагаемого подхода является то, что при каждом процессе прием и передача информации должны осуществляться строго по синхронизирующему сигналу. В случае если это требование не выполняется по каким-либо причинам, возможны два подхода: ожидание либо уничтожение результатов процесса. В первом случае ни один набор данных, поступивших при выполнении других процессов модели, не будет принят и не будет передан, пока не будут получены результаты всех процессов модели. Во втором случае процессы, данные которых не получены по истечении установленного времени, будут уничтожены либо перезапущены, а недостающие значения будут заменены на нулевые либо заранее заданные. Возможна и гибридная стратегия, когда результаты процесса уничтожаются после некоторого ожидания.

Реализация асинхронного обмена сообщениями (как, например, в вычислительных сетях на основе технологии Ethernet) может повлечь за собой серьезную проблему: результаты моделирования будут зависеть от производительности системы, и без предварительного профилирования реализовать модель не получится.

Как при асинхронном, так и при синхронном обмене данными необходим отдельный процесс-маршрутизатор. В его функции входит сбор данных, полученных при выполнении остальных процессов, уничтожение результатов процессов, данные которых не были получены в течение отведенного интервала времени, рассылка данных по процессам в соответствии

с таблицей взаимосвязей. Наглядно потоки данных представлены на DFD-диаграмме в нотации Гейна — Сарсона [4] на рис. 1.

Техническая реализация в этом случае требует наличия среды, обеспечивающей одновременное (параллельное) выполнение большого количества несложных вычислительных процессов, которые реализуют атомарные блоки системы, и поддерживающей обмен сообщениями между этими несложными процессами.

Наиболее подходящей для реализации средой представляется Erlang

(Эрланг) — функциональный язык программирования (разработан и поддерживается компанией “Ericsson”), позволяющий разрабатывать программное обеспечение для разного рода распределенных систем. Язык Erlang включает в себя средства, определяющие порождение параллельных процессов и их коммуникацию с помощью посылки асинхронных сообщений. Программа транслируется в байт-код, исполняемый виртуальной машиной, что обеспечивает возможность ее выполнения в различных операционных системах. Функциональная парадигма языка Erlang позволяет избежать таких традиционных для императивных языков проблем распределенных приложений, как необходимость синхронизации, опасность возникновения тупиков и гонок [5].

Запущенный экземпляр эмулятора Erlang называется узлом. Узел имеет уникальный идентификатор и содержит информацию о существовании других узлов на данной машине или в сети. Создание и взаимодействие процессов в разных узлах не отличается от взаимо-

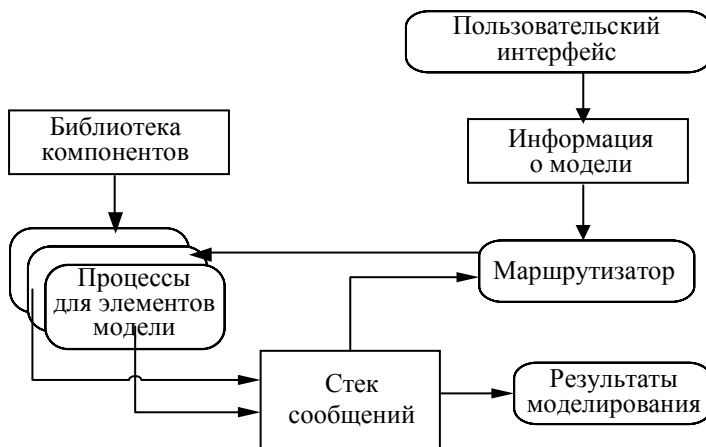


Рис. 1

действия процессов внутри узла. Для создания дочернего процесса необходимо знать лишь его идентификатор (имя). При этом нет необходимости в указании конкретного физического узла, на котором этот процесс будет выполняться. Этим обуславливается высокая масштабируемость и способность почти линейного повышения производительности системы (кластера) с ростом ее мощности [6].

Между процессами, моделирующими каждый отдельный элемент схемы, может быть осуществлен обмен сообщениями (кортежами) вида:

```
{<имя корневого процесса>, <номер элемента>, <номер вывода>,
<тип сигнала1>, <величина сигнала 1>..., <тип сигнала n>,
<величина сигнала n>}.
```

Простейший процесс, моделирующий элемент схемы, на языке Erlang описывается следующим образом (Server_Node — заранее определенное имя сервера, modeling — имя исполняемой программы):

```
element(Server_Node) ->
  receive
  stop ->
    exit(normal);
    {pin_number, signal1_type, signal1} ->
      % обработка входных значений %,
      {modeling, Server_Node}!{self(), element_number, pin_number, signal1_type, signal1 }
  end.
```

Шаблон маршрутизатора описывается следующим образом (Element_List — список всех элементов):

```
server(Element_List) ->
  receive
    {element_number, pin_number, signal1_type, signal1} ->
      % описание таблицы маршрутизации %
      element_number ! {pin_number, signal1_type, signal1 }
  end.
```

Количество рассылаемых сообщений будет зависеть исключительно от топологии моделируемой системы, в примере показан простой вариант без множественных соединений типа „один выход — много входов“.

Для функционирования системы необходимо иметь несколько различных типов элементов (процессов).

1) Обычный процесс (передаточная функция, пример реализации приведен выше) — обеспечивает преобразование входного потока данных в выходной; в каждый момент синхронизации осуществляется прием и передача одного набора (кортежа) данных.

2) Маршрутизатор — обеспечивает перераспределение сигналов по нескольким выходным каналам в зависимости от соотношения количества входов и выходов (маршрутизатор, по сути, является совокупностью всех узлов); простейший пример симметричного (распределяющего входные сигналы равномерно) маршрутизатора размерности „2 на 3“ имеет следующий вид:

```
commutator(Server_Node) ->
  receive
  stop ->
    exit(normal);
    {pin1, signal1_type, signal1},{pin2, signal2_type, signal2} ->
      signal1_type -> signal1_type, signal2_type, signal1_type
      (signal1+signal2)/3-> signal1, signal2, signal3
  {modeling, Server_Node}!{self(), output1, 1, signal1_type,
```

```

signal1},{self(), output2, 2, signal2_type, signal2},{self(),
output3, 3, signal3_type, signal3 }
end.

```

3) Источник — обеспечивает выдачу сигналов, входов не имеет; простейший пример источника с одним выходом:

```

commutator(Server_Node) ->
  receive
  stop ->
    exit(normal);
  { } ->
{modeling, Server_Node}!{self(), output1, 1, type1, 100}
end.

```

4) Выход — псевдоблок, необходимый для получения текущих значений параметров для анализа процесса, является адаптером между моделью и пользовательским интерфейсом; имеет один вход, выходов нет.

Одна из важнейших процедур при создании подобной модели — построение таблицы маршрутизации по пользовательской модели (к примеру, по принципиальной электрической схеме). На основе этой информации также должны быть созданы процессы-коммутаторы.

После запуска системы все ее элементы осуществляют передачу сообщений маршрутизирующему процессу — серверу, который выполняет их распределение в соответствии с заданной топологией моделируемой системы.

В целом, программный продукт, построенный на основе данной схемы, состоит из следующих компонентов:

- ядро системы — виртуальная машина Erlang, основные функции — моделирование;
- библиотека компонентов — хранилище процедур на декларативном языке Erlang;
- схема построения модели — приложение на императивном языке высокого уровня (например, C#), формирующее в автоматическом режиме матрицу взаимосвязей для маршрутизатора и исходный Erlang-код всех процессов модели;
- графический интерфейс — приложение на императивном языке высокого уровня, обеспечивающее ввод и вывод информации для пользователя.

Упрощенная UML-диаграмма работы (activity) приложения [4], построенного на основе данной архитектуры, приведена на рис. 2.

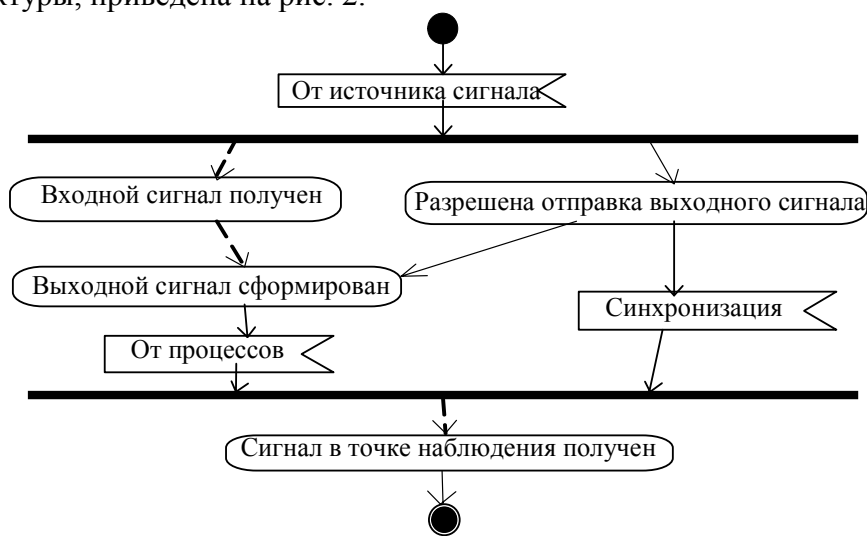


Рис. 2

Реализация системы, основанной на описанной архитектуре, позволяет повысить точность и скорость моделирования систем с существенными нелинейностями, а также проводить моделирование в течение длительных интервалов времени без риска потерь данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайнеман Р. PSpice. Моделирование работы электронных схем: Пер. с нем. М.: ДМК Пресс, 2001. 336 с.
2. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 336 с.
3. Численные методы, параллельные вычисления и информационные технологии: Сб. науч. трудов / Под ред. Вл. В. Воеводина и Е. Е. Тыртышниковой. М.: Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2008. 320 с.
4. Киммел П. UML. Основы визуального анализа и проектирования: Пер. с англ. М.: НТ Пресс, 2008. 272 с.
5. Open Source Erlang [Электронный ресурс, англ.]: <<http://www.erlang.org/>>.
6. Armstrong J. Programming Erlang: Software for a Concurrent World. Lewisville, USA: Pragmatic Bookshelf (The Pragmatic Programmers, LLC), 2007. 440 с.

Сведения об авторах

- Константин Валериевич Богданов** — канд. техн. наук, доцент; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра информатики и вычислительной техники, Красноярск; E-mail: darkstone@rambler.ru
- Анатолий Николаевич Ловчиков** — д-р техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра информатики и вычислительной техники, Красноярск; E-mail: lanlov8@mail.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

УДК 681.513

А. В. ЛАПКО, В. А. ЛАПКО

**НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ
В ЗАДАЧЕ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ
О РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН**

Предлагается методика проверки гипотез о тождественности законов распределения случайных величин, основанная на использовании непараметрических алгоритмов распознавания образов и принципов коллективного оценивания. Приводятся результаты сравнения методики с критерием Колмогорова — Смирнова.

Ключевые слова: непараметрическая статистика, распознавание образов, проверка гипотез, распределения случайных величин.

Проверка гипотез о распределениях случайных величин является одной из ключевых задач математической статистики и имеет важное прикладное значение, например, при сравнении эффективности приборов и систем контроля с данными их испытаний. Для проверки гипотез о распределениях случайных величин широко используется критерий согласия Пирсона, который не зависит от распределений случайных величин и их размерности [1]. Однако методика формирования критерия Пирсона содержит трудноформализуемый этап разбиения области возможных значений случайной величины на многомерные интервалы. Данный этап не отражен в критерии Колмогорова — Смирнова, который позволяет проверять гипотезы о распределениях одномерных случайных величин [2].

В работе [3] показана возможность использования непараметрических алгоритмов распознавания образов, соответствующих критерию максимального правдоподобия,

в задаче проверки статистических гипотез о распределениях случайных величин. Результаты использования предлагаемой методики сопоставимы с критерием Колмогорова — Смирнова для одномерных задач в условиях, когда число элементов сравниваемых последовательностей случайных величин различается незначительно. При неравных объемах случайных последовательностей эффективность предлагаемой методики снижается. Данный факт согласуется с результатами исследований [4], где показано значительное ухудшение аппроксимационных свойств непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности между классами при увеличении степени неравномерности распределения элементов обучающей выборки.

Цель исследования, описываемого в настоящей статье, — развитие данной методики на основе использования принципов коллективного оценивания при синтезе непараметрических алгоритмов распознавания образов.

Модифицированная методика проверки гипотезы о распределениях случайных величин. Пусть X_1 и X_2 — генеральные совокупности с произвольными законами распределения. Необходимо по независимым выборкам $V_1 = x^i, i = \overline{1, n_1}$, и $V_2 = x^i, i = \overline{1, n_2}$, полученным из данных генеральных совокупностей, проверить либо опровергнуть гипотезу

$$H_0 : P_1(x) \equiv P_2(x)$$

о тождественности функций распределения.

Известно, что если при решении двухальтернативной задачи распознавания образов вероятность ошибки классификации равна 0,5, то законы распределения случайных величин в области определения классов совпадают. Поэтому появляется возможность перехода от задачи сравнения законов распределения случайных величин к проверке гипотезы \bar{H}_0 о равенстве статистической оценки вероятности ошибки распознавания образов значению 0,5.

При реализации предлагаемой модифицированной методики необходимо выполнить следующие действия.

1. Пусть число элементов сравниваемых последовательностей случайных величин отличается значительно, например $n_1 > n_2$. Требуется сформировать совокупность сравниваемых последовательностей $V_1(j) = x^i, i \in I_j, V_2 = x^i, i = \overline{1, n_2}, j = \overline{1, T}$. Элементы выборки $V_1(j)$ объемом n_2 формируются случайным образом из последовательности V_1 ; здесь I_j — множество номеров элементов последовательности V_1 , составляющих последовательность $V_1(j)$. Присвоим элементам множества I_j значения $n_2 + t, t = \overline{1, n_2}$.

2. На основе множеств $V_1(j), V_2$ определить обучающую выборку $V(j) = (x^i, \sigma(i), i = \overline{1, 2n_2})$ для решения задачи распознавания образов, где

$$\sigma(i) = \begin{cases} -1 \forall x^i \in \Omega_1, \\ 1 \forall x^i \in \Omega_2 \end{cases}$$

свидетельствует о принадлежности значения x^i к тому либо иному классу Ω_1, Ω_2 . При этом полагаем, что элементы множеств $V_1(j)$ и V_2 принадлежат соответственно классам Ω_1, Ω_2 .

3. По выборке $V(j)$ осуществить синтез непараметрического алгоритма распознавания образов, соответствующего критерию максимального правдоподобия [5]:

$$\bar{m}_j(x) : \begin{cases} x \in \Omega_1 \quad \forall \quad \bar{f}_{12}^j(x) \leq 0, \\ x \in \Omega_2 \quad \forall \quad \bar{f}_{12}^j(x) > 0. \end{cases} \quad (1)$$

При формировании оценки уравнения разделяющей поверхности

$$\bar{f}_{12}^j(x) = \bar{p}_2(x) - \bar{p}_1^j(x) \quad (2)$$

будем использовать непараметрические оценки

$$\bar{p}_2(x) = (n_2 c)^{-1} \sum_{i=1}^{n_2} \Phi\left(\frac{x - x^i}{c}\right),$$

$$\bar{p}_1^j(x) = (n_2 c)^{-1} \sum_{i=n_2+1}^{2n_2} \Phi\left(\frac{x - x^i}{c}\right)$$

плотностей вероятности распределения x в классах Ω_1, Ω_2 типа Розенблатта — Парзена [6].

Ядерные функции $\Phi(u)$ удовлетворяют условиям $\Phi(u) = \Phi(-u)$, $0 \leq \Phi(u) < \infty$,

$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(u) du = 1$, а значения их коэффициентов размытости c убывают с увеличением n_2 .

Тогда статистика (2) может быть представлена выражением

$$\tilde{f}_{12}^j(x) = (n_2 c)^{-1} \sum_{i=1}^{2n_2} \sigma(i) \Phi\left(\frac{x - x^i}{c}\right). \quad (3)$$

Выбор оптимального значения \bar{c} коэффициента размытости непараметрического решающего правила $\bar{m}_j(x)$ осуществляется согласно условию минимума оценки вероятности ошибки распознавания образов

$$\bar{p}_j(c) = \frac{1}{2n_2} \sum_{t=1}^{2n_2} 1(\sigma(t), \bar{\sigma}(t)),$$

где индикаторная функция

$$1(\sigma(t), \bar{\sigma}(t)) = \begin{cases} 0 & \forall \quad \sigma(t) = \bar{\sigma}(t); \\ 1 & \forall \quad \sigma(t) \neq \bar{\sigma}(t), \end{cases}$$

здесь $\bar{\sigma}(t)$ — „решение“ алгоритма $\bar{m}_j(x)$ о принадлежности значений x^t к тому либо иному классу Ω_1, Ω_2 , полученное в соответствии с правилом (1).

При вычислении $\bar{p}_j(c)$ „решение“ $\bar{\sigma}(t)$ алгоритма (1) определяется в соответствии со знаком статистики

$$\tilde{f}_{12}^j(x^t) = (n_2 c)^{-1} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq t}}^{2n_2} \sigma(i) \Phi\left(\frac{x^t - x^i}{c}\right),$$

т.е. значение x^t исключается.

4. Проверить гипотезу $\bar{H}_0(j) : \bar{p}_j(\bar{c}) = 0,5$ в соответствии с критерием Колмогорова — Смирнова. Для этого сравним его пороговое значение [7]

$$D_\alpha = \sqrt{-\ln\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{1}{4n_2}}$$

с отклонением $\bar{D}_{12}^j = |0,5 - \bar{p}_j(\bar{c})|$; здесь α — вероятность (риск) отвергнуть правильную гипотезу $\bar{H}_0(j)$.

Если выполняется соотношение $\bar{D}_{12}^j < D_\alpha$, то гипотеза $\bar{H}_0(j)$ справедлива, иначе — она отвергается.

5. В соответствии с пп. 2—4 проверить гипотезы $\bar{H}_0(j)$ на основе последовательностей случайных величин $V_1(j), V_2, j = \overline{1, T}$. По полученным данным рассчитать оценки вероятностей $\bar{P}_1 = S/T, \bar{P} = \bar{S}/T$ справедливости гипотезы \bar{H}_0 и ее отклонения соответственно. Здесь S — количество „решений“ о справедливости гипотез $\bar{H}_0(j), j = \overline{1, T}$, а \bar{S} — количество решений об их отклонении.

6. Проверить достоверность отличия оценок \bar{P}_1 и \bar{P} с использованием критерия Колмогорова — Смирнова. Для этого вычислим его пороговое значение

$$D_\alpha = \sqrt{-\ln \frac{\alpha}{2} / T},$$

которое сравним с разностью $\bar{D} = |\bar{P}(T) - \bar{P}_1(T)|$.

Исходная гипотеза H_0 подтверждается, если $\bar{D} > D_\alpha$ и $\bar{P}_1 > \bar{P}$, в противном случае при $\bar{P}_1 < \bar{P}$ она отвергается.

Анализ результатов экспериментов. Было проведено сравнение эффективности базовой [3] и модифицированной методик проверки гипотезы о распределениях случайных величин и критерия Колмогорова — Смирнова по данным вычислительных экспериментов. Последовательности $V_1 = x^i, i = \overline{1, n_1}$, и $V_2 = x^i, i = \overline{1, n_2}$, случайных наблюдений формировались на основе датчиков случайных величин с равномерным $x^i = \varepsilon^i$ и нормальным $x^i = 0,5 + 0,15 \left(\sum_{j=1}^{12} \varepsilon^j - 6 \right), i = \overline{1, n}$, законами распределения. Случайные величины ε с равномерным законом распределения определены на интервале $[0, 1]$. При их формировании использовался стандартный датчик псевдослучайных величин среды визуального программирования „Delphi“.

При фиксированных условиях исследования было проведено 100 вычислительных экспериментов. По полученным результатам при априори тождественных законах распределения случайных величин оценивалась вероятность P_0 справедливости гипотезы H_0 . Если законы распределения отличались, оценивалась вероятность P_1 отклонения гипотезы H_0 . Риск α отвергнуть гипотезу H_0 принимался равным 0,05.

При синтезе непараметрического классификатора использовались параболические ядерные функции Епанечникова [8].

Результаты вычислительного эксперимента при различных условиях проверки гипотезы о распределениях представлены на рис. 1 и 2: рис. 1 — зависимости оценок вероятностей P_0 справедливости гипотезы H_0 от объема экспериментальных данных $n = n_1 + n_2$

для $n_1 = 1,2n_2$ (а) и $n_1 = 2n_2$ (б) при сравнении двух априори тождественных нормальных законов распределения случайных величин; кривая 1 получена при использовании критерия Колмогорова — Смирнова, кривая 2 — базовой методики [3], кривая 3 — модифицированной методики при $T = 10$; рис. 2 — зависимости оценок вероятностей P_1 отклонения гипотезы H_0 от объема экспериментальных данных $n = n_1 + n_2$ для $n_1 = 2n_2$ при сравнении равномерного и нормального законов распределения (обозначения кривых соответствуют принятым для рис. 1).

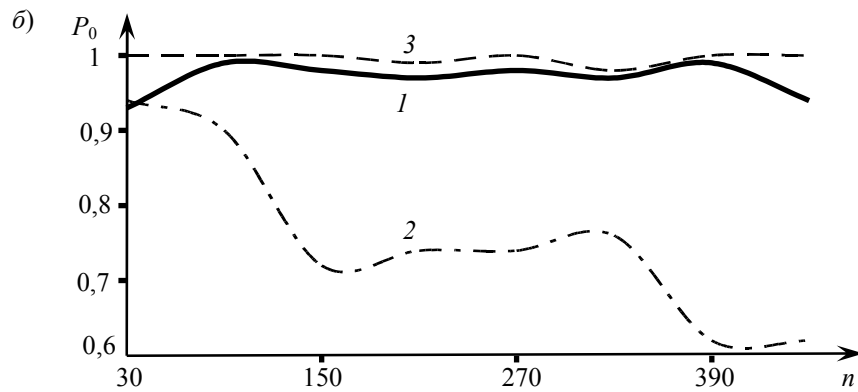
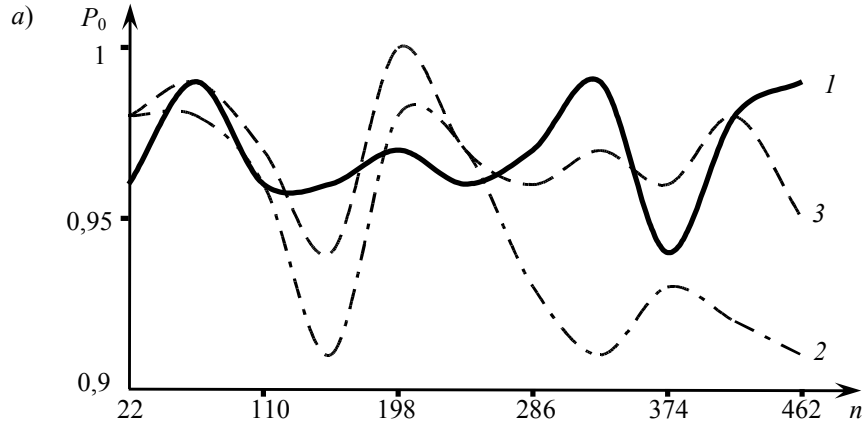


Рис. 1

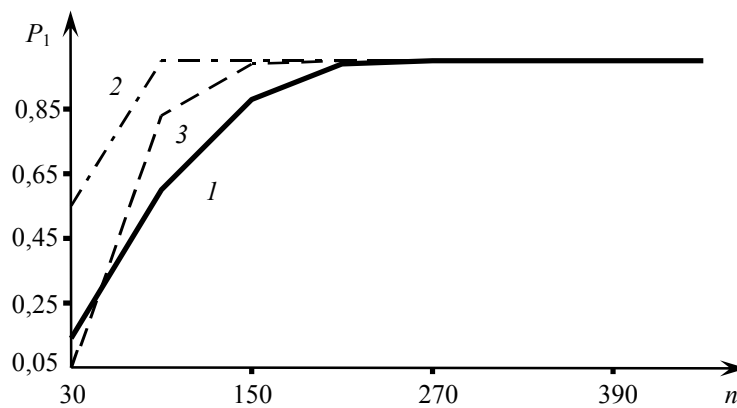


Рис. 2

Представленные графики подтверждают эффективность модифицированной методики.

Заключение. Применение рассмотренной модифицированной методики позволяет расширить условия проверки гипотез о распределениях. Эффективность предложенной методики сопоставима с критерием Колмогорова — Смирнова для одномерных задач. Полученные результаты могут быть обобщены для задачи проверки гипотез о тождественности законов распределения многомерных случайных величин.

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, выполнены в рамках Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг., гос. контракт № 02.740.11.0621.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979.
2. Смирнов Н. В. Оценка расхождения между кривыми распределения в двух независимых выборках // Бюл. Моск. ун-та. 1930. Т. 2, № 2. С. 3—14.
3. Лапко А. В., Лапко В. А. Применение непараметрического алгоритма распознавания образов в задаче проверки гипотезы о распределениях случайных величин // Системы управления и информационные технологии. 2010. № 3(41). С. 8—11.
4. Лапко А. В., Лапко В. А. Анализ асимптотических свойств непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности в двухальтернативной задаче распознавания образов // Автометрия. 2010. Т. 46, № 3. С. 48—53.
5. Лапко А. В., Лапко В. А., Соколов М. И., Ченцов С. В. Непараметрические системы классификации. Новосибирск: Наука, 2000.
6. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode // Ann. Math. Statistic. 1962. Vol. 33, N 3. P. 1065—1076.
7. Шаракшанэ А. С., Железнов И. Г., Ивницкий В. А. Сложные системы. М.: Высш. школа, 1977.
8. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятности и ее применения. 1969. Т. 14, вып. 1. С. 156—161.

Сведения об авторах

- Александр Васильевич Лапко** — д-р техн. наук, профессор; Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск; E-mail: lapko@icm.krasn.ru
- Василий Александрович Лапко** — д-р техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра космических средств и технологий, Красноярск; E-mail: lapko@icm.krasn.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

А. В. ЛАПКО, В. А. ЛАПКО, А. Н. ХЛОПОВ

**НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ
АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Предлагается непараметрический алгоритм автоматической классификации статистических данных, основу которого составляют оценки плотности вероятности парзеновского типа. Применение алгоритма позволяет выделять компактные множества точек, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности.

Ключевые слова: непараметрическая статистика, автоматическая классификация, распознавание образов, плотность вероятности.

Методы автоматической классификации статистических данных широко используются при разработке математического обеспечения аппаратно-программных комплексов технического зрения, а также при создании систем обработки данных дистанционного зондирования Земли. Среди алгоритмов автоматической классификации, основанных на явном определении класса, следует отметить те, которые ориентированы на обнаружение множества объектов, соответствующих одномодальным фрагментам совместной плотности вероятности в заданном пространстве признаков [1, 2]. Определение класса связано с понятием закономерности в вероятностном смысле и имеет прикладную направленность в задачах синтеза структуры сложных систем, аппроксимации неоднозначных стохастических зависимостей.

Широкое распространение получили методы, основанные на оценивании смеси плотностей вероятности при неизвестном количестве классов и последующем анализе с помощью оптимизационных алгоритмов [3]. Выделение абстрактных образов рассматривается как поиск локальных экстремумов — максимумов непараметрической оценки плотности вероятности смеси. Однако реализация этого метода требует решения большого количества оптимизационных задач, равного числу классифицируемых объектов.

В настоящей статье задача автоматической классификации статистических данных решается формализованно в рамках задачи распознавания образов с помощью итерационной процедуры последовательного восстановления непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности между классами, соответствующими одномодальным фрагментам совместной плотности вероятности.

Базовый алгоритм классификации. Пусть имеется выборка $V = x^i, i = \overline{1, n}$, составленная из значений признаков $x = x_v, v = \overline{1, k}$, классифицируемых объектов. Необходимо разбить выборку V на группы компактных точек (классов), соответствующих одномодальным фрагментам совместной плотности вероятности $p(x)$. Априори количество M классов и вид $p(x)$ неизвестны.

При синтезе данного базового алгоритма полагается, что минимальное расстояние между элементами класса Ω_j и области $\Omega_{\bar{j}} = \bigcup_{\substack{\lambda=1, \\ \lambda \neq j}}^M \Omega_\lambda$ больше порогового значения d :

$$\min_{x^i, x^t} \max_{v=1, k} |x_v^i - x_v^t| > d, \quad x^i \in \Omega_j, x^t \in \Omega_{\bar{j}}. \quad (1)$$

Восстановим непараметрическое уравнение разделяющей поверхности между классом Ω_j и областью $\Omega_{\bar{j}}$, которое представляется следующим образом [4]:

$$\bar{f}_{j\bar{j}}(x) = \frac{1}{n \prod_{v=1}^k c_v} \sum_{i=1}^n \sigma(i) \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v}\right), \quad (2)$$

где ядерные функции $\Phi(u)$ удовлетворяет условиям

$$0 \leq \Phi(u) < \infty, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(u) du = 1, \quad \Phi(u) = \Phi(-u), \quad \int_{-\infty}^{+\infty} u^2 \Phi(u) du = 1,$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u^m \Phi(u) du < \infty \quad \forall 0 \leq m < \infty,$$

а $c_v = c_v(n)$, $v = \overline{1, k}$, — последовательности коэффициентов размытости ядерных функций, убывающие с увеличением n .

Для восстановления непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности (2) необходимо идентифицировать

$$\sigma(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } x^i \in \Omega_j; \\ -1, & \text{если } x^i \in \Omega_{\bar{j}}, \end{cases}$$

и определить оптимальные значения $c_v = c_v(n)$, $v = \overline{1, k}$.

Определим коэффициенты размытости для $\bar{f}_{j\bar{j}}(x)$ исходя из условия минимума критерия

$$W_1(c) = \int_{-\infty}^{+\infty} (f_{j\bar{j}}(x) - \bar{f}_{j\bar{j}}(x))^2 dx. \quad (3)$$

В выражении (3) статистика

$$\bar{f}_{j\bar{j}}(x) = \bar{P}_j \bar{p}_j(x) - \bar{P}_{\bar{j}} \bar{p}_{\bar{j}}(x)$$

является оценкой байесовского уравнения разделяющей поверхности [2]

$$f_{j\bar{j}}(x) = P_j p_j(x) - P_{\bar{j}} p_{\bar{j}}(x),$$

где P_j , $P_{\bar{j}}$ — априорные вероятности принадлежности значения x к j -му классу и области $\Omega_{\bar{j}}$, а \bar{P}_j , $\bar{P}_{\bar{j}}$ — их статистические оценки.

При синтезе $\bar{f}_{j\bar{j}}(x)$ используются непараметрические оценки плотности вероятности типа Розенблатта — Парзена [5]: например,

$$\bar{p}_j(x) = \frac{1}{n_j \prod_{v=1}^k c_v} \sum_{i \in I_j} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v}\right),$$

где I_j — множество элементов j -го класса из выборки V , а n_j — их количество.

Преобразуем выражение (3):

$$\begin{aligned} W_1(c) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left(P_j p_j(x) - P_{\bar{j}} p_{\bar{j}}(x) - \bar{P}_j \bar{p}_j(x) + \bar{P}_{\bar{j}} \bar{p}_{\bar{j}}(x) \right)^2 dx = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\left(P_j p_j(x) - \bar{P}_j \bar{p}_j(x) \right) - \left(P_{\bar{j}} p_{\bar{j}}(x) - \bar{P}_{\bar{j}} \bar{p}_{\bar{j}}(x) \right) \right]^2 dx = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left(P_j p_j(x) - \bar{P}_j \bar{p}_j(x) \right)^2 dx + \int_{-\infty}^{+\infty} \left(P_{\bar{j}} p_{\bar{j}}(x) - \bar{P}_{\bar{j}} \bar{p}_{\bar{j}}(x) \right)^2 dx - \\ &\quad - 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \left(P_j p_j(x) - \bar{P}_j \bar{p}_j(x) \right) \left(P_{\bar{j}} p_{\bar{j}}(x) - \bar{P}_{\bar{j}} \bar{p}_{\bar{j}}(x) \right) dx. \end{aligned}$$

Так как в соответствии с постановкой задачи автоматической классификации классы не пересекаются, то третье слагаемое равно нулю.

Аналогичным образом определим среднеквадратический критерий

$$W_2(c) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(p(x) - \bar{p}(x) \right)^2 dx$$

расхождения между совместной плотностью вероятности

$$p(x) = P_j p_j(x) + P_{\bar{j}} p_{\bar{j}}(x)$$

и ее непараметрической оценкой

$$\bar{p}(x) = \bar{P}_j \bar{p}_j(x) + \bar{P}_{\bar{j}} \bar{p}_{\bar{j}}(x).$$

Нетрудно показать, что $W_2(c)$ отличается от $W_1(c)$ только знаком третьего слагаемого, которое в соответствии с определением класса равно нулю.

Отсюда следует, что выбор оптимальных коэффициентов размытости ядерных функций в непараметрическом уравнении разделяющей поверхности (2) сводится к их определению согласно условию минимума статистической оценки критерия

$$W_2(c) = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \bar{p}^2(x) dx - 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{p}(x)p(x) dx + \int_{-\infty}^{+\infty} p^2(x) dx \right].$$

Так как третье его слагаемое не зависит от искомого параметра c , то, оценивая второе слагаемое в виде среднего значения $\bar{p}(x)$, получаем критерий

$$\begin{aligned} \bar{W}_2(c) &= \frac{1}{n^2 \prod_{v=1}^k c_v^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\prod_{v=1}^k \Phi \left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v} \right) \Phi \left(\frac{x_v - x_v^j}{c_v} \right) \right] dx - \\ &\quad - \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n \prod_{v=1}^k c_v} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \prod_{v=1}^k \Phi \left(\frac{x_v^i - x_v^j}{c_v} \right) \right), \end{aligned}$$

минимизация которого позволяет найти оптимальные параметры статистики (2).

Таким образом, не зная вид $\bar{f}_{j\bar{j}}(x)$, можно определить ее параметры $\bar{c}_v = \bar{c}_v(n)$, $v = \overline{1, k}$.

Будем считать, что $\bar{c} < d$, где d — минимальное расстояние между классами Ω_1 и $\Omega_{\bar{1}}$. С учетом условия (1) для реализации базового алгоритма классификации необходимо выполнить следующие действия.

1. Выбрать из исходной выборки $V = x^i, i = \overline{1, n}$, точку x^i , в которой $p(x^i) \neq 0$, и отнести ее к первому классу, т.е. $x^i \in \Omega_1$ и $\sigma(i) = 1$.

2. Осуществить первый этап классификации точек, принадлежащих классу Ω_1 , в соответствии с правилом

$$x^t \in \Omega_1 \text{ и } \sigma(t) = 1, \text{ если } \prod_{v=1}^k \frac{1}{\bar{c}_v} \Phi\left(\frac{x_v^t - x_v^i}{\bar{c}_v}\right) > 0, t \in I \setminus (i), I = i = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Справедливость правила (4) следует из условия $\bar{c}_v < d, v = \overline{1, k}$.

Обозначим множество номеров точек, принадлежащих в соответствии с правилом (4) к первому классу, через I_1^1 , включая номер i .

3. Провести классификацию точек, принадлежащих классу Ω_1 , по следующему правилу:

$$x^t \in \Omega_1 \text{ и } \sigma(t) = 1, \text{ если } \frac{1}{|I_1^1|} \sum_{\gamma \in I_1^1} \sigma(\gamma) \frac{1}{\bar{c}_v} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v^t - x_v^\gamma}{\bar{c}_v}\right) > 0, t \in I \setminus I_1^1, I = i = \overline{1, n},$$

где $|I_1^1|$ — количество элементов множества I_1^1 .

Обозначим через I_1^2 множество номеров точек, принадлежащих на втором и третьем шаге классификации к классу Ω_1 .

4. Продолжить классификацию точек, принадлежащих классу Ω_1 , по правилу

$$x^t \in \Omega_1 \text{ и } \sigma(t) = 1, \text{ если } \frac{1}{|I_1^2|} \sum_{\gamma \in I_1^2} \sigma(\gamma) \frac{1}{\bar{c}_v} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v^t - x_v^\gamma}{\bar{c}_v}\right) > 0, t \in I \setminus I_1^2.$$

5. Предложенную методику классификации продолжать до тех пор, пока на некотором $(S+1)$ -м этапе в соответствии с правилом

$$x^t \in \Omega_1 \text{ и } \sigma(t) = 1, \text{ если } \frac{1}{|I_1^S|} \sum_{\gamma \in I_1^S} \sigma(\gamma) \frac{1}{\bar{c}_v} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v^t - x_v^\gamma}{\bar{c}_v}\right) > 0$$

к первому классу не будет отнесена ни одна из точек $x^t, t \in I \setminus I_1^S$.

Таким образом, множество точек $x^i, i \in I_1^S$, образуют первый класс Ω_1 , а $x^i, i \in I \setminus I_1^S$, — объединение остальных классов $\Omega_j, j = \overline{2, M}$.

При этом непараметрическое уравнение разделяющей поверхности между классом Ω_1 и областью $\Omega_{\bar{1}}$ имеет вид

$$\bar{f}_{1\bar{1}}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma(i) \prod_{v=1}^k \frac{1}{\bar{c}_v} \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{\bar{c}_v}\right),$$

где

$$\sigma(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } x^i \in \Omega_1; \\ -1, & \text{если } x^i \in \Omega_{\bar{1}}. \end{cases}$$

Аналогичным образом можно выделить точки, принадлежащие второму классу и всем остальным, если $d < \bar{c}_v, v = \overline{1, k}$.

Ближайшим аналогом базового алгоритма классификации является алгоритм „Форель“ [6].

Обобщенный алгоритм классификации. Если расстояние между классами $d = 0$, для решения задачи автоматической классификации предлагается выполнить следующие действия.

1. Задать некоторое значение непараметрической оценки $p_1 > 0$ совместной плотности вероятности $\bar{p}(x)$ и из исходной выборки $V = x^i, i = \overline{1, n}$, выделить множество точек $V_1 = x^i : \bar{p}(x^i) > p_1, i = \overline{1, n}$, со значением $\bar{p}(x)$, превышающим p_1 .

Множество V_1 может содержать точки, принадлежащие центру Ω_j^1 некоторого класса Ω_j и области $\Omega_{\bar{j}}^1 = \bigcup_{\substack{t=1 \\ t \neq j}}^M \Omega_t^1$, расстояние между которыми $d_1 > 0$.

2. Используя базовый алгоритм автоматической классификации, провести декомпозицию выборки V_1 . Если d_1 больше хотя бы одного из значений коэффициентов $\bar{c}_v, v = \overline{1, k}$, непараметрической оценки плотности вероятности $\bar{p}(x)$, то в соответствии с методикой, принятой для базового алгоритма, будут обнаружены множества $V_1(j), V_1(\bar{j})$ точек, определяющих центры $\Omega_j^1, \Omega_{\bar{j}}^1$ класса Ω_j и области $\Omega_{\bar{j}}$. Для идентификации остальных точек j -го класса перейти к п. 3.

Если центры классов не обнаружены, то необходимо увеличить значение p_1 на величину Δp и перейти к п. 1. В этом случае расстояние d_1 между центрами j -го класса и области $\Omega_{\bar{j}}^1$ увеличится и вероятность того, что $d_1 > \bar{c}_v, v = \overline{1, k}$, повысится.

3. Сформировать обучающую выборку $x^i, \sigma(i), i \in I_1$, здесь I_1 — множество номеров точек из V_1 , а

$$\sigma(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } x^i \in V_1(j), \\ -1, & \text{если } x^i \in V_1(\bar{j}). \end{cases}$$

4. Построить непараметрическое решающее правило распознавания образов

$$\bar{m}_{j\bar{j}}^1(x) : \begin{cases} x \in \Omega_j, & \text{если } \bar{f}_{j\bar{j}}^1(x) > 0; \\ x \in \Omega_{\bar{j}}, & \text{если } \bar{f}_{j\bar{j}}^1(x) \leq 0, \end{cases}$$

где

$$\bar{f}_{j\bar{j}}^1(x) = \frac{1}{|I_1|} \sum_{i \in I_1} \sigma(i) \prod_{v=1}^k \frac{1}{\bar{c}_v} \Phi \left(\frac{x_v - x_v^i}{\bar{c}_v} \right).$$

5. В соответствии с правилом $\bar{m}_{j\bar{j}}^1(x)$ осуществить классификацию оставшихся точек $x^i, i \in I \setminus I_1$, из исходной статистической выборки. Нетрудно заметить, что j -му классу будут принадлежать новые точки x^i , находящиеся в \bar{c} -окрестности граничных точек множества $V_1(j)$.

6. По результатам классификации расширить обучающую выборку $x^i, \sigma(i), i \in I_1$, где $I_1 = I_1 \cup R$; $R = R_j \cup R_{\bar{j}}$ — множество номеров точек, принадлежащих на шаге 5 к классу Ω_j и области $\Omega_{\bar{j}}$. При этом

$$V_1(j) = V_1(j) \cup x^i, i \in R_j; \quad V_1(\bar{j}) = V_1(\bar{j}) \cup x^i, i \in R_{\bar{j}}.$$

7. Если все точки исходной выборки V распределены между классом Ω_j и областью $\Omega_{\bar{j}}$, т.е. $I_1 = I$, перейти к п. 8, иначе — вернуться к выполнению п. 4.

8. Провести повторную классификацию точек исходной выборки $V = x^t, t = \overline{1, n}$, с помощью решающего правила

$$\bar{m}_{j\bar{j}}(x^t): \begin{cases} x^t \in \Omega_j, & \text{если } \bar{f}_{j\bar{j}}(x^t) > 0; \\ x^t \in \Omega_{\bar{j}}, & \text{если } \bar{f}_{j\bar{j}}(x^t) \leq 0, \end{cases}$$

где

$$\bar{f}_{j\bar{j}}(x^t) = \frac{1}{n} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq t}}^n \sigma(i) \prod_{v=1}^k \frac{1}{\bar{c}_v} \Phi \left(\frac{x_v^t - x_v^i}{\bar{c}_v} \right).$$

На данном шаге уточняется граница между классом Ω_j и областью $\Omega_{\bar{j}}$, если им соответствуют несимметричные фрагменты оценки плотности вероятности $\bar{p}(x)$. Действия на шаге 8 повторяются до тех пор, пока не будет завершено перераспределение точек между классом Ω_j и областью $\Omega_{\bar{j}}$.

9. Осуществить проверку на однородность класса Ω_j . Для этого в соответствии с пп. 1, 2 проверить возможность разбиения выборки $V_1(j)$ на группы точек, соответствующих одномодальным фрагментам оценки плотности вероятности в области Ω_j . Исследование начинается с уровня p_1 оценки плотности вероятности, при котором ранее были выделены центры класса Ω_j и области $\Omega_{\bar{j}}$. При обнаружении неоднородности выборки $V_1(j)$ осуществляется ее декомпозиция согласно пп. 1—8.

Если в области Ω_j дополнительно классы не выделены, то перейти к обнаружению нового класса в соответствии с приведенной выше методикой, анализируя выборку $V_1(\bar{j})$ в области $\Omega_{\bar{j}}$.

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, выполнены в рамках Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг., гос. контракт № 02.740.11.0621.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорофеюк А. А.* Алгоритмы автоматической классификации // Автоматика и телемеханика. 1971. № 12. С. 78—113.
2. *Цыпкин Я. З.* Основы теории обучающихся систем. М.: Наука, 1970.
3. Самообучение распознаванию образов по методу смешанных распределений / *В. И. Васильев, В. В. Коноваленко, Ф. П. Овсянникова.* Киев, 1974. (Препринт / АН УССР. Ин-т кибернетики; № 74—30).
4. *Лапко А. В., Лапко В. А., Соколов М. И., Ченцов С. В.* Непараметрические системы классификации. Новосибирск: Наука, 2000.
5. *Parzen E.* On estimation of a probability density function and mode // Ann. Math. Statistic. 1962. Vol. 33, N 3. P. 1065—1076.
6. *Загоруйко Н. Г.* Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999.

Сведения об авторах

- Александр Васильевич Лапко** — д-р техн. наук, профессор; Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск; E-mail: lapko@icm.krasn.ru
- Василий Александрович Лапко** — д-р техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра космических средств и технологий, Красноярск; E-mail: lapko@icm.krasn.ru
- Алексей Николаевич Хлопов** — аспирант; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра космических средств и технологий, Красноярск; E-mail: alexhl@list.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию
19.11.10 г.

ИНФОРМАЦИЯ

ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ВАСИЛЬЕВ **К 60-летию со дня рождения**



1 апреля 2011 года исполнилось 60 лет со дня рождения Владимира Николаевича Васильева — ректора Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, Заслуженного деятеля науки Российской Федерации, дважды лауреата премии Президента РФ в области образования и дважды лауреата премии Правительства России в области образования, кавалера ордена Почета, члена-корреспондента Российской академии образования, действительного члена и члена-корреспондента ряда других международных и отраслевых академий, вице-президента Российского союза ректоров, председателя Совета ректоров вузов Санкт-Петербурга, члена научно-технического совета Минобрнауки России, члена научного совета по проблемам информатизации образования.

В. Н. Васильев в 1974 г. окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1989 г. — докторскую. С 1983 г. он работает в Ленинградском институте точной механики и оптики.

В 1991 г. В. Н. Васильев основал и возглавил кафедру компьютерных технологий, которая готовит специалистов в области прикладной математики и информатики. Им разработаны учебные планы и программы для подготовки специалистов, написан ряд учебных пособий, в том числе и в компьютерном варианте. Под его руководством в 1995 г. впервые в мире была проведена международная студенческая олимпиада с использованием сети Интернет. В этом же году в содружестве с рядом российских университетов была заложена основа построения федеральной университетской компьютерной сети RUNNet. В. Н. Васильев является научным руководителем этой сети.

Профессор В. Н. Васильев уделяет большое внимание подготовке кадров. Вместе с профессором В. Г. Парфеновым он является инициатором комплексной подготовки студентов, одаренных в области точных наук. Студенты его кафедры неоднократно были чемпионами России по программированию, победителями европейских и международных олимпиад по

информатике, абсолютными чемпионами мира и Европы. Это выдающееся достижение российской высшей школы! Студентами его кафедры написано пять монографий по компьютерным телекоммуникациям и информационным технологиям. Выпускники кафедры получили гран-при „Открытие“ первой молодежной национальной премии „Прорыв“. Выпускник его кафедры был удостоен премии Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых ученых.

В 1996 г. В. Н. Васильев был избран ректором Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО). Под его руководством в Университете реализуется специальный образовательный проект по подготовке высококвалифицированных инженерных и научных кадров в области компьютерных и информационных технологий, оптоэлектроники, лазерной техники и лазерных технологий, компьютеризированных приборных комплексов и систем управления.

СПбГУ ИТМО стал вузом-победителем конкурсного отбора инновационных образовательных программ в рамках Приоритетного национального проекта „Образование“ с образовательной программой „Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий“, которая была успешно выполнена. В 2009 г. Университет получил категорию „Национальный исследовательский университет“.

В. Н. Васильев — один из создателей информационных ресурсов высшей школы РФ и организаторов единого научно-образовательного информационного пространства России. Под его руководством были разработаны новые системы управления и сопровождения спутниковой связи, системы передачи данных локальными и глобальными сетями, внедренные в реально действующие сети, созданы корпоративные компьютерные и информационные сети и системы, в том числе и первая отечественная межгородская АТМ-система на линии Москва — Санкт-Петербург, исследуются возможности создания высокопроизводительных компьютерных сетей.

Профессор В. Н. Васильев является одним из инициаторов создания новых информационных технологий обучения, разработки и внедрения систем дистанционного обучения.

Профессор В. Н. Васильев ведет большую научную работу, являясь руководителем исследований в области применения компьютерных технологий и математического моделирования для информационных сетей и систем, многофункциональных приборных комплексов и наукоемких технологий. Как руководитель основного направления информатизации Минобрнауки России „Развитие информационных технологий нового поколения“ он принимает активное участие в разработке и реализации федеральных целевых, межведомственных и ведомственных программ.

Профессор В. Н. Васильев автор более 200 научных работ, в том числе, более 20 патентов и изобретений. Им создана научная школа: под его руководством подготовлено 18 кандидатов и 4 доктора наук.

Научно-исследовательскую и педагогическую работу профессор В. Н. Васильев сочетает с активной общественной деятельностью, являясь членом научно-координационного совета ФЦПРО, советником Губернатора Санкт-Петербурга, членом научно-технического совета Правительства Санкт-Петербурга и ряда других научно-технических советов федерального уровня, членом совета Национального фонда подготовки кадров, президентом Оптического общества им. Д. С. Рождественского.

Профессор В.Н. Васильев вносит большой вклад в развитие международного сотрудничества, он постоянный член международных научных обществ и международных научно-технических рабочих групп. Под его руководством и при непосредственном участии неоднократно организовывались международные конгрессы, конференции, семинары и симпозиумы.

Редакционная коллегия

SUMMARY

P. 7—13.

ANALYSIS OF OPERATION MODES OF QUASI-RESONANT VOLTAGE CONVERTER

Theoretical and experimental analysis of operation modes of a quasi-resonant voltage converter is presented. The effect of variable component of output inductor current on the converter regulation curve is studied. Two modes of operation under zero-current switching are considered.

Keywords: quasi-resonant converter, electronic switch, choke output filter, resonance loop, conversion coefficient.

Data on authors

- Nikolay N. Goryashin* — Cand. Techn. Sci.; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Automatic Control Systems, Krasnoyarsk; E-mail: gorkolya@mail.ru
- Mikhail V. Lukyanenko* — Cand. Techn. Sci., Professor; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Automatic Control Systems, Krasnoyarsk
- Anna A. Solomatova* — Post-Graduate Student; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Automatic Control Systems, Krasnoyarsk
- Alexander Yu. Khoroshko* — Post-Graduate Student; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Automatic Control Systems, Krasnoyarsk

P. 13—18.

UNIFICATION OF INTERFACE MODULES OF ONBOARD CONTROL SYSTEM UNITS

Problems of unification of interface modules of space vehicle onboard control system equipment are considered. Peculiarities of onboard interface unit design on the base of interface modules of various functionality are described. Examples of solutions for several interface modules unification problems are presented.

Keywords: interface, coupling unit, onboard control system, space vehicle.

Data on author

- Alexey I. Gornostaev* — Cand. Techn. Sci.; JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”, Zheleznogorsk; Head of Department; E-mail: galiv@iss-reshetnev.ru

P. 18—23.

ELECTROSTATIC RELAY ON THE BASE OF MICROELECTROMECHANICAL TECHNOLOGY

Principles of design of low-current microrelays and microswitches to be used in space vehicle equipment are reviewed. Reduction of mass and size, dynamic and power characteristics of onboard satellite switches is a continuously actual problem. Switches created with the use of microelectromechanical systems represent a sophisticated innovative idea for perspective satellites relay-applying technologies.

Keywords: microelectromechanical technology, microswitch, microrelay, microsystem technique.

Data on authors

- Ivan A. Afinogenov* — JSC “SKTB Relay Technology”, Veliky Novgorod; Development Engineer
Alexander V. Konkin — JSC “SKTB Relay Technology”, Veliky Novgorod; Development Engineer
Pavel B. Enns — JSC “SKTB Relay Technology”, Veliky Novgorod; Processing Engineer
Alexander N. Kapustin — JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”, Zheleznogorsk; Head of Department; E-mail: kapustin@iss-reshetnev.ru

P. 24—28.

PHYSICAL MODELING OF CHARACTERISTICS OF PUMP IN SPACE VEHICLE HEAT REGULATION SYSTEM

The problem of modeling of centrifugal pumps characteristics in space vehicles thermal control systems for various kinds of heat-transfer agents is considered. A relation is derived for determination of the optimal combination of characteristic size of heat removal device of the liquid pump and physical properties of the heat-carrier. A method of physical modeling of the pump characteristics is proposed which allows for achievement of maximal efficiency of heat removal.

Keywords: centrifugal pump, discharge, physical modeling.

Data on authors

- Alexander A. Loganov* — Cand. Techn. Sci.; JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”, Zheleznogorsk; E-mail: loganov@iss-reshetnev.ru
Edward M. Yamashev — Cand. Techn. Sci.; JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”, Zheleznogorsk; E-mail: yamashev@iss-reshetnev.ru

P. 28—33.

ON ABSOLUTE STABILITY OF PROCESSES IN SOLAR ARRAY SIMULATOR

Conditions for absolute stability of processes in solar array simulator are considered. The absolute stability is shown to be determined by a relation between the simulator and load admittances.

Keywords: solar array simulator, absolute process stability, nonlinear systems, simulator admittance.

Data on authors

- Enis A. Mizrakh* — Cand. Techn. Sci., Professor; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Automatic Control Systems, Krasnoyarsk; E-mail: enis-home@mail.ru
Alexander S. Sidorov — M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Automatic Control Systems, Krasnoyarsk; Senior Lecturer; E-mail: aladdin_sane@mail.ru

P. 33—37.

IDENTIFICATION OF ALLOY GRADE WITH THE USE OF NONDESTRUCTIVE CONTROL METHODS

A complex method is developed for alloy grade identification at input and operational control of metal components of high-energy power plants. Three nondestructive tests are applied: thermo-electromotive force measuring, the vortex-current and the magnetic methods. Hidden faults of incoming castings are revealed with X-ray examination.

Keywords: grade identification, alloy, defect, nondestructive control methods, X-ray examination.

Data on authors

- Alexander N. Kashubsky* — Cand. Techn. Sci.; Independent Engineering Centre of Technical Diagnostics, Expertise and Certification “Regiontechservice”, Krasnoyarsk; Head of Department; E-mail: nicka7@yandex.ru
- Henrikh G. Krushenko* — Dr. Techn. Sci., Professor; Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk; E-mail: genry@icm.krasn.ru

P. 38—42.

CORRECTION OF ENDURANCE TEST DATA FOR ELECTROMECHANICAL DEVICES UNDER SMALL SAMPLES CONDITIONS

A method is proposed for processing of endurance test results for a small sample of electromechanical devices aimed at detection of abnormal observations and data correction to improve the forecast accuracy of the resource.

Keywords: endurance test, data correction, small sample, bootstrap.

Data on authors

- Sergey V. Pokidko* — Cand. Techn. Sci.; Siberian Federal University, Zheleznogorsk branch; E-mail: elin@krasmail.ru
- Sergey G. Kochura* — JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”, Zheleznogorsk; Deputy General Designer; E-mail: KOCHURA@iss-reshetnev.ru

P. 43—47.

ON MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRICAL TESTING OF COMMUNICATION SATELLITES

The current mathematical model recommended for space technique testing is shown to have significant shortcomings. A new model is proposed which is free of the defects and combines the existing model advantages with improvements proposed by the authors to increase the model complexity and practical value of the model as applied to electrical testing of space communication apparatus.

Keywords: mathematical modeling, electrical testing, space-system engineering, space communication apparatus.

Data on authors

- Sergey G. Kochura* — JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”, Zheleznogorsk; Deputy General Designer; E-mail: KOCHURA@iss-reshetnev.ru
- Nikolay A. Kuznetsov* — JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”, Zheleznogorsk; Deputy Head of Department; E-mail: NK230@iss-reshetnev.ru
- Alexander A. Nosenkov* — Dr. Techn. Sci., Professor; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk

P. 47—50.

MATHEMATICAL PLANNING OF EXPERIMENT UNDER FACTOR NICHE CONDITIONS

Peculiarities of mathematical problems of experimental design in development of electronic devices for space apparatus operating under equal conditions are analyzed.

Keywords: mathematical planning, functional assembly, factor niche.

Data on authors

- Anatoly A. Kovel* — Dr. Techn. Sci., Professor; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Cosmic Information Systems, Krasnoyarsk; E-mail: kovel.bogdan@mail.ru
- Sergey V. Pokidko* — Cand. Techn. Sci.; Siberian Federal University, Zheleznogorsk branch; E-mail: elin@krasmail.ru

P. 51—54.

APPLICATION OF MATHEMATICAL PLANNING OF EXPERIMENT METHOD FOR NEURAL NETWORK TRAINING

Results of application of experimental design methods to formation of learning sample for neural network are presented.

Keywords: mathematical planning, neural network, learning sample, space vehicle.

Data on authors

- Dmitry A. Grishelyonok* — JSC “Academician M. F. Reshetnev Information Satellite Systems”, Zheleznogorsk; Development Engineer; E-mail: dimass_13@mail.ru
- Anatoly A. Kovel* — Dr. Techn. Sci., Professor; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Cosmic Information Systems, Krasnoyarsk; E-mail: kovel.bogdan@mail.ru

P. 54—57.

INVESTIGATION OF ONBOARD APPARATUS COMPONENTS UNDER SPACE CONDITIONS

A principle of organization of investigation of components of onboard apparatus under the outer space effects.

Keywords: components base, parallel investigation, effect of space, ground conditions.

Data on authors

- Anatoly A. Kovel* — Dr. Techn. Sci., Professor; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Cosmic Information Systems, Krasnoyarsk; E-mail: kovel.bogdan@mail.ru
- Sergey V. Pokidko* — Cand. Techn. Sci.; Siberian Federal University, Zheleznogorsk branch; E-mail: elin@krasmail.ru

P. 58—62.

MINIMAL NECESSARY EXTENT OF EXAMINATIONS OF MICROELECTRONIC PRODUCTS AT INSPECTION TEST STAGE

The minimal necessary extent of screening tests for microelectronic products to be used in space vehicle apparatus is determined. The proposed approach allows for reduction of cost of inspection tests carried out to ensure reliability of the apparatus and the space vehicle as a whole.

Keywords: electronic products, additional screening tests, destructive physical analysis, electrothermal training.

Data on authors

- Viktor V. Fedosov* — JSC “Technical Testing Center — NPO PM”, Zheleznogorsk; Deputy Director
- Viktor I. Orlov* — JSC “Technical Testing Center — NPO PM”, Zheleznogorsk; Director

P. 63—67.**ARCHITECTURE OF AN EDA-SYSTEM ON THE BASE OF COMPETITIVE PARALLEL PROCESSES**

An architecture is proposed for EDA-system with no unified model of analyzed device. Instead of the unified model, the system incorporates a set of elementary models with separate calculation process assigned for each of them. The calculation processes are carried out in a distributed virtual computing machine, and asynchronous message exchange between the processes is performed along the routs determined by initial system topology. The proposed approach allows to avoid the impact of nonlinearities on modeling accuracy.

Keywords: automated design system, EDA-system, software architecture.

Data on authors

- Konstantin V. Bogdanov* — Cand. Techn. Sci.; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Informatics and Computer Engineering, Krasnoyarsk;
E-mail: darkstone@rambler.ru
- Anatoly N. Lovchikov* — Dr. Techn. Sci., Professor; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Informatics and Computer Engineering, Krasnoyarsk;
E-mail: lanlov8@mail.ru

P. 67—72.**NONPARAMETRIC ALGORITHMS OF PATTERN RECOGNITION IN THE PROBLEM OF HYPOTHESIS TESTING ON DISTRIBUTIONS OF RANDOM VARIABLES**

A new method of hypothesis testing on identity of distributions of random variables is proposed. The method is based on application of nonparametric algorithms of pattern recognition and collective estimation principles. Results obtained with the method are compared with Kolmogorov — Smirnov criterion.

Keywords: nonparametric statistics, pattern recognition, hypothesis testing, distributions of random variables.

Data on authors

- Alexander V. Lapko* — Dr. Techn. Sci., Professor; Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk; E-mail: lapko@icm.krasn.ru
- Vasily A. Lapko* — Dr. Techn. Sci., Professor; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Space Resources and Technologies, Krasnoyarsk; E-mail: lapko@icm.krasn.ru

P. 72—78.**NONPARAMETRIC ALGORITHM OF AUTOMATIC CLASSIFICATION OF STATISTICAL DATA**

A nonparametric algorithm of automatic classification of statistical data is proposed. The algorithm is based on probability density estimations of Parzen type. Application of the algorithm allows for selection of compact point sets corresponding to unimodal fragments of the probability density.

Keywords: nonparametric statistics, automatic classification, pattern recognition, probability density.

Data on author

- Alexander V. Lapko* — Dr. Techn. Sci., Professor; Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk; E-mail: lapko@icm.krasn.ru
- Vasily A. Lapko* — Dr. Techn. Sci., Professor; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Space Resources and Technologies, Krasnoyarsk; E-mail: lapko@icm.krasn.ru
- Alexey N. Khlopov* — Post-Graduate Student; M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Department of Space Resources and Technologies, Krasnoyarsk; E-mail: alexhl@list.ru