

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 51

АВГУСТ 2008

№ 8

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

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

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СЛУЖЕБНЫХ СИСТЕМ	
Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования	5
Ковель А. А., Покидько С. В. Математическое планирование эксперимента при отработке электронных элементов	13
Ковель А. А. Установление допусков на параметры электронных устройств по результатам многофакторного эксперимента	18
Горностаев А. И., Рыбаков С. А. Задачи проектирования модулей контроля и преобразования напряжений постоянного тока	22
Горностаев А. И. Контроль параметров помех на шинах питания бортовой аппаратуры	28
Носенков А. А., Медведев В. И., Сухарев Е. Н. Техническая совместимость приборов как основа эффективности и качества систем	33
Носенков А. А., Туркенич Р. П. Задачи совершенствования информационного обеспечения отечественного приборостроения на современном этапе	37
ИССЛЕДОВАНИЕ И ОТРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ	
Логанов А. А., Соколов М. И. Оптимизация конструкции электронасосных агрегатов для повышения эффективности теплоотвода	43
Гольдин В. Л., Курбатов Е. М., Ямашев Э. М. Устройства поворота солнечных батарей космических аппаратов	49
Ражиков В. Н., Ямашев Э. М., Ившина М. В. Расчет распределения усилий в зубчатом планетарном редукторе К-Н-V привода радиолокационной антенны слежения за спутниками связи	57
СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ	
Лапко А. В., Шарков М. А., Лапко В. А. Непараметрические методы обнаружения закономерностей в условиях малых выборок	62
Соколов М. И. Непараметрическая регрессия в условиях пропуска данных	67
Рубан А. И. Модульные характеристики нелинейных статических моделей стохастических объектов ...	73
РЕФЕРАТЫ	81

SPECIAL ISSUE

DESIGNING AND EXPERIMENTAL IMPROVEMENTS OF SPACE VEHICLES ELEMENTS

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

CONTENTS

INTRODUCTION	3
DESIGNING AND EXPERIMENTAL IMPROVEMENT OF UNITS OF SERVICE SYSTEMS OF SPACE VEHICLES	
Patraev V. E., Maksimov Yu. V. Methods of Reliability Control of an On-Board Equipment of Space Vehicles of Long-Lived Operation	5
Kovel A. A., Pokidko S. V. Using of Methods of Mathematical Planning of Experiment at Improvement of Electronic Elements	13
Kovel A. A. Forming of Tolerances on Parameters of Electronic Devices Based on Results of the Multifactor Experiment	18
Gornostaev A. I., Rybakov S. A. Tasks of Modules Designing of the Control and the Conversion of Direct Current Voltage	22
Gornostaev A. I. Monitoring of Noise Parameters on Power Buss of an On-Board Equipment in Service Systems	28
Nosenkov A. A., Medvedev V. I., Sukharev E. N. Technical Compatibility of Devices as the Basis of Efficiency and Quality of Systems	33
Nosenkov A. A., Turkenich R. P. Tasks of Perfecting of an Infware of Native Instrument-Making at the Present Stage	37
RESEARCH AND IMPROVEMENT OF ELECTROMECHANICAL DEVICES OF SPACE VEHICLES	
Loganov A. A., Sokolov M. I. Optimization of Pump Units Structure for Increase of Efficiency of a Heat Rejection	43
Goldin V. L., Kurbatov E. M., Yamashev E. M. Devices of Rotational Displacement of Solar Batteries of Space Vehicles	49
Ragikov V. N., Yamashev E. M., Ivshina M. V. Calculation of Distributions of Strains in Planetary Tothing K-H-V of Driving of Radar Aerial for Monitoring to Communication Satellites	57
STATISTICAL METHODS OF INFORMATION PROCESSING	
Lapko A. V., Sharkov M. A., Lapko V. A. Nonparametric Methods of Detection of Legitimacies in Conditions of Small Sampling	62
Sokolov M. I. Nonparametric Regression in Conditions of the Data's Missing	67
Rouban A. I. The Modular Characteristics of Nonlinear Static Models of Stochastic Object	73
ABSTRACTS	81

Editor-in-Chief L. F. Porfiriev

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 2009 г. исполнится 50 лет Научно-производственному объединению прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва (с марта 2008 г. — Открытое акционерное общество „Информационные спутниковые системы“ им. акад. М. Ф. Решетнёва), созданному по инициативе С. П. Королева в Красноярске-26 (ныне Железногорск).

В настоящее время объединение занимает лидирующие позиции в России по выпуску космических аппаратов (КА) связи и навигации и является успешным участником международных космических программ. Высококвалифицированный коллектив предприятия успешно реализует широкий спектр теоретических и прикладных исследований, результаты которых определяют основные направления деятельности организации.

Сотрудничество с учеными Сибирского федерального университета, Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М. Ф. Решетнёва и другими вузами и научными коллективами России повышает научный потенциал объединения, а также подпитывает новыми идеями и результатами российское образование.

Материал, представленный в данном спецвыпуске журнала, отражает отдельные направления совместных исследований, связанных со служебными системами КА (управления, электропитания, терморегулирования, ориентации и др.), и включает три раздела:

- проектирование и экспериментальная отработка элементов служебных систем;
- исследование и отработка электромеханических устройств;
- статистические методы обработки информации.

*Доктор технических наук, профессор
А. А. КОВЕЛЬ*

INTRODUCTION

50 years ago (in 1959) science and production association (SPA) of a name academic M. F. Reshetnev was established, on the initiative of S. P. Korolev in Krasnoyarsk-26 (nowadays Zheleznogorsk). Now SPA is the Russian leader on making of space vehicles, communication and navigating satellites, and also successful participant of the international space programs. The highly qualified staff of the company successfully implements a wide range of theoretical and applied researches, results which determine basic directions of activity of the corporation.

Cooperation with the scientists of the Siberian Federal University, Siberian State Space University by a name academic M. F. Reshetnev, other higher education institutions and other high schools and scientific staffs of Russia increases a scientific potential of association, and also supply by new ideas and results Russian education.

The material presented in this special issue reflect directions of joint researches, bound with service systems of space vehicle (control, current supply, thermal control, orientation etc.), and broken-down on three parts:

- designing and experimental improvement of units of service systems of space vehicle;
- research and improvement of electromechanical devices of space vehicle;
- statistical methods of information processing.

*Doctor of Technical Science, Professor
A. A. KOVEL*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СЛУЖЕБНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.78.051.017.1

В. Е. ПАТРАЕВ, Ю. В. МАКСИМОВ

*Научно-производственное объединение прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва
Железногорск*

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛИТЕЛЬНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Рассмотрен комплекс методов поэтапного обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования на этапах проектирования, наземной экспериментальной отработки, летных испытаний и штатной эксплуатации.

Введение. Срок активного существования (САС) космических аппаратов (КА), входящих в состав современных космических систем и комплексов — 10—15 лет. Это позволяет существенно сократить количество запусков КА для развертывания и поддержания орбитальных группировок.

Важным показателем надежности КА является безотказность функционирования. В рамках современных стандартов бортовая аппаратура (БА) для данных КА должна удовлетворять следующему требованию: „высокая надежность при минимальных массе, габаритах и стоимости“. Отечественные стандарты, регламентирующие вопросы обеспечения надежности КА, и отчасти научная и производственная базы, в настоящее время слабо ориентированы на КА с САС, составляющим 10—15 лет. Поэтому разработка научно-технических основ, стандартизация передового опыта, обоснование новых и совершенствование действующей систем (и методов) обеспечения надежности БА на различных этапах жизненного цикла КА (проектирование, разработка рабочей документации, наземная отработка опытных образцов, летные испытания и эксплуатация) приобретают актуальное значение.

В настоящей статье обобщен опыт работы НПО ПМ по созданию КА с САС 10—15 лет, а также проанализированы результаты разработок, полученные в рамках международного сотрудничества.

Этапы проектирования и разработки. Проектирование аппаратуры космических систем начинается с формирования технических заданий (ТЗ) на разработку.

Вероятность *безотказной* работы (ВБР) бортовых систем в течение срока эксплуатации по целевому назначению должна соответствовать „нормативному бюджету надежности“ КА (см. таблицу, где номенклатуру и значения требуемых показателей надежности отразим на примере разрабатываемых КА связи со сроком активного существования 15 лет).

Элементы бортовой системы	ВБР*, не менее
Полезная нагрузка (ретранслятор)	0,91
Бортовой комплекс управления	0,958
Система ориентации и стабилизации	0,951
Система электропитания	0,962
Система коррекции	0,930
Система терморегулирования	0,992
Механические устройства солнечной батареи	0,9998
Механические устройства антенн	0,9999
Платформа в целом	0,8
КА в целом	0,72

*на конец САС 15,25 года.

БА должна проектироваться с необходимым уровнем резервирования, обеспечивающим требуемую ВБР, при этом любой единичный отказ элемента или соединительной цепи или несанкционированная выдача любой последовательности команд не должны приводить к отказу БА и КА.

Показатель отказа БА — невыполнение (при использовании всех резервных комплектов, блоков, цепей) каких-либо функций из приведенных в ТЗ.

Требования к долговечности КА следующие: САС КА должен составлять не менее 15,25 лет, из них:

- испытания и приемка на орбите — 0,25 года (2160 ч);
- эксплуатация по целевому назначению (эксплуатационный САС) — 15 лет (131 490 ч).

Требования к долговечности (ресурсу) БА приводятся в ТЗ и включают требования к ресурсу БА в дежурном или сеансном режиме функционирования с указанием ресурса работы (для дежурного режима запас — 10 %) с учетом количества включений (для сеансного режима) при эксплуатации по целевому назначению в течение САС КА и проведения испытаний на заводе-изготовителе, при регламентных работах и на техническом комплексе.

БА должна соответствовать требуемым техническим и эксплуатационным характеристикам („сохранять“ их) в течение 18,75 лет с момента приемки и обеспечивать:

- срок „сохраняемости“ (3,5 года), включающий производственный цикл изготовления КА (1,5 года) и хранение принятого КА (в течение 2 лет);
- ресурс на все виды испытаний оборудования в течение его срока „сохраняемости“ — 4380 ч;
- САС в составе КА по целевому назначению — 15,25 лет.

Необходимые показатели надежности в условиях минимума затрат на создание аппаратуры обеспечивают:

- разработка и реализация требований к качеству комплектующих электрорадиоизделий (ЭРИ);
- применение перспективных с точки зрения современной методологии анализа и гарантии надежности БА проектных решений.

Обеспечить качество применяемых партий ЭРИ возможно путем их отбора для предстоящего использования с помощью испытаний, проводимых в испытательных технических центрах (ИТЦ) в целях снижения интенсивности отказов за счет исключения изделий со скрытыми дефектами [1].

Для обеспечения надежности БА проводятся функциональный анализ, анализ (расчет) надежности, видов последствий и критичности отказов, анализ худшего случая, анализ электрических и тепловых нагрузок комплектующих и мер по снижению этих нагрузок, ресурса и сохраняемости; анализ безопасности [2].

По результатам исследований разрабатывается программа контроля критичных элементов.

На этапах проектирования возможно заложить, обосновать и оценить будущую надежность БА, поэтому на этих этапах особое внимание уделяется моделям подтверждения требуемой безотказности БА.

БА КА длительного функционирования относится к сложным системам, обладающим структурной избыточностью. Для таких систем можно использовать двоичную переменную для состояния БА [3]:

$$S(T_{\text{БА}}) = \begin{cases} 1, & \text{если аппаратура (система) сохраняет работоспособность} \\ & \text{в течение } T_{\text{БА}}; \\ 0 & \text{— в противоположном случае.} \end{cases}$$

Здесь $T_{\text{БА}}$ — срок службы бортовой аппаратуры.

Основной показатель надежности БА — безотказность в течение требуемого САС. При анализе вероятности безотказной работы конкретной БА рассматривают структурные схемы надежности (ССН), образованные из конечного набора последовательных и параллельных ССН определенного типа. Таким образом, характер БА с параллельными структурами определяется способом и схемой включения резерва.

Для схем с нагруженным резервом функция ВБР бортовой аппаратуры имеет вид

$$P(T_{\text{БА}}; \theta) = 1 - P\{\max_N (X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(N)}) < T_{\text{БА}}; \theta\},$$

где N — количество параллельных элементов в бортовой аппаратуре; $X^{(j)}$ — случайная величина срока службы j -го элемента (цепи) бортовой аппаратуры ($j = 1, 2, \dots, N$); $\max_N (X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(N)})$ — функция надежности, соответствующая максимальному значению из N величин; θ — параметрический вектор (набор параметров, определяющий вид распределения времени безотказной работы).

Для БА, в которой применяется резервирование замещением, общая функция ВБР при абсолютной надежности работы переключателей и индикатора отказов принимает вид

$$P(T_{\text{БА}}; \theta) = P\left\{ \sum_{j=1}^N X^{(j)} > T_{\text{БА}}; \theta \right\}.$$

Комплекс вариантов соединения элементов в ССН БА включает различные виды последовательного и параллельного соединения элементов (цепей) БА. Наибольшее распространение получили математические модели расчета надежности БА и ее электронных комплектующих (функциональных устройств, блоков, цепей), которые могут находиться в активном режиме или в пассивном (ненагруженном) состоянии. При этом применяется экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы.

Для расчета надежности $P(t)$ БА с такими комплектующими можно использовать следующие соотношения:

— нерезервированный блок или последовательная цепь элементов (точка единичного отказа)

$$p(t) = e^{-\lambda t};$$

— резервированный по схеме m/n „блок со всеми блоками в активном (нагруженном) режиме“

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n-m} C_n^i (1 - e^{-\lambda t})^i (e^{-\lambda t})^{n-i};$$

— резервированный по схеме m/n „блок с наличием блоков в ненагруженном режиме“

$$P(t) = e^{-m\lambda t} \left[1 + \sum_{i=1}^{n-m} \frac{(1 - e^{-\lambda_{xp}t})^i}{i!} \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + m \frac{\lambda}{\lambda_{xp}} \right) \right],$$

где t — время работы блока; λ — интенсивность отказов в активном режиме; λ_{xp} — интенсивность отказов блока в режиме хранения ($\lambda_{xp} = \lambda/10$); n — количество одинаковых параллельных блоков; m — количество работающих блоков, определяющих работоспособность схемы, и тех, которые зарезервированы остальными $n - m$ блоками.

Применение высоконадежных ЭРИ позволяет использовать понижающие коэффициенты для базовых значений интенсивности отказов ЭРИ, комплектующих БА [4]. Один из подходов количественной оценки понижающего коэффициента $K_{итц}$, уточняющего значение эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_э$ ЭРИ при проведении предварительных испытаний перед установкой в БА, предложен в работах [5, 6].

Этапы наземной экспериментальной отработки. Наземная экспериментальная отработка (НЭО) БА и КА должна обеспечивать отработку и верификацию заданных в ТЗ требований к техническим характеристикам и надежности в условиях, близких к эксплуатационным. Методика отработки предполагает:

- ужесточенные режимы отработки и приемки;
- строгую последовательность при отработке (от простого к сложному) уровней элементов КА: оборудование (узлы, агрегаты, бортовая аппаратура) → бортовая система → КА (платформа и модуль полезной нагрузки), а также этапность отработки (автономные, комплексные, предварительные, межведомственные, летные испытания);
- ступенчатость норм отработки и испытаний (под ступенчатостью норм обработки понимается следующее: чем выше уровень отработки, тем ниже квалификационные запасы для норм дестабилизирующих факторов, применяемых при отработке (температура, количество термоциклов, продолжительность испытаний, механические воздействия и др.). Таким образом, максимальным нормам и режимам отработки по воздействующим факторам подвергается оборудование КА).

В соответствии с комплексными программами экспериментальной отработки (КПЭО) на уровне автономной отработки БА проходит следующие виды испытаний:

- лабораторно-отрабочные (ЛОИ);
- конструкторско-доводочные (КДИ);
- предварительные (ПрИ);
- испытания на специальные воздействия (при необходимости);
- ресурсные (при необходимости).

Требования к нормам испытаний. Тестируемый комплект БА КА разработки НПО ПМ с САС 10—15 лет подвергают отработочным и предварительным испытаниям на внешние воздействия:

- механические (режимы в соответствии с ТЗ);
- температурные (термовакuumные), в том числе циклические, в расширенном на ± 10 °С относительно эксплуатационного диапазоне температур, количество термоциклов не менее 20, из них не менее 4 в вакууме;
- трехкратное воздействие холодного старта (при минимальной отрицательной температуре с запасом 10 °С);
- уменьшение давления для БА с напряжением 100 В и более, при этом холодный старт и спад давления могут совмещаться с температурными (термовакuumными) испытаниями.

В дальнейшем штатные комплекты БА в процессе изготовления и приемки подвергают-

ся следующим видам испытаний:

- электротренировке длительностью не менее 300 ч, включая 10 термоциклов в диапазоне температур, расширенном на ± 10 °С;
- механическим воздействиям (режимы в соответствии с ТУ);
- температурным (термовакуумным) воздействиям в расширенном на ± 5 °С температурном диапазоне;
- на спад давления для БА с напряжением 100 В и более (на этапе приемосдаточных испытаний для первого штатного комплекта БА, последующие штатные комплекты испытывают при необходимости исходя из условий доработок);
- однократным на холодный старт (при минимальной отрицательной температуре с запасом 5 °С);
- на подтверждение безотказной работы БА во включенном состоянии в течение последних 100 ч работы.

В целом наземная отработка БА представляет собой процесс с обратными связями на каждом уровне, направленными на обеспечение текущей эффективности отработки БА по результатам всех видов испытаний на всех уровнях отработки [7]. Структурная схема процесса разработки КА и его составных частей с учетом этапности отработки и применяемых моделей для нее приведена на рисунке.

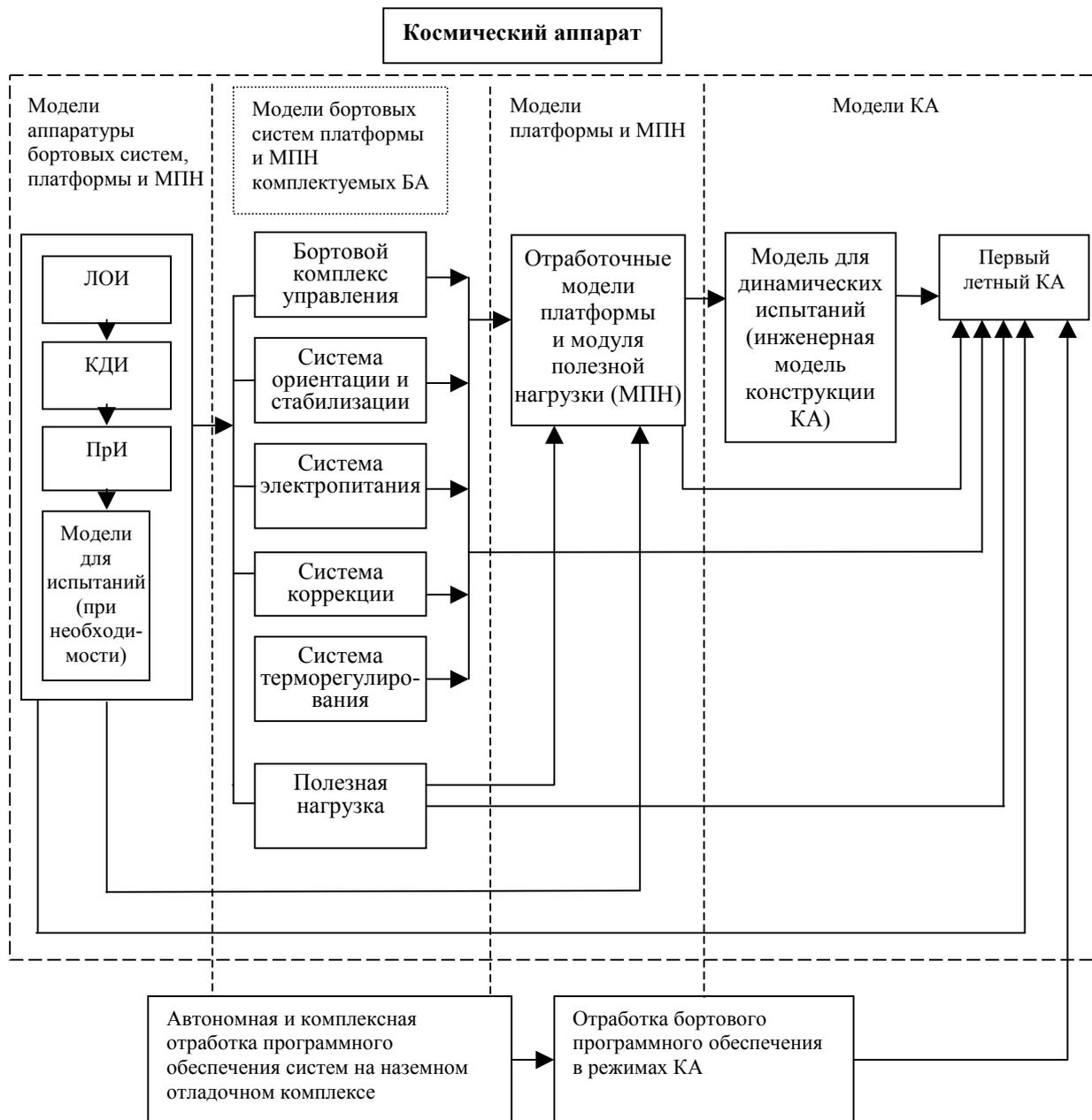
Современные КА с заданными показателями качества, в том числе надежности, создают в сжатые, определенные контрактом, сроки с минимальными финансовыми затратами, поэтому необходимо постоянно оптимизировать объемы наземной отработки. К реальным вариантам оптимизации можно отнести:

- минимизацию затрат на объем НЭО (V) КА и БА ($C_{\Sigma} = \min_{(V)} C_{\Sigma}$) при заданных показателях качества A и сроках отработки T ($T_{\text{нэо}} \leq T_{\text{нэо}}^{\text{доп}}$, $A = A^{\text{доп}}$);
- минимизацию срока НЭО КА и БА ($T_{\text{нэо}} = \min_{(V)} T$) при заданных стоимости отработки и показателях качества ($C_{\Sigma} \leq C_{\Sigma}^{\text{доп}}$, $A = A^{\text{доп}}$).

В НПО ПМ реализуются перспективные подходы к оптимизации объемов отработки КА и БА [8, 9] с использованием таких направлений оптимизации, как:

- сокращение номенклатуры изготавливаемой материальной части аппаратуры для отработки БА и составных элементов за счет комплексирования различных видов испытаний на одной материальной части;
- снижение стоимости работ за счет замены физических отработочных моделей БА программными моделями и использования оборудования и программного обеспечения, разработанных в рамках различных проектов (межпроектная унификация);
- снижение стоимости и сроков разработки за счет сокращения этапов автономной отработки БА (например, этапа ЛОИ БА, специальных и ресурсных испытаний БА, если это подтверждено расчетами);
- совмещение части отработочных испытаний с контрольными испытаниями штатных образцов;
- оптимизация этапов разработки и производства (исключение малоинформативных видов испытаний на основе оценки особенностей конструктивного исполнения БА; совмещение видов испытаний, имеющих близкие характеристики результатов воздействия на БА или дающих при совмещении более высокую информативность результатов; исключение дублирующих испытаний — выявляющих одни и те же свойства БА при различных видах воздействия; замена испытаний аппаратуры в целом испытаниями ее составных частей, фрагментов или макетов; сокращение продолжительности испытаний (оптимизация времени воздействия),

в том числе с применением ускоренных методов; эквивалентная замена одного вида испытаний другим; замена категорий испытаний: квалификационных, периодических, типовых — отбраковочными).



Критерий обоснованности любой оптимизации — сравнительная оценка исходных и оптимизированных показателей. В [10] предложен подход к количественной оценке эффективности оптимизации отработки БА как оценке и обеспечению текущей эффективности наземной отработки БА по результатам всех видов испытаний на всех уровнях отработки, основанной на сравнении ее с базовым или допустимым уровнем эффективности.

Надежность БА в процессе заводских испытаний и при эксплуатации характеризуется выявленными отказами, относящимися к различным признакам деления. Виды отказов БА подразделяются на конструктивные, производственные, эксплуатационные, отказы ЭРИ.

Показатель безотказности типа БА по любому виду отказов можно оценить по модели, отражающей структуру заводских испытаний БА, а также по количеству отказов вследствие конкретной причины возникновения (кроме эксплуатационных) на этапах заводских испытаний.

Заводские испытания БА и их комплектующих включают:

- входной контроль и дополнительные испытания партий ЭРИ в ИТЦ;
- первое включение БА после изготовления и регулировку;
- электротренировку;
- предъявительские испытания;
- приемосдаточные испытания;
- ресурсные, типовые, периодические (при необходимости);
- испытания в составе бортовых систем;
- испытания в составе КА (расстыкованного и состыкованного).

Для определения безотказности по отказам ЭРИ в число испытаний дополнительно включают результаты входного контроля и дополнительных испытаний ЭРИ в ИТЦ (отбраковочные, диагностический неразрушающий контроль, выборочный разрушающий физический анализ).

Общая функция надежности БА по результатам наземной отработки для случайных величин дискретного типа (т.е. количества отказов БА вследствие различных причин на различных этапах испытаний) имеет вид

$$P_{\text{БА}} = \prod_{i=1}^r F_i(K, M, N_o^*, n_{\text{ИТЦ}}^*, n_{ij}, p_{ji}, p_{\text{ИТЦ}}^*),$$

где F_i — функция безотказности по i -му виду причины отказа; K — количество изготовленных БА определенного типа; M — количество видов заводских испытаний БА; N_o^* — объемы исходных партий ЭРИ определенных типов, поступивших на входной контроль в ИТЦ (для отказов ЭРИ); $n_{\text{ИТЦ}}^*$ — количество дефектных и потенциально ненадежных ЭРИ конкретной партии, отбракованных в ИТЦ (для отказов ЭРИ); $p_{\text{ИТЦ}}^*$ — эффективность испытаний партий ЭРИ в ИТЦ (для отказов ЭРИ); n_{ij} — количество отказов БА по i -му виду причины на j -м виде испытаний; p_{ji} — эффективность j -го вида испытаний по i -му виду отказа; r — количество видов причин отказов (конструктивные, производственные).

Методы определения общей надежности БА и доверительных интервалов для случая независимых испытаний и отказов БА по разным причинам возникновения предложены в работе [11].

Этапы летных испытаний и штатной эксплуатации. Общий процесс верификации требуемых характеристик БА и КА включает летные испытания и проверку БА в процессе приемки КА на орбите. При этом должны обеспечиваться успешность летных проверок на соответствие характеристик БА требованиям ТЗ и отсутствие конструктивных и производственных отказов и неисправностей, связанных с принципиальными конструкторскими ошибками и недостаточной проработанностью технологии изготовления и испытаний БА. Дополнительно учитываются:

- результаты функционирования БА на орбите (отказы, наработка, перерывы, значения определяющих параметров);
- расчетные и расчетно-экспериментальные оценки надежности БА и ее элементов, полученные на этапах проектирования и уточненные по результатам испытаний и эксплуатации;
- объемы отработочных испытаний (число образцов, наработка, отказы БА);
- виды и режимы отработочных испытаний БА и КА в целом;
- результаты нормальных и ускоренных ресурсных испытаний БА;
- результаты диагностического и прогнозирующего контроля ЭРИ, используемого в БА КА.

Для оценки и прогнозирования показателей надежности БА при летных испытаниях и штатной эксплуатации разработан программно-методический комплекс [12, 13], включающий систему анализируемых и прогнозируемых показателей надежности и технического состояния БА и КА, алгоритмы и методы анализа и прогнозирования их работоспособности при орбитальном полете с использованием параметрических, непараметрических и гибридных моделей обработки разнотипных статистических данных малого объема.

Рассмотренный комплекс методов поэтапного обеспечения надежности БА на различных этапах жизненного цикла реализован при создании КА SESAT, Экспресс-АМ, ГЛОНАСС-К, платформы Экспресс-1000, на которых подтверждена возможность создания аппаратов со сроком активного существования 10—15 лет и показателями безотказности на уровне лучших отечественных и зарубежных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урличич Ю. М., Данилин Н. С. Управление качеством космической радиоэлектронной аппаратуры в условиях глобальной открытой экономики. М.: Макс ПРЕСС, 2003. 204 с.
2. МУ 154-24-2001. Проведение анализов по обеспечению надежности оборудования, систем и космических аппаратов. Железногорск: НПО ПМ, 2001. 35 с.
3. Патраев В. Е. Модель надежности космического аппарата // САКС-2004. Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск: СибГАУ, 2004.
4. Надежность ЭРИ: Справочник. М.: Изд-во 22 ЦНИИ МО, 2002.
5. 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.
6. Федосов В. В., Патраев В. Е. Оценка влияния разрушающего физического анализа на характеристики безотказности изделий микроэлектроники, устанавливаемых в бортовую аппаратуру космических аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 1. С. 37—40.
7. Система менеджмента качества. Этапность наземной экспериментальной отработки изделий предприятия. Виды отработочных и контрольных испытаний. Общие требования. Железногорск: НПО ПМ, 2007. 52 с.
8. РД В 319.02.25-2000. КСКК. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оптимизации испытаний на этапах разработки и производства.
9. Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Оптимизация объемов отработки космических аппаратов со сроком активного существования 10—15 лет // Двойные технологии. 2004. № 3. С. 66—80.
10. Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Оценка эффективности оптимизации экспериментальной отработки космических аппаратов навигации и связи // Мат. Всеросс. науч.-техн. конф., посвящ. 40-летию запуска первого КА „Глонасс“. Красноярск: СибГАУ, 2007. С. 35—40.
11. Патраев В. Е., Федосов В. В. Оценка надежности бортовой аппаратуры по результатам дополнительных отбраковочных испытаний комплектующих электрорадиоизделий и заводских испытаний бортовой аппаратуры // Авиакосмическое приборостроение. 2006. № 8. С. 46—49.
12. Максимов Ю. В., Патраев В. Е. и др. Технический отчет №510-4951-02 по ОКР „Надежность КА“. Железногорск: НПО ПМ, 2002. 163 с.
13. Патраев В. Е., Копелев В. Б. Отчет о НИР „Потеха“. Железногорск: НПО ПМ, 2003. 237 с.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

А. А. КОВЕЛЬ

*Научно-производственное объединение прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва
Железногорск*

С. В. ПОКИДЬКО

*Сибирский федеральный университет
Железногорский филиал***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА
ПРИ ОТРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Рассмотрена возможность применения метода математического планирования эксперимента при экспериментальной отработке электронных элементов служебных систем космических аппаратов.

При создании сложных технических объектов (СТО), их проектировании и производстве широко используются методы математического планирования эксперимента (МПЭ), позволяющие интенсифицировать труд исследователя, оптимизировать устройства, сроки и ресурсы, повысить достоверность выводов проводимых исследований и обеспечить высокое качество создаваемых технических средств [1—5].

Методы математического планирования эксперимента используются при проектировании и наземной экспериментальной отработке (НЭО) элементов автоматики и электронной аппаратуры (ЭА) служебных систем космического аппарата (КА), поскольку позволяют моделировать работу ЭА в многофакторной эксплуатационной среде.

Представим ЭА как объект исследования (ОИ), более предпочтительный, чем используемая кибернетическая модель в виде „черного ящика“, так как обычно разработчику ЭА известна внутренняя структура ОИ (качественная модель функционирования), и необходимо по результатам исследования восстановить некоторую аналитическую зависимость — математическую модель (ММ), — отражающую функционирование ОИ в эксплуатационных условиях. Тогда, используя методы МПЭ и варьируя факторы из совокупности

$$\{x_i\} = \{x_{\text{вх}}, x_{\text{внт}}, x_{\text{внш}}\},$$

где $x_{\text{вх}}$ — входные, $x_{\text{внт}}$ — внутренние, $x_{\text{внш}}$ — внешние (влияние температуры окружающей среды, влажности) воздействия, можно представить ММ в виде полинома

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

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

Совокупность возможных ММ ОИ представим в виде $\Pi \left(\sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right)$.

Графически результаты МПЭ представляют факторограммами (рис. 1), где по оси абсцисс приведены номера опытов, по оси ординат — значения $P_{\text{ОИ}}$, полученные в соответствующих опытах (точки соединены условно).

Для большинства ОИ МПЭ, реализованного на одном образце, недостаточно, так как измеренные отклики не отражают влияния неварьируемых внутренних факторов ($x_{\text{внт}}$), и полученные результаты не могут быть применены для другой реализации такого же ОИ.

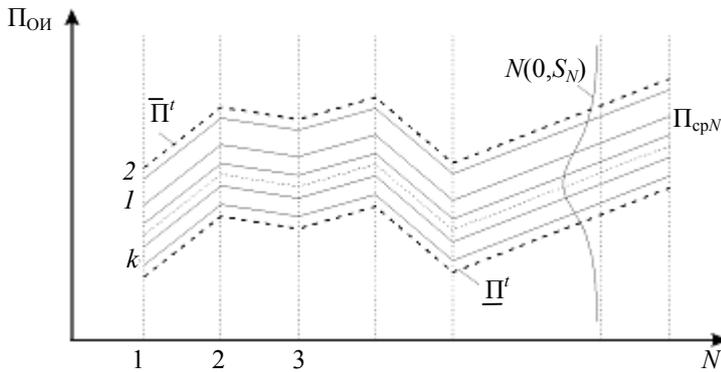


Рис. 1

Необходимо дополнить МПЭ следующими процедурами: эксперимент реализуют на некотором наборе (k) однотипных ОИ (рис. 1). Тогда в каждом опыте получают k значений $\Pi_{\text{ОИ}}$, и может быть синтезировано k ММ, которые будут отличаться величинами соответствующих коэффициентов регрессии (влияния), так как ОИ представлены случайными наборами значений $x_{\text{внт}}$ и индивидуальной

чувствительностью каждой k -й реализации к воздействиям варьируемых факторов.

Используя kN откликов (N — количество опытов для каждого ОИ), оценивают возможные допустимые (толерантные) пределы для $\Pi_{\text{ОИ}}$ [6] как

$$\Pi_{\text{н}} = \underline{\Pi}^t = \Pi_{\text{ср}} - k^* S(\Pi), \quad \Pi_{\text{в}} = \bar{\Pi}^t = \Pi_{\text{ср}} + k^* S(\Pi), \quad (2)$$

где $\Pi_{\text{н}}, \Pi_{\text{в}}$ ($\underline{\Pi}^t, \bar{\Pi}^t$) — нижние и верхние толерантные пределы в каждом опыте (рис. 1); k^* — толерантный коэффициент (табулированный); $\Pi_{\text{ср}}$ — среднее значение $\Pi_{\text{ОИ}}$ в каждом опыте; $S(\Pi)$ — оценка $\sigma(\Pi)$ в каждом опыте.

Полученные результаты позволяют синтезировать базовую модель ОИ в виде

$$\Pi_{\sigma} \left(\sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right) = \Pi_{\text{ср}} \left(\sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right),$$

наилучшим образом отражающую свойства ОИ в факторном пространстве, а также математические модели

$$\underline{\Pi}^t \left(\sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right), \quad \bar{\Pi}^t \left(\sum \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} \Delta x_i \right)$$

как пределы, в которые с заданной вероятностью (P_3) гарантировано попадание не менее γ доли возможных результатов [6]. По этим же результатам ММ однотипных ОИ может быть представлена в виде

$$\Pi_{\text{ОИ}} = \Pi_{\sigma} + N(0, S), \quad (3)$$

где $N(0, S)$ — нормально распределенная компонента с нулевым математическим ожиданием (по условиям нормировки) и усредненной оценкой $\sigma(\Pi)$. Кроме того, по k значениям всех коэффициентов регрессии как случайных величин оценивают их толерантные пределы ($\underline{b}^t, \bar{b}^t$).

Полученные ограничения ($\underline{\Pi}^t, \bar{\Pi}^t$) используют при подготовке документа по технологии изготовления товарной продукции как групповой допуск на контролируемые параметры ($\Pi_{\text{к}}$). Но для СТО единичного производства, каковыми являются КА и его элементы, вводят дополнительные ограничения — индивидуальные допустимые значения параметров объекта контроля (ОК) $\Pi_{\text{ОК}}$, устанавливаемые следующим образом. Так как влияние $N(0, S)$ индивидуально для каждого ОК, их оценивают по результатам опытов, в которых все варьируемые факторы зафиксированы на базовых уровнях (0, 0, ..., 0). А с учетом разбросов коэффициентов влияния

$(\underline{b}^t, \bar{b}^t)$ получают „полосу“ (индивидуальный допуск), в пределах которой при любых сочетаниях воздействий (рис. 2) должен находиться Π_{OK} соответствующего ОК [7].

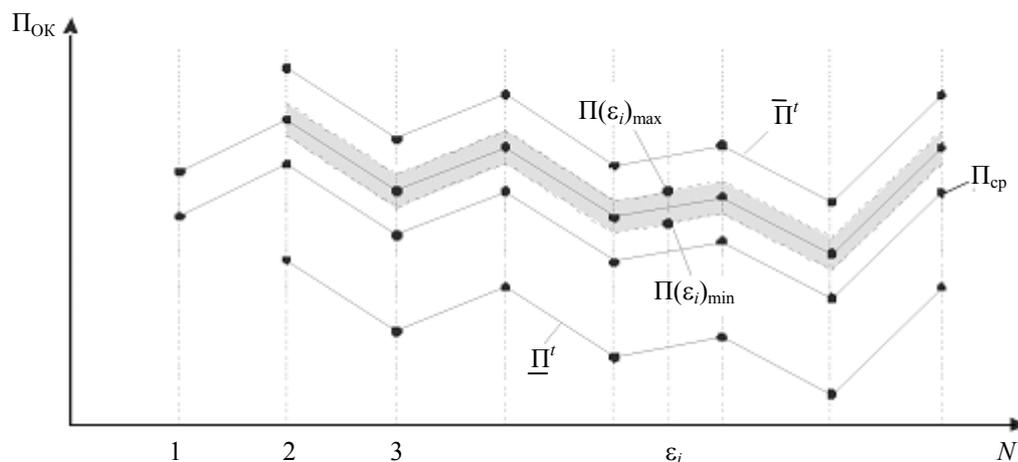


Рис. 2

Следует отметить, что все указанные ограничения порождает объект контроля, и они определяются внутренней структурой и разбросами параметров комплектующих, а также характеризуют ОК. Полученные данные позволяют по отдельным измерениям восстанавливать с P_3 недостающие значения Π_{OK} для нормально функционирующего ОК.

Совместная работа нескольких устройств может быть условно сведена к последовательной схеме как работа генератора (г) и нагрузки (н) вне зависимости от функциональной специфики устройств.

Тогда нормальная совместная работа (совместимость) оценивается как вероятность нахождения параметров генератора (Π_Γ) в пределах ограничений ($P_{\Gamma \rightarrow Н}$), которые обуславливает нагрузка (рис. 3):

$$P_{\Gamma \rightarrow Н} = P(\underline{\Pi}_Н \leq \Pi_\Gamma \leq \bar{\Pi}_Н^t). \tag{4}$$

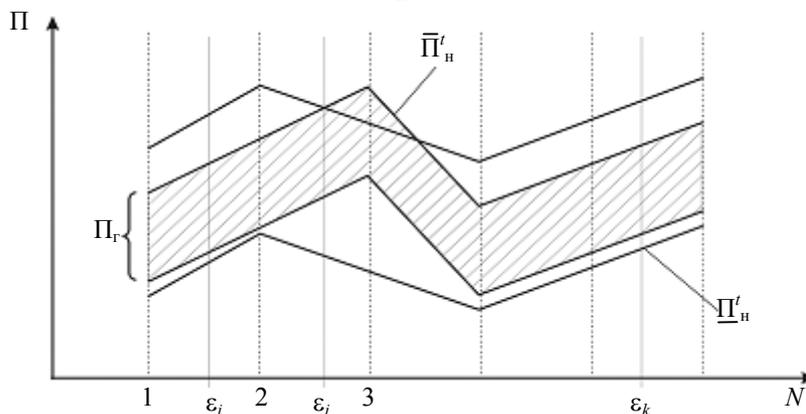


Рис. 3

Так как при использовании алгоритма МПЭ полагается, что результаты всех опытов (1, 2, 3, ..., N) равновероятны, соотношение (4) требует уточнений. Используя информацию о вероятности наступления различных состояний в процессе эксплуатации — $P(\epsilon_i)$, $P(\epsilon_j)$... (сечения ϵ_i , ϵ_j , см. рис. 3), можно придать выражению (4) окончательную форму:

$$P_{\Gamma \rightarrow Н} = \sum_1^k P(\epsilon_i) P(\underline{\Pi}_Н \leq \Pi_\Gamma \leq \bar{\Pi}_Н^t). \tag{5}$$

В результате можно получить дополнительные данные о вероятности параметрических отказов исследуемых устройств.

Если заданы внешние ограничения на параметры ОИ (рис. 4) — $\Pi_{\min}^{\text{доп}}$, $\Pi_{\max}^{\text{доп}}$ — по результатам МПЭ оценивают параметрические запасы работоспособности, необходимые для обеспечения длительного функционирования СТО. Под запасами работоспособности ($\Delta\Pi$) понимают разность между $\Pi_{\text{ОИ}}$ и предельно допустимыми значениями параметра. Тогда

$$\Delta\Pi_{\min} = \underline{\Pi}^t - \Pi_{\min}^{\text{доп}}, \quad \Delta\Pi_{\max} = \bar{\Pi}^t - \Pi_{\min}^{\text{доп}},$$

$$\Delta\bar{\Pi}_{\min} = \Pi_{\max}^{\text{доп}} - \bar{\Pi}^t, \quad \Delta\bar{\Pi}_{\max} = \Pi_{\max}^{\text{доп}} - \underline{\Pi}^t$$

— минимальные и максимальные параметрические запасы работоспособности относительно $\Pi_{\min}^{\text{доп}}$ и $\Pi_{\max}^{\text{доп}}$ соответственно.

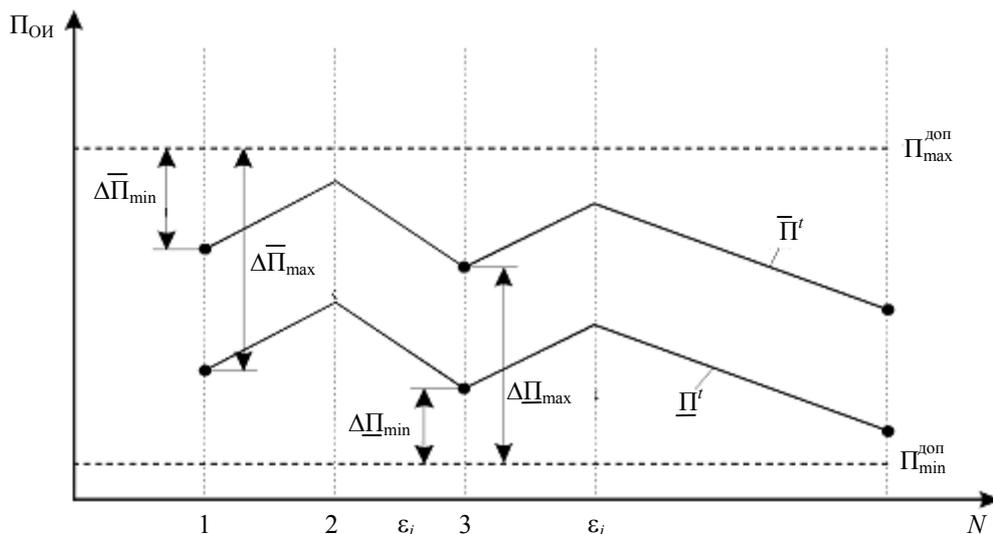


Рис. 4

Знать эти запасы необходимо для учета влияния деградиционных процессов при длительном функционировании КА (10 или более лет), которые вызывают изменение („сползание“) параметров устройств в сторону нижней или верхней границы. Используя данные по запасам работоспособности в каждом опыте (и их ММ), можно оценить значения допустимой скорости деградиционных процессов через скорость изменения определяющих параметров, оценивая $P(\varepsilon_i)$ как

$$P(\varepsilon_i) = \sum_{T_3} \Delta t(\varepsilon_i) / T_3$$

($\Delta t(\varepsilon_i)$ — элемент длительности ε_i -го режима на участке T_3 , $\sum \Delta t(\varepsilon_i) = t(\varepsilon_i)$ — суммарная длительность ε_i -го режима, T_3 — время длительного функционирования СТО), при этом получим оценки допустимых, например минимальных, скоростей деградации:

$$m[v(\varepsilon_i)_{\min}] = \sum_{T_3} v(\varepsilon_i)_{\min} P(\varepsilon_i) = \sum_{T_3} \frac{\Delta\Pi(\varepsilon_i)_{\min}}{t(\varepsilon_i)} P(\varepsilon_i) = \frac{1}{T_3} \sum_{T_3} \Delta\Pi(\varepsilon_i)_{\min},$$

где $\sum \Delta\Pi(\varepsilon_i)_{\min}$ — суммарный минимальный запас работоспособности по всем предполагаемым условиям эксплуатации. Аналогичным образом оцениваются и допустимые максимальные скорости — $v(\varepsilon_i)_{\max}$.

Полученные оценки позволяют построить технологию ресурсных испытаний ЭА и повысить качество получаемых оценок и выводов.

Одним из актуальных вопросов, возникающих при производстве элементов СТО, является выбор условий и режимов испытаний на всех стадиях изготовления как этап обеспече-

ния необходимого качества. Совокупность испытательных режимов, условий и соответствующих им ограничений можно объединить понятием „испытательный тест“ (период испытаний) $T_{и}$. Тогда

$$T_{и} = \{M(x_i); \Pi_{ОК}(\varepsilon_i)_{доп}\},$$

где $M(x_i)$ — совокупность (набор) функциональных и эксплуатационных воздействий, $\Pi_{ОК}(\varepsilon_i)_{доп}$ — ограничения, соответствующие указанным наборам. Набор $M(x_i)$ формируют исходя из вероятности возникновения воздействий при эксплуатации или из условий возникновения максимальных отклонений $\Pi_{ОК}(\underline{\Pi}_{min}^t, \bar{\Pi}_{max}^t)$, или исходя из возможностей производства. Так как в процессе испытаний реализуются переходы из наборов воздействий ε_i в ε_j , возможно оценить конкретные значения некоторых коэффициентов влияния, и $T_{и}$ дополняют ограничениями $\underline{b}^t, \bar{b}^t$ соответствующих коэффициентов:

$$T_{и} = \{M(x_i); \Pi_{ОК}(\varepsilon_i)_{доп}; \underline{b}^t; \bar{b}^t\}.$$

Этап НЭО является „информационно добывающим“, и информационно обеспеченным считают такой ОИ, для определяющих параметров которого имеются результаты МПЭ (N), необходимые для получения адекватной ММ. Это особенно существенно при сопоставлении на этапе НИОКР нескольких (i) устройств-прототипов, относительно которых имеется частичная информация из N_i точек факторного пространства. Тогда отношение (N_i / N) [8] может служить предварительной оценкой информационного обеспечения ОИ. При прочих равных условиях стратегия дальнейшей работы с ОИ может быть ориентирована на образцы с $(N_i / N)_{max}$. При этом эффект информационного обеспечения оценивают как

$$\beta = Z_{max} / Z,$$

где Z_{max} и Z — максимальные и фактические затраты (время исследования, количество опытов, стоимость) без использования информационного обеспечения и с ним. А эффективность информационного обеспечения ($\mathcal{E}_{и}$) оценивают как отношение фактического эффекта (β) к максимальному (β_{max}):

$$\mathcal{E}_{и} = \frac{\beta_{max}}{\beta} = \frac{Z_{min}}{Z}.$$

Полученное соотношение отражает значение информации, позволяющей оценить минимальные затраты, и выбрать способ НЭО, требующий минимальных ресурсов.

Опыт и результаты применения МПЭ при НЭО ЭА КА свидетельствуют о большом информационном потенциале и инженерных возможностях одного из активных статистических методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. М.: Мир, 1988.
2. Барабашук В. И. и др. Планирование эксперимента в технике. Киев: Техника, 1984.
3. Володарский Е. Т. и др. Планирование и организация измерительного эксперимента. Киев: Вища школа, 1987.
4. Мусин А. И. Планирование эксперимента при моделировании погрешности средств измерений. М.: Изд-во стандартов, 1989.
5. Острейковский В. А. Многофакторные испытания на надежность. М.: Энергия, 1978.

6. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1969.
7. Ковель А. А., Серегин С. А. Применение МПЭ для формирования допусков и сдаточных норм на параметры электронных устройств // Производственно-технический опыт. 1984. № 5.
8. Ковель А. А., Туркенич Р. П. Использование методики математического планирования для количественной оценки уровня информационного обеспечения // Науч.-метод. сб. „Межотраслевая информационная служба“. М.: ВИМИ, 1991. № 2.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

УДК 621.396.6–001.4

А. А. КОВЕЛЬ

*Научно-производственное объединение прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва
Железногорск*

УСТАНОВЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Предложен подход к формированию допусков на параметры электронной аппаратуры по результатам математического планирования эксперимента.

Вопросы обоснованного назначения допусков на параметры радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) постоянно находятся в поле внимания специалистов [1—5]. Миниатюризация, расширение функций устройств, совместимость электронных устройств (ЭУ) в пределах РЭА, расширение сферы применения РЭА привнесли в эту проблему ряд новых аспектов. Разработчиками РЭА космических аппаратов (КА) должно учитываться влияние всех отмеченных обстоятельств, а ограниченное количество образцов ЭУ для наземной экспериментальной отработки (НЭО) обостряет проблему.

Математическое планирование эксперимента (МПЭ) позволяет использовать новые возможности и инженерные подходы при назначении допусков РЭА, которые находятся в стадии разработки и апробации [2—5].

Так как при исследовании параметров ЭУ ($\Pi_{ЭУ}$) методами МПЭ невозможно отразить в регрессионной математической модели влияние разброса параметров внутренних пассивных и активных элементов, $\{x_{внт}\}$, зависимость $\Pi_{ЭУ}$ от воздействующих факторов отражает только влияние входных, $\{x_{вх}\}$, и внешних, $\{x_{внш}\}$, воздействий. Таким образом, каждое ЭУ приобретает свою индивидуальную зависимость $\Pi_{ЭУ}$ от $\{x_{вх}\}$, $\{x_{внш}\}$.

Если проанализировать отклики электронных устройств на совокупность номинальных уровней указанных воздействий ($x_{вх} = x_{внш} = 0$ [3]), то последние могут быть распределены по нормальному закону, так как $\{x_{внт}\}$ — совокупность внутренних параметров большого количества элементов, интегрированные вклады которых от образца к образцу ЭУ (1, 2, 3, ..., k) отличаются незначительно. Указанный опыт ($x_{вх} = x_{внш} = 0$) постоянно реализуется при различных испытаниях ЭУ и может быть обозначен как нулевой, обычно это центр планирования [3], относительно которого производят варьирование параметров воздействий.

Тогда при реализации МПЭ с каждым k-м ЭУ начальные уровни $\Pi_{ЭУ}^k$, полученные в нулевом опыте, „модулируются“ совокупностями воздействий, воспроизводимых в соответ-

ствии с матрицей планирования (МП). При этом качественный характер полученных откликов $\Pi_{ЭУ}$ будет одинаков, если только при изготовлении ЭУ не были использованы дефектные элементы или допущена монтажная ошибка.

Указанные результаты МПЭ хорошо иллюстрирует факторограмма (рис. 1), где по оси абсцисс отложены номера опытов (1, 2, 3, ..., N) согласно МП, а по оси ординат в каждом опыте — результаты измерений $\Pi_{ЭУ}^k$ [4, 5] (точки — результаты соединены условно). Таким образом, факторограмма представляет некоторый диапазон („коридор“) откликов, обусловленный влиянием $\{x_{внт}\}$.

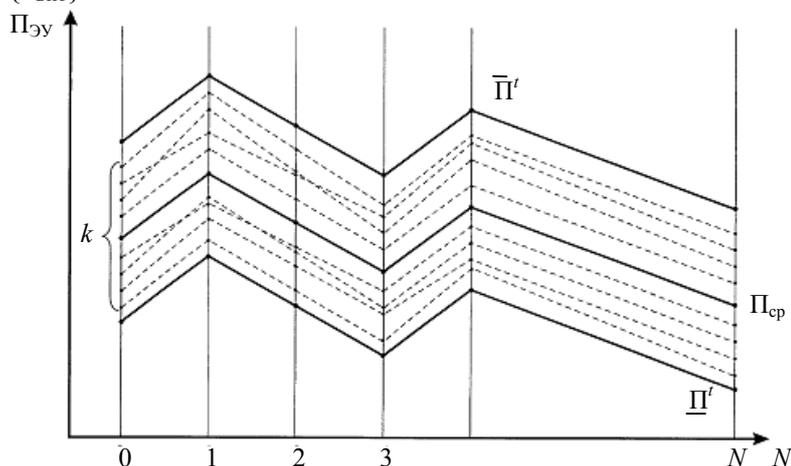


Рис. 1

Из рис. 1 также видно, что каждая k -я реализация ЭУ индивидуальным образом откликается на изменение уровней факторов (траектории перехода из опыта в опыт не параллельны), что свидетельствует о различной индивидуальной чувствительности совокупности $\{x_{внт}\}$ каждого ЭУ на изменение уровней факторов. Вследствие этого при качественно одинаковом характере зависимостей, отражающих влияние $\{x_{вх}\}$ и $\{x_{внш}\}$, коэффициенты регрессии в математических моделях $\Pi_{ЭУ}$ оказываются различными, что затрудняет распространение результатов МПЭ с k -выборкой на последующие образцы ЭУ. Это также не позволяет восстанавливать (прогнозировать) возможные значения $\Pi_{ЭУ}$ в опытах по результатам, полученным ранее.

Располагая результатами испытаний k образцов ЭУ, полученными на этапе экспериментальной отработки и других испытаний (реализованных по технологии МПЭ), можно сформулировать некоторые положения [4, 5]:

— группу факторов, варьируемых при реализации МПЭ и воспроизводящих эксплуатационные условия, составляют входные $\{x_{вх}\}$ и внешние $\{x_{внш}\}$ воздействия;

— совокупность внутренних факторов $\{x_{внт}\}$, представленных интегрированными разбросами параметров элементов ЭУ, может быть разделена на поддающиеся (параметры пассивных элементов) и не поддающиеся варьированию (параметры активных элементов);

— МПЭ с k образцами исследуемых ЭУ дает k откликов в каждом опыте, характеризующих k интегрированных случайных наборов уровней внутренних факторов (уровни $\{x_{внт}\}$ „варьирует“ случай), что позволяет синтезировать k математических моделей параметров исследуемого ЭУ;

— параметры пассивных элементов ЭУ также предпочтительно не варьировать (не извлекать элементы из ЭУ), чтоб сохранить истинную картину внутренних взаимных влияний всех элементов в составе конструктива.

Используя полученный таким образом массив результатов, можно в каждом опыте получить среднее значение $\Pi_{ЭУ}$ ($\Pi_{ср}$) как оценку математического ожидания, для которого

построить полиномиальную математическую модель. Одновременно в каждом опыте получают оценки стандартного отклонения от Π_{cp} как

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^k (\Pi_{\text{cp}} - \Pi_k)^2}{k-1}},$$

где Π_k — каждый из $1, 2, \dots, k$ результатов эксперимента в $1, 2, \dots, N$ опытах; S_N — оценка σ_N в тех же опытах.

Поскольку результаты испытаний k образцов как малой выборки [6] не могут исчерпать возможного диапазона значений непрерывной случайной величины $\Pi_{\text{ЭУ}}$ в каждом опыте, следует оценить возможные границы, в которых могут оказаться значения параметров последующих образцов, т.е. допуски. В качестве таких границ-допусков могут быть выбраны, например, толерантные пределы [7] $\Pi_{\text{ЭУ}}$ в условиях каждого опыта:

$$\Pi_N^t = \Pi_{\text{cp}}^N \pm k^t S_N,$$

где Π_{cp}^N — полученные ранее средние значения $\Pi_{\text{ЭУ}}$ в условиях каждого $(1, 2, \dots, N)$ опыта; k^t — толерантный коэффициент [8].

На факторограмме (рис. 1) отмечены Π_{cp} , нижний ($\underline{\Pi}^t$) и верхний ($\overline{\Pi}^t$) толерантные пределы Π^t , вычисленные в каждом опыте, которые могут интерпретироваться как результаты „мысленного“ опыта [9].

Учитывая изложенное, зависимость $\Pi_{\text{cp}}(x_i)$, от которой отсчитываются $\underline{\Pi}^t$ и $\overline{\Pi}^t$, может быть принята базовой, и тогда

$$\Pi_0 = \Pi_{\text{cp}} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{(l,j) \in i} b_{lj} x_l x_j + \dots, \quad (1)$$

где все коэффициенты регрессии — средние значения соответствующих коэффициентов из k математических моделей $\Pi_{\text{ЭУ}}$, полученных по стандартным для МПЭ процедурам [3].

Одновременно следует оценить возможные разбросы всех коэффициентов влияния (регрессии) как случайных величин по результатам МПЭ с k образцами ЭУ:

$$b^t = b_{\text{cp}} \pm k^t S(b),$$

где b_{cp} — средние значения соответствующих коэффициентов регрессии по каждому $(1, 2, \dots, n)$ фактору, использованные в полиномиальной модели (1); $S(b)$ — оценки $\sigma(b)$ для тех же коэффициентов.

Теперь результаты испытаний последующих образцов, полученные при номинальных уровнях варьируемых факторов ($x_{\text{вх}} = x_{\text{внш}} = 0$), можно трансформировать в результаты всех опытов МП, используя коэффициенты базовой модели (1) с учетом их толерантных значений. Таким образом, возможные значения $\Pi_{\text{ЭУ}}$ в условиях каждого опыта будут находиться в интервале значений параметра ($x_{\text{min}}, x_{\text{max}}$), обусловленном минимальными (\underline{b}^t) и максимальными (\overline{b}^t) уровнями соответствующих коэффициентов и сочетанием уровней воздействующих факторов.

Рассмотренный подход позволяет дифференцировать допустимые отклонения $\Pi_{\text{ЭУ}}$ в зависимости от решаемой задачи. Для обоснованной оценки качества контролируемого ЭУ не

могут быть установлены ограничения, не определяемые режимами и условиями испытаний. Обратимся к факторограмме (рис. 2).

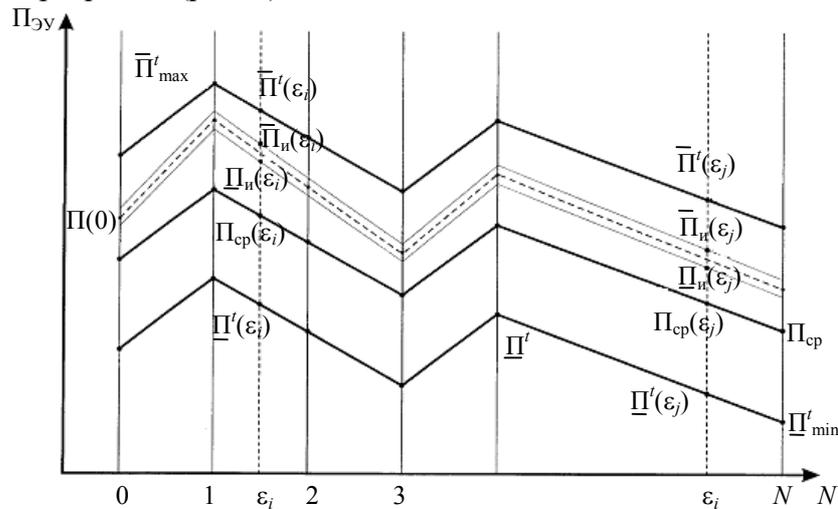


Рис. 2

Для каждого типа ЭУ могут быть установлены двусторонние ограничения $\overline{П_{ЭУ}}$ в виде толерантных пределов $\underline{Π^t}$, $\overline{Π^t}$, интегрированные в математических моделях, т.е. для различных условий (сечений коридора откликов) существуют разные ограничения для $\overline{П_{ЭУ}}$. Так (качественная картина), для сечения ϵ_i (один набор уровней факторов) это $\underline{Π^t}(\epsilon_i)$, $\overline{Π^t}(\epsilon_i)$, а для сечения ϵ_j (другой набор уровней факторов) — $\underline{Π^t}(\epsilon_j)$, $\overline{Π^t}(\epsilon_j)$. И чтобы ЭУ было признано годным, оно должно обеспечивать параметры в пределах тех ограничений, которые для данных условий определены математическими моделями $\underline{Π^t}$, $\overline{Π^t}$.

Указанный подход приемлем для контроля качества ЭУ массового (серийного) производства. В то же время для изделий единичного изготовления, что характерно, например, для РЭА КА с длительным сроком активного существования, нужен более тщательный контроль. В этом случае контролируемый параметр в тех же условиях (ϵ_i , ϵ_j) должен находиться в индивидуальных допустимых пределах, определяемых уровнями воздействий и разбросами коэффициентов регрессии (b^t , $\overline{b^t}$). Для оговоренных условий (ϵ_i , ϵ_j) это будут соответственно $\underline{Π_{и}}(\epsilon_i)$, $\overline{Π_{и}}(\epsilon_i)$ и $\underline{Π_{и}}(\epsilon_j)$, $\overline{Π_{и}}(\epsilon_j)$. Указанные ограничения при этом должны находиться в пределах толерантных границ для выбранных условий:

$$\underline{Π_{и}}(\epsilon_i) > \underline{Π^t}(\epsilon_i), \quad \overline{Π_{и}}(\epsilon_i) < \overline{Π^t}(\epsilon_i) \text{ и т. д.}$$

Следует также отметить, что существуют ограничения экстремальных отклонений $\overline{П_{ЭУ}}$, которые не могут быть превышены ни при каких сочетаниях уровней воздействий, — $\underline{Π^t}_{\min}$ и $\overline{Π^t}_{\max}$.

Таким образом, в зависимости от задач контроля показателей качества ЭУ могут быть классифицированы три вида допусков (рис. 2):

- индивидуальные — $\underline{Π_{и}}$, $\overline{Π_{и}}$;
- локальные — $\underline{Π^t}(\epsilon_i)$, $\overline{Π^t}(\epsilon_i)$;
- глобальные — $\underline{Π^t}_{\min}$, $\overline{Π^t}_{\max}$.

Применение рассмотренной методологии при контроле параметров узлов и блоков РЭА служебных систем КА позволило повысить эффективность контроля на всех этапах изготовления и испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В. Н. Нормы и допуски на параметры функциональных узлов. М.: Энергия, 1976. 72 с.
2. Фомин А. В., Борисов В. Ф., Чермошенский В. В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Сов. радио, 1973.
3. Барабашук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование эксперимента в технике. Киев: Техника, 1984.
4. Ковель А. А., Серегин С. А. Применение МПЭ для формирования допусков и сдаточных норм на параметры электронных устройств // Производственно-технический опыт. 1984. № 5.
5. Ковель А. А., Покидько С. В. Определение допустимых границ параметров узлов РЭА при выборочном контроле // Производственно-технический опыт. 1987. № 9—10.
6. Гаскаров Д. В., Шаповалов В. И. Малая выбока. М.: Статистика, 1978.
7. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1969.
8. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике. М.: Финансы и статистика, 1982.
9. Чернов А. П. Мысленный эксперимент. М.: Наука, 1979. 200 с.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

УДК 681.586:621.317.799

А. И. ГОРНОСТАЕВ, С. А. РЫБАКОВ

*Научно-производственное объединение прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва
Железнодорожск*

ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ КОНТРОЛЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Предлагаются варианты построения измерительного тракта модуля контроля и преобразования напряжений. Рассматриваются способы повышения точности измерения с помощью микроЭВМ.

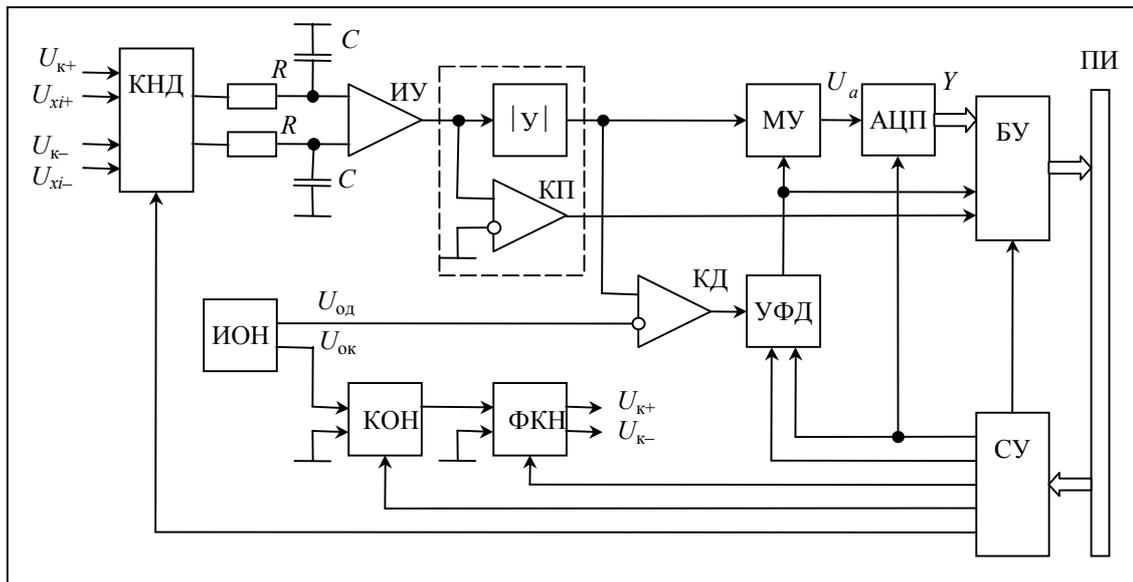
Одной из важнейших задач при проектировании модулей контроля и преобразования напряжений (МКПН), применяемых в бортовой аппаратуре с длительным сроком эксплуатации для контроля постоянных и медленно изменяющихся напряжений, является обеспечение высокой точности измерения в течение всего срока эксплуатации. Наилучшие результаты при решении этой задачи могут быть получены с помощью микроЭВМ. В этом случае повышение точности измерения основано на проведении автокалибровок по образцовому источнику, встроенному в МКПН (с помощью автокалибровок при определенных условиях удастся минимизировать погрешность МКПН до уровня погрешности образцового источника).

Принцип проведения автокалибровок по двум точкам на примере контроля однополярного напряжения изложен в работе [1]. Однако при практической реализации МКПН приходится учитывать возможность контроля разнополярных напряжений, а также необходимость разбиения диапазона измерения на несколько участков, что приводит к усложнению структуры МКПН и алгоритма проведения автокалибровок. Структурные изменения при этом могут

быть определены после того, как будут проанализированы требования, относящиеся к основным техническим характеристикам МКПН, а именно к количеству опрашиваемых каналов, входному сопротивлению, входному току, помехоустойчивости, диапазону измерения, чувствительности, разрешающей способности, точности и быстродействию.

Базовыми структурными элементами МКПН являются коммутатор напряжений датчиков, усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и элементы сопряжения с микроЭВМ через параллельный интерфейс — буферное устройство и схема управления. Проанализируем, каким образом повышение требований к основным техническим характеристикам приводит к усложнению структуры МКПН, по функциональной схеме, приведенной на рисунке (где КНД — коммутатор напряжений датчиков, ИУ — инструментальный усилитель, $|Y|$ — устройство выделения абсолютной величины сигнала, МУ — масштабирующий усилитель, КП — компаратор полярности, КД — компаратор поддиапазона, УФД — устройство фиксации поддиапазона, ИОН — источник опорных напряжений, КОН — коммутатор опорного напряжения; ФКН — формирователь калибровочных напряжений, БУ — буферное устройство, СУ — схема управления, ПИ — параллельный интерфейс микроЭВМ).

Построение входных устройств. При контроле разнополярных напряжений датчиков, поступающих по нескольким ($k > 1$) каналам, возникает необходимость сохранения развязки выходных цепей датчиков друг от друга, поскольку объединение одного из полюсов выходных цепей с общей шиной питания МКПН может привести к взаимному влиянию датчиков. Эта задача может быть решена путем применения в МКПН инструментального усилителя, который характеризуется высоким значением входного сопротивления между дифференциальными входами [2]. Однако это потребует коммутации входных цепей каналов контроля уже не по одному полюсу, а обоих полюсов одновременно (U_{xi+} , U_{xi-}). Аналогичным образом должны коммутироваться оба полюса входных цепей канала калибровки ($U_{к+}$, $U_{к-}$).



Для защиты от возможной высокой статической разности потенциалов между дифференциальными входами и общей шиной питания потребуется введение высокоомных резисторов привязки R_{Π} к общей шине и схемы ограничения от перегрузки (на рисунке не показаны). При этом, если не учитывать шунтирующего действия высокого входного сопротивления инструментального усилителя, входное сопротивление каналов контроля составит $R_{вх} = 2R_{\Pi}$, что приводит к появлению методической погрешности в результатах измерения напряжения:

$$\delta = R_{\Pi} / (R_{вх} + R_{\Pi}),$$

где R_d — внутреннее сопротивление датчика. За счет включения резисторов привязки R_n между дифференциальными входами установится напряжение $U_x = U_d(1 - \delta)$, где U_d — контролируемое напряжение датчика, а на дифференциальных входах относительно общей шины питания установятся разнополярные напряжения $U_{\pm} = \pm U_x/2$. Это приведет к необходимости использования для коммутации напряжений датчиков разнополярных аналоговых коммутаторов.

Входной ток $I_{вх}$ канала контроля также может исказить результаты измерения вследствие методической погрешности, абсолютное значение которой составит $\Delta = I_{вх} R_d$. Это накладывает ограничения на входные токи затвора полевых транзисторов инструментального усилителя, токи утечки схемы ограничения от перегрузки и другие составляющие, определяемые схемами входных цепей коммутатора напряжений датчиков.

При выборе способа обеспечения требуемой помехоустойчивости учитывается, что в процессе контроля напряжений датчиков во входных цепях инструментального усилителя действуют синфазные и дифференциальные составляющие помехи, вызванные в основном электромагнитными наводками, которые приводят к искажению результатов измерения случайной погрешностью. При этом степень защищенности МКПН от электромагнитных наводок характеризуется коэффициентом подавления синусоидальной помехи $K_{сп} = 20 \lg(U_{сп}/\Delta U)$, где $U_{сп}$ — амплитуда синусоидальной помехи, ΔU — погрешность результатов измерения вследствие действия этой помехи как для дифференциальной, так и для синфазной составляющей.

Для защиты от воздействия электромагнитных наводок в кабельной сети обычно предусматривается экранирование проводов датчиков. Способы экранирования и сравнительный анализ их эффективности представлены в [1, 3]. Однако экраны кабельной сети защищают провода датчиков от внешних наводок частично, поэтому для подавления высокочастотных помех во входных коммутируемых цепях инструментального усилителя устанавливаются пассивные RC -фильтры с постоянной времени $\tau_{\phi} = RC$, позволяющей в течение времени опроса T_o канала сохранить в одном цикле результаты измерения напряжения с требуемой точностью. Если в каналах присутствуют низкочастотные помехи, которые в одном цикле измерения неотличимы от входных напряжений в течение времени опроса T_o , то уменьшение искажения результатов измерения достигается с помощью микроЭВМ путем статистической обработки ряда из n циклов измерений [4].

В измерительных системах обычно не все каналы контроля МКПН используются. Если входные цепи таких каналов оставить „в свободном состоянии“, то повышенный уровень наведенных в них помех может повлиять на результаты измерения в используемых каналах. Поэтому для исключения взаимовлияния между каналами в кабельной сети предусматривается возможность объединения дифференциальных входов между собой или с общей шиной.

Разбиение диапазона измерения на поддиапазоны. При измерении входного напряжения U_x в широком диапазоне последний для получения на выходе АЦП необходимого цифрового эквивалента Y_x разбивается на два — старший и младший поддиапазоны с использованием устройства автоматического переключения с одного поддиапазона измерения в другой. Разбиение общего диапазона измерения на поддиапазоны производится исходя из требования обеспечения в каждом поддиапазоне чувствительности S_n (степень квантования) и разрешающей способности $1/Y_{\max}$ (Y_{\max} — максимальное количество ступеней квантования).

Согласование максимальных уровней входных напряжений $U_{x\max}$ в разных поддиапазонах с номинальным уровнем напряжения преобразования АЦП $U_{аном}$, которому соответствует номинальный цифровой эквивалент $Y_{ном}$, обеспечивается с помощью масштабирующего усилителя. Уровень номинального напряжения $U_{аном}$ выбирается несколько меньшим максимально допустимого уровня преобразования АЦП U_{amax} . При этом учитывается запас на допустимую перегрузку напряжения U_x в младшем поддиапазоне и на нестабильность параметров передаточной характеристики измерительного тракта, при которой значение U_a не пре-

высит максимального в процессе всего срока эксплуатации МКПН. Обычно этот запас составляет не более 20 % от номинального напряжения $U_{\text{ном}}$, при этом чувствительность МКПН в поддиапазонах определяется из соотношения $S_{\text{и}}=U_{\text{xmax}}/Y_{\text{ном}}$.

Для обеспечения возможности автоматического переключения поддиапазонов в структуре МКПН применяются источник опорного напряжения уровня переключения поддиапазонов $U_{\text{од}}$ и компаратор поддиапазонов, изменяющий коэффициент усиления масштабирующего усилителя $K_{\text{му}}$ в зависимости от установившегося поддиапазона (при $U_{\text{x}}>U_{\text{од}}$ устанавливается старший поддиапазон, при $U_{\text{x}}<U_{\text{од}}$ — младший). Поскольку уровень напряжения U_{x} может как превышать уровень напряжения $U_{\text{од}}$, так и снижаться по отношению к нему, для обеспечения условия $K_{\text{му}} = \text{const}$ в процессе измерения в структуру МКПН вводится устройство фиксации поддиапазона. При этом признак поддиапазона фиксируется после возникновения переходных процессов в инструментальном усилителе в момент начала опроса канала. Запуск АЦП осуществляют после завершения переходных процессов в масштабирующем усилителе, возникающих в момент фиксации поддиапазона. Для исключения возможной перегрузки масштабирующего усилителя из-за неопределенности уровня входного напряжения при опросе канала по завершении опроса предыдущего канала осуществляется начальная предустановка признака старшего поддиапазона. Для исключения ложной фиксации поддиапазона под действием помех при измерении напряжений U_{k} в калибровочных точках, близких к уровню напряжения $U_{\text{од}}$, признак поддиапазона устанавливается в соответствии с калибруемым поддиапазоном. Уровень напряжения $U_{\text{од}}$ для удобства настройки калибровочных точек выбирается с учетом его возможной нестабильности несколько выше номинального значения входного напряжения $U_{\text{xном}}$, обычно не более 10 %, но не превышая уровень напряжения допустимой перегрузки U_{xmax} в младшем поддиапазоне.

Для повышения разрешающей способности $1/Y_{\text{max}}$ обычно выбирают АЦП с увеличенной разрядностью. Если разрядности АЦП недостаточно для получения требуемой разрешающей способности при одновременном контроле положительных и отрицательных напряжений (старший разряд АЦП используется как признак полярности напряжения), возможно разбиение поддиапазона измерения на положительную и отрицательную области, каждая из которых отдельно „отрабатывается“ полной шкалой АЦП, что повысит разрешающую способность в два раза. Однако в этом случае в состав МКПН вводятся схема выделения абсолютной величины сигнала [5] и компаратор полярности (на рисунке выделены пунктиром). Необходима высокая точность срабатывания компаратора полярности при измерении малых уровней сигнала, поскольку ошибка в определении знака приводит к скачкообразному увеличению погрешности измерения.

Компенсация погрешности измерения. Для обеспечения требуемой точности измерения в каждом поддиапазоне следует учитывать, что в измерительном тракте возникают две составляющие погрешности: случайная, вызванная электромагнитными наводками, нестабильностью напряжения источника питания и опорного напряжения, погрешностью квантования АЦП и др., и систематическая, вызванная фиксированными смещениями результатов измерения (разброс параметров ЭРИ, их температурная и временная нестабильность и др.).

Случайная составляющая погрешности непрогнозируема и в процессе измерения может изменяться в определенных пределах, поэтому для ее уменьшения принимают схемные и конструктивные решения с учетом электромагнитной совместимости. Так, для подавления радиопомех, создаваемых при коммутации электрических цепей, вместо пассивных RC-фильтров могут использоваться активные устройства подавления радиопомех [6].

Систематическая погрешность не изменяется при многократных измерениях, поэтому она вычисляется с помощью микроЭВМ путем определения констант уравнения передаточной характеристики измерительного тракта по результатам измерения напряжения в калибровочных точках, а результат измерения калибруется. Действительно, в общем случае цифровой

эквивалент Y_x входного напряжения U_x определяется отклонением реальной передаточной характеристики измерительного тракта от идеальной и может быть получен с некоторой погрешностью вследствие начального смещения $E_{см}$ (аддитивная составляющая), отличия коэффициента передачи K_p от номинального (мультипликативная составляющая) и нелинейности передаточной характеристики (нелинейная составляющая). Если пренебречь последней (линейность измерительного тракта обеспечивается выбором соответствующей элементной базы), то получить результат с минимальной погрешностью возможно, измерив:

- входное напряжение $Y_x = K_p(U_x + E_{см})$;
- напряжение в первой калибровочной точке $Y_{к1} = K_p(U_{к1} + E_{см})$;
- напряжение во второй калибровочной точке $Y_{к2} = K_p(U_{к2} + E_{см})$.

Последние две операции являются калибровочными, позволяющими микроЭВМ автоматически рассчитать:

- коэффициент передачи $K_p = (Y_{к1} - Y_{к2}) / (U_{к1} - U_{к2})$;
- начальное смещение $E_{см} = (U_{к1}Y_{к2} - U_{к2}Y_{к1}) / (Y_{к1} - Y_{к2})$;
- действительное значение входного напряжения $U_x = [(Y_x - Y_{к2})U_{к1} - (Y_x - Y_{к1})U_{к2}] / (Y_{к1} - Y_{к2})$.

Из последней формулы видно, что напряжение U_x определяется по напряжениям $U_{к1}$ и $U_{к2}$, формируемым от образцового источника, влияние начального смещения $E_{см}$ и коэффициента передачи K_p исключается.

Для проведения автокалибровок в поддиапазонах измерения необходимо использовать точки, соответствующие выбранному поддиапазону, поэтому в структуру МКПН вводятся общий источник опорного напряжения калибровки $U_{ок}$ и управляемый формирователь калибровочных напряжений U_k , в которых используются образцовые элементы необходимого класса точности. Эффективность автокалибровок будет зависеть от стабильности сетки калибровочных напряжений U_k в течение всего срока эксплуатации МКПН, поэтому в источнике опорного напряжения $U_{ок}$ используется прецизионный стабилитрон, для которого допускается большой разброс напряжения стабилизации при высокой стабильности по температуре и во времени, а в формирователе калибровочных напряжений используется делитель напряжения из прецизионных резисторов, позволяющий получить несколько значений калибровочных напряжений U_k и осуществить необходимую подстройку [1, 5].

Для варианта использования в МКПН схемы выделения абсолютной величины сигнала калибровку поддиапазонов в положительной и отрицательной областях производят с одинаковыми по уровню, но противоположными по знаку напряжениями U_k , поэтому в формирователе калибровочных напряжений предусматривают изменение полярности выходных цепей $U_{к+}$ и $U_{к-}$ путем перекрестной коммутации прецизионных резисторов. Однако прецизионные резисторы имеют худшую по сравнению с прецизионными стабилитронами стабильность параметров во времени. Так, для резисторов типа С2-29В класса точности $\pm 0,05\%$ нестабильность, гарантируемая ТУ, при суммарном времени включения менее 2000 ч составляет $\pm 0,05\%$, а при превышении этого времени может возрасти до $\pm 0,5\%$. Поэтому для сохранения стабильности напряжений U_k делитель напряжения из прецизионных резисторов подключается к источнику напряжения $U_{ок}$ только на время автокалибровки, для чего в структуру МКПН дополнительно вводят коммутатор опорного напряжения.

Управление процессом измерения. Процесс измерения напряжения U_x и U_k предполагает циклический режим работы микроЭВМ, ограниченный допустимой длительностью цикла измерения $T_{ци}$, в течение которой опрашиваются в МКПН все k каналов контроля и канал калибровки. Временная диаграмма опроса каналов полностью задается микроЭВМ в соответствии с алгоритмами, заложенными в ее программном обеспечении. Обмен информацией МКПН с микроЭВМ осуществляется через параллельный интерфейс. Запись информации (в зависимости от которой выбирается номер опрашиваемого канала, устанавливается уровень калибровочного напряжения, фиксируется поддиапазон и запускается АЦП) осуществ-

ляется в регистры схемы управления. Чтение информации с АЦП, компаратора полярности и устройства фиксации поддиапазона осуществляется через буферное устройство.

Длительность $T_{ци}$ характеризует быстродействие МКПН и зависит от количества опрашиваемых каналов $(k+1)$ и времени опроса одного канала T_0 , т.е. $T_{ци}=(k+1)T_0$. При заданном количестве каналов контроля k быстродействие МКПН может регулироваться изменением значения T_0 . При этом необходимо учитывать и другие показатели, определяющие быстродействие МКПН, а именно время установления напряжения в инструментальном усилителе $t_{ну}$ при скачкообразном изменении напряжения на входе RC-фильтров, время установления напряжения в масштабирующем усилителе $t_{му}$ при изменении его коэффициента усиления, время преобразования $t_{п}$ АЦП и время фиксации данных $t_{ф}$ на выходе АЦП. Расчетное значение $T_0=t_{ну}+t_{му}+t_{п}+t_{ф}$.

Для автокалибровки результатов измерения напряжения U_x необходимо иметь результаты измерения U_k во всех калибровочных точках, поэтому МКПН дополнительно характеризуется периодичностью тестирования калибровочных точек. Длительность цикла тестирования $T_{цт}$ калибровочных точек зависит от количества m поддиапазонов измерения, т.е. $T_{цт}=2mT_{ци}$. Результаты тестирования калибровочных точек используются также для оценки исправности МКПН, для чего в микроЭВМ обеспечивается допусковый контроль рассчитываемых констант измерительного тракта $K_{п}$ и $E_{см}$ в каждом поддиапазоне измерения. Если их значения выходят за пределы допуска, то в микроЭВМ формируется сообщение о неисправности МКПН, если значения остаются в пределах нормы, то микроЭВМ переводится в режим вычисления действительных значений измеренных напряжений U_x .

Высокая точность измерения напряжения достигается в МКПН за счет специального программного обеспечения микроЭВМ. Проведение автокалибровок позволяет поддерживать требуемую точность измерения в течение всего срока эксплуатации, при этом к самому измерительному тракту не предъявляется высоких требований по точности. Статистической обработкой результатов измерения достигается повышенная помехоустойчивость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евланов Ю. Н. Современные цифровые вольтметры: Уч. пос. для СПТУ. М.: Высш. шк., 1987.
2. Староверов К. Операционные и инструментальные усилители на производственной линии Burr-Brown // Новости электроники. 2006. № 4.
3. Спектор С. А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений: Уч. пос. для вузов. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Измерение электрических и неэлектрических величин: Уч. пос. для вузов / Н. Н. Евтихеев, Я. А. Купершмидт, В. Ф. Папуловский, В. Н. Скугоров. М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Алексенко А. Г., Коломбет Е. А., Стародуб Г. И. Применение прецизионных аналоговых ИС. М.: Радио и связь, 1981.
6. Князев А. Д., Кечиев Л. Н., Петров Б. В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

А. И. ГОРНОСТАЕВ

*Научно-производственное объединение прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва
Железнодорожск*

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПОМЕХ НА ШИНАХ ПИТАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

Исследована проблема контроля параметров помех при анализе помеховой обстановки на шинах питания бортовой аппаратуры в служебных системах космического аппарата. Предложен способ решения задачи выделения различных параметров сигналов помех для определения их динамических свойств. Приведен пример практической реализации устройства выделения параметров помех.

Одной из актуальных проблем при исследовании помеховой обстановки на шинах питания бортовой аппаратуры (БА) в процессе испытаний и штатной эксплуатации служебных систем космических аппаратов (КА) является контроль параметров помех на шинах питания БА, несущих информацию о качестве питания (уровне пульсаций, форме и длительности колебаний напряжения питания и тока потребления, а также распределении энергии их спектральных составляющих по различным поддиапазонам частот). Эту задачу возможно решать с помощью специальной измерительной аппаратуры, обеспечивающей анализ параметров помех на шинах питания всего комплекса БА, в котором условно можно выделить систему электропитания (СЭП) с различными уровнями напряжения на выходных шинах питания и энергопотребляющие системы (ЭПС) с соответствующими уровнями напряжения. Контроль выделенных параметров помех и их дальнейшая обработка производятся в масштабе реального времени. Это позволяет определять корреляционные зависимости между отдельными сигналами помех и выявлять основные источники помех, которые могут быть причиной неустойчивой работы БА. Сбор и обработка информации при этом осуществляются с помощью специальных вычислительных средств.

Для исследования помеховой обстановки на шинах питания получили развитие два варианта построения измерительной аппаратуры. Один вариант ориентирован на исследование помеховой обстановки на шинах питания только в процессе наземных комплексных испытаний БА. При этом в качестве специальных вычислительных средств и устройства регистрации результатов вычисления используется персональный компьютер [1]. Этот вариант не имеет жестких ограничений по сложности аппаратуры, поэтому позволяет строить многоканальную измерительную аппаратуру с большим объемом обрабатываемых данных, в которой контроль параметров помех и их дальнейшая цифровая обработка производятся непосредственно по оцифрованным сигналам помех. При использовании достаточно сложных алгоритмов обработки оцифрованных сигналов помех можно получить более детальную картину помеховой обстановки на шинах питания БА и своевременно обнаружить основные источники помех до начала штатной эксплуатации БА. Однако использование этого варианта не исключает возможности проявления основных источников помех в условиях штатной эксплуатации БА из-за неизбежных отличий от условий наземных испытаний.

Другой вариант построения ориентирован на исследование помеховой обстановки с помощью измерительной аппаратуры в процессе штатной эксплуатации БА в течение всего срока активного существования КА, поэтому предполагает введение в состав служебных систем КА в качестве измерительной аппаратуры устройства контроля помеховой обстановки (УКПО) с ограниченным объемом обрабатываемых данных. При этом в качестве специаль-

ных вычислительных средств и устройства регистрации результатов вычисления используется бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ). Этот вариант связан с жесткими ограничениями как по сложности исполнения УКПО, так и по частоте сеансов обмена с БЦВМ, поэтому предполагает выделение с помощью УКПО необходимых параметров помех в аналоговой форме с последующим преобразованием их в цифровую и между сеансами обмена с БЦВМ — предварительную обработку цифровой информации в масштабе реального времени с помощью встроенной в УКПО микроЭВМ, а уже затем — передачу в БЦВМ сохраненных в оперативной памяти микроЭВМ результатов предварительной обработки цифровой информации для общего анализа помеховой обстановки.

Особенности использования УКПО в составе служебных систем КА. При определении задач, которые должно решать УКПО, требуется учитывать особенности его использования в составе служебных систем КА. Рассмотрим эти особенности на примере структурной схемы контроля помеховой обстановки на шинах питания СЭП и ЭПС, приведенной на рис. 1.

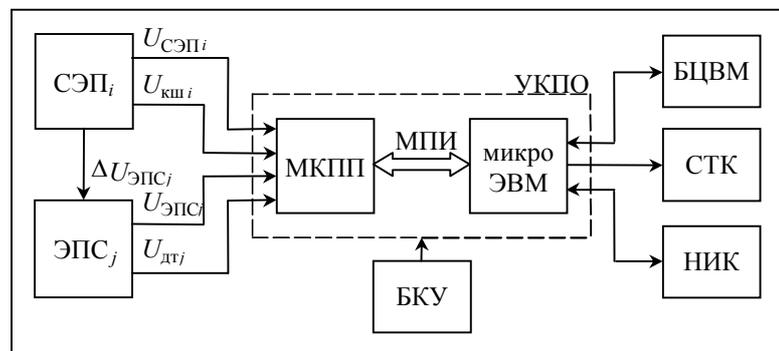


Рис. 1

Основными узлами УКПО являются измеритель, который может быть выполнен в виде функционально законченного модуля контроля параметров помех (МКПП) с необходимым количеством каналов измерения и точек контроля, и вычислитель в виде функционально законченной микроЭВМ с необходимыми интерфейсами для работы с внешними устройствами.

МКПП предполагает наличие не менее четырех каналов измерения с различным количеством точек контроля, т.е. для одновременного контроля параметров сигналов помех $U_{СЭП_i}$ на выходных шинах питания СЭП (канал измерения $U_{СЭП_i}$), $U_{кш_i}$ между корпусом и шинами питания СЭП (канал измерения $U_{кш_i}$), $U_{ЭПС_j}$ на входных шинах питания ЭПС (канал измерения $U_{ЭПС_j}$) и $U_{дт_j}$ на выходах датчиков тока, обеспечивающих контроль протекающих токов по входным шинам питания ЭПС (канал измерения $U_{дт_j}$). Здесь i — количество точек контроля СЭП и j — количество точек контроля ЭПС. Контроль протекающих токов по шинам питания ЭПС в таком случае необходимо осуществлять с помощью датчиков тока [2], обеспечивающих линейное преобразование изменения протекающего тока в напряжение в исследуемом диапазоне частот.

Одновременный контроль параметров помех на выходных шинах питания СЭП и входных шинах питания ЭПС позволяет определять различия в уровнях сигналов помех, вызванные падением напряжения $\Delta U_{ЭПС_j}$ на шинах питания между СЭП и ЭПС в бортовой кабельной сети. При этом для исключения взаимного влияния между каналами измерения $U_{СЭП_i}$, $U_{кш_i}$, $U_{ЭПС_j}$, $U_{дт_j}$ должно быть введено экранирование сигнальных цепей всех точек контроля друг от друга и обеспечена гальваническая развязка входных устройств в МКПП для всех точек контроля.

Наличие микроЭВМ предполагает возможность управления выбором необходимых точек контроля, сбора из МКПП цифровой информации о выделенных аналоговых параметрах помех и их предварительной обработки в масштабе реального времени на нескольких циклах

измерения $T_{ци}$, поэтому работа микроЭВМ должна синхронизироваться интервальным таймером, отсчет временных интервалов которого осуществляется при поступлении импульсов от внутреннего кварцевого генератора. Взаимодействие микроЭВМ с МКПП в таком случае должно осуществляться через внутреннюю магистраль передачи информации (МПИ). Результаты предварительной обработки цифровой информации на нескольких циклах измерения $T_{ци}$, сохраняемые в оперативной памяти микроЭВМ между сеансами обмена с БЦВМ, могут содержать данные как о динамических свойствах параметров помех, так и об их выходе за пределы допустимой нормы, поэтому в микроЭВМ должны быть предусмотрены интерфейсы для обмена переменными данными с БЦВМ и выдачи зафиксированных данных о превышении допустимой нормы параметров помех в систему телеметрического контроля (СТК). Для использования УКПО при наземных испытаниях и для отладки программного обеспечения в процессе испытаний в микроЭВМ также должен быть предусмотрен технологический канал, позволяющий обмениваться данными с наземным испытательным комплексом (НИК).

Использование УКПО предполагает возможность работы в режиме самоконтроля, когда проверяется работоспособность каналов измерения $U_{СЭП}$, $U_{кш}$, $U_{ЭПС}$, $U_{дт}$ от встроенного эталонного генератора; в режиме дежурного контроля, когда контроль параметров помех осуществляется в заранее установленных точках без вмешательства внешних устройств; в режиме запросного контроля, когда выбор номера точек контроля инициируется либо кодовыми посылками из БЦВМ, либо командами управления из бортового комплекса управления (БКУ) посредством пошагового циклического перебора. Поэтому в УКПО для управления режимами работы, а также для управления включением питания должен быть предусмотрен еще и командный интерфейс с БКУ.

Функциональная схема МКПП. Исходя из решаемых УКПО задач МКПП должен представлять собой четырехканальный измеритель, обеспечивающий программный выбор в каждом канале измерения требуемого номера точки контроля, выделение и дискретизацию необходимых параметров помех в аналоговой форме и временное разделение каналов измерения при преобразовании результатов дискретизации выделенных аналоговых параметров помех в цифровую форму. Функциональная схема такого МКПП, позволяющего контролировать параметры помех по четырем каналам измерения $U_{СЭП}$, $U_{кш}$, $U_{ЭПС}$ и $U_{дт}$, приведена на рис. 2.

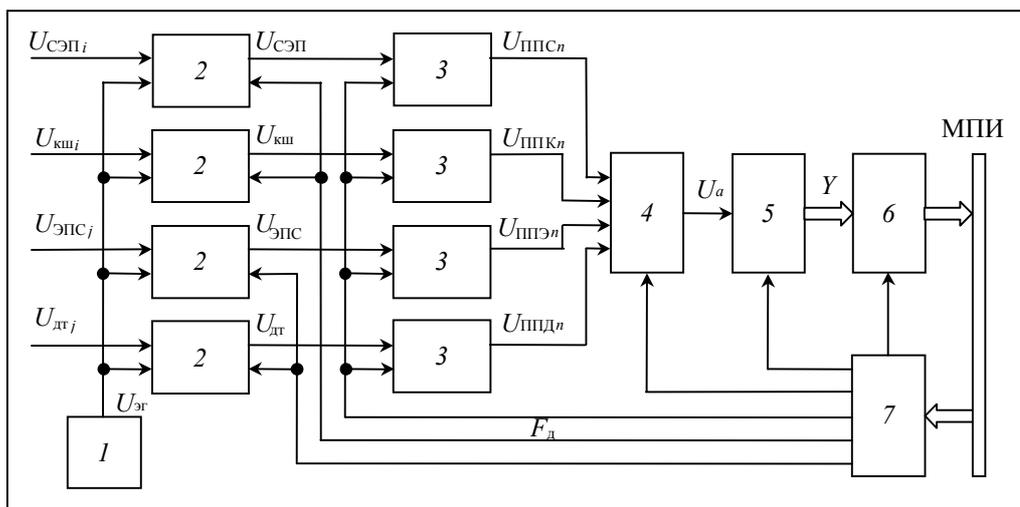


Рис. 2

В состав МКПП входят следующие функциональные устройства:

— эталонный генератор 1 , формирующий переменное напряжение $U_{эг}$ с частотой $f_{эг}$ для контроля работоспособности линейного тракта преобразования каналов измерения $U_{СЭП}$, $U_{кш}$, $U_{ЭПС}$, $U_{дт}$ и проведения калибровки результатов измерения;

— устройства выбора точки контроля 2, обеспечивающие через измерительные трансформаторы [3] прием сигналов помех $U_{СЭПi}$, $U_{кшиi}$, $U_{ЭПСj}$ и $U_{дтj}$, и переменного напряжения $U_{ЭГ}$ в двух точках калибровки, их усиление в точках контроля каналов измерения $U_{СЭП}$, $U_{кши}$, $U_{ЭПС}$, $U_{дт}$ до нормированного уровня и фильтрацию в частотном диапазоне измерения $\Delta f_{и} = f_{в} - f_{н}$, ограниченном нижней $f_{н}$ и верхней $f_{в}$ граничными частотами (предполагается, что за пределами частотного диапазона измерения $\Delta f_{и}$ спектральные составляющие сигналов помех малы и не нормируются);

— устройства выделения параметров помех 3, обеспечивающие выделение из усиленных до нормированного уровня сигналов помех каналов измерения $U_{СЭП}$, $U_{кши}$, $U_{ЭПС}$, $U_{дт}$ соответствующих наборов разнополярных аналоговых параметров помех $U_{ППСн}$, $U_{ППКн}$, $U_{ППЭн}$, $U_{ППДн}$, где n — количество выделяемых в канале измерения параметров помех, динамические свойства которых ограничиваются верхней частотной составляющей $F_{ов}$ огибающих сигналов помех, и их дискретизацию по времени в соответствии с теоремой Котельникова [4] с частотой $F_{д} \geq 2F_{ов}$;

— аналоговый коммутатор 4, обеспечивающий для временного разделения каналов измерения переключение выделенных дискретных аналоговых параметров помех $U_{ППСн}$, $U_{ППКн}$, $U_{ППЭн}$, $U_{ППДн}$ на общий канал преобразования аналоговой формы сигнала $U_{а}$ в цифровую (канал преобразования $U_{а}$) с частотой $F_{п} = 4nF_{д}$;

— аналого-цифровой преобразователь 5, обеспечивающий циклическое преобразование дискретных аналоговых параметров помех $U_{ППСн}$, $U_{ППКн}$, $U_{ППЭн}$, $U_{ППДн}$, переключаемых на общий канал преобразования $U_{а}$, в цифровой эквивалент Y ;

— буферное устройство 6, обеспечивающее передачу через МПИ цифрового эквивалента Y дискретных аналоговых параметров помех в микроЭВМ;

— схема управления 7, обеспечивающая в соответствии с заложенным программным обеспечением микроЭВМ формирование кода выбора номера точек контроля, импульсов дискретизации $F_{д}$, кода выбора номера дискретного параметра помех, импульса запуска аналого-цифрового преобразователя и импульса чтения цифрового эквивалента Y .

Спектральный состав контролируемых сигналов помех $U_{СЭПi}$, $U_{кшиi}$, $U_{ЭПСj}$, $U_{дтj}$ ограничивается на выходе устройств выбора точек контроля 2 для каждой точки контроля соответствующими передаточными характеристиками $K_{СЭПi}(p)$, $K_{кшиi}(p)$, $K_{ЭПСj}(p)$, $K_{дтj}(p)$. Частота $f_{ЭГ}$ переменного напряжения $U_{ЭГ}$ эталонного генератора 1 соответствует середине частотного диапазона измерения $\Delta f_{и}$, в котором частотные искажения соответствующих передаточных характеристик $K_{К1(2)СЭП}(p)$, $K_{К1(2)кши}(p)$, $K_{К1(2)ЭПС}(p)$, $K_{К1(2)дт}(p)$ в первой и второй калибровочных точках отсутствуют и не влияют на результаты калибровки.

Выходные сигналы устройств выбора точек контроля 2 используются для выделения в каждом канале измерения с помощью устройств выделения параметров помех 3 необходимого количества n дискретных аналоговых параметров помех $U_{ППСн}$, $U_{ППКн}$, $U_{ППЭн}$, $U_{ППДн}$, которые наиболее полно отражают динамические свойства сигналов помех. Для упрощенной оценки пульсаций и переходных отклонений сигнала помехи на шинах питания можно выделять уровни их положительной $U_{оп}(t)$ и отрицательной $U_{оо}(t)$ огибающих. Для упрощенной оценки распределения энергии их спектральных составляющих весь частотный диапазон измерения $\Delta f_{и}$ можно разбить на два поддиапазона, разграничив их верхней частотной составляющей $F_{ов}$ огибающей сигнала помехи на низкочастотный $\Delta f_{инч} = F_{ов} - f_{н}$ и высокочастотный $\Delta f_{ивч} = f_{в} - F_{ов}$ поддиапазоны измерения, и выделить уровень действующего (среднеквадратического) значения $U_{дв}(t)$ сигнала помехи в общем частотном диапазоне измерения $\Delta f_{и}$ и уровень низкочастотной составляющей $U_{нч}(t)$ сигнала помехи в поддиапазоне измерения $\Delta f_{инч}$. В таком случае оценку распределения энергии их спектральных составляющих по поддиапазонам измерения $\Delta f_{инч}$ и $\Delta f_{ивч}$ необходимо производить вычислительными средствами микроЭВМ.

Следует отметить, что при коммутации аналоговым коммутатором 4 дискретных помех $U_{оп}(t)$, $U_{оо}(t)$, $U_{дз}(t)$, $U_{нч}(t)$ всех каналов измерения $U_{СЭП}$, $U_{кш}$, $U_{ЭПС}$, $U_{дт}$ на общий канал преобразования U_a будут возникать переходные процессы, поэтому для исключения в цифровом эквиваленте Y динамической ошибки измерения включение аналого-цифрового преобразователя 5 должно производиться после установления переходных процессов. Для этого необходимое время задержки Δt_3 запуска аналого-цифрового преобразователя 5 и время задержки Δt_4 чтения цифрового эквивалента Y через буферное устройство 6 после запуска 5 учитываются в программном обеспечении микроЭВМ, осуществляющем через схему управления 7 инициализацию работы МКПП в различных режимах.

Пример практической реализации устройства выделения параметров помех. Для выделения из контролируемых входных сигналов помех $U_{вх}(t)$ любого из каналов измерения $U_{СЭП}$, $U_{кш}$, $U_{ЭПС}$, $U_{дт}$ рассмотренных медленно изменяющихся во времени дискретных аналоговых параметров помех $U_{оп}(t)$, $U_{оо}(t)$, $U_{дз}(t)$, $U_{нч}(t)$ с верхней частотной составляющей не более $F_{ов}$ в устройстве выделения параметров помех должно быть предусмотрено четыре независимых аналоговых преобразователя, обеспечивающих выполнение условия дискретизации $F_d \geq 2F_{ов}$. Функциональная схема устройства выделения параметров помех приведена на рис. 3, в состав устройства входят:

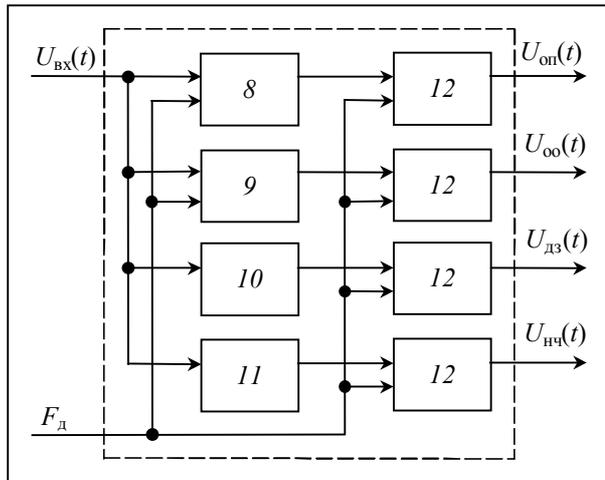


Рис. 3

— пиковый детектор положительной огибающей сигнала 8, обеспечивающий выделение на периоде дискретизации $T_d=1/F_d$ максимального значения сигнала помехи $U_{вх}(t)$, используемого для дискретизации значений положительной огибающей $U_{оп}(t)$;

— пиковый детектор отрицательной огибающей 9, обеспечивающий выделение на периоде дискретизации $T_d=1/F_d$ минимального значения сигнала помехи $U_{вх}(t)$, используемого для дискретизации значений отрицательной огибающей $U_{оо}(t)$;

— устройство выделения действующего (среднего квадратического) значения 10 сигнала помехи $U_{дз}(t)$ при постоянной интегрирования $\tau_{и} \geq 1/F_{ов}$ в соответствии с выражением:

— фильтр нижних частот 11 с передаточной характеристикой $K_{нч}(p)$, обеспечивающий выделение из сигнала помехи $U_{вх}(t)$ низкочастотной составляющей $U_{нч}(t)$ в поддиапазоне измерения $\Delta f_{нч}$;

$$U_{дз}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau_{и}} \int_{t-\tau_{и}}^t U_{вх}^2(t) dt};$$

— устройства выборки и хранения 12, обеспечивающие сохранение результатов выборки аналоговых параметров помех $U_{оп}(t)$, $U_{оо}(t)$, $U_{дз}(t)$, $U_{нч}(t)$ в течение периода дискретизации $T_d = 1/F_d$ для их последовательного преобразования в цифровую форму.

Пиковые детекторы положительной 8 и отрицательной 9 огибающих могут быть реализованы на базе компаратора напряжения 521СА3 и устройства выборки и хранения 1100СК2 в соответствии со схемой, приведенной в [5]. Устройство выделения действующего значения 10 может быть реализовано на базе умножителя 525ПС3А с интегрирующим звеном в соответствии со схемами, приведенными в работе [6]. Фильтр нижних частот 11 может быть реализован на базе активного фильтра второго порядка с верхней граничной частотой $F_{ов}$.

В соответствии с рассмотренным примером практической реализации устройства выделения параметров помех было разработано УКПО, позволяющее непрерывно контролировать параметры помех на шинах питания БА по четырем каналам измерения $U_{СЭП}$, $U_{кш}$, $U_{ЭПС}$, $U_{дт}$ в частотном диапазоне $\Delta f_{и} = 20\text{—}30\ 000$ Гц и обрабатывать в цикле измерения $T_{ци} = 100$ мс результаты дискретизации аналоговых параметров помех $U_{оп}(t)$, $U_{оо}(t)$, $U_{дз}(t)$, $U_{нч}(t)$, ограниченных верхней частотной составляющей $F_{ов} = 300$ Гц, которое прошло наземную экспериментальную отработку с положительными результатами. Для использования УКПО при штатной эксплуатации в составе служебных систем КА необходимо провести работы по введению в БА специальных цепей контроля напряжения питания и тока потребления, а также разработать для БЦВМ специальное программное обеспечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокопьев Ю. М., Прокопьев В. Ю., Кочура С. Г., Максимов И. А., Маслов С. А., Иванов В. В., Кольцов А. В., Опенько С. И., Первухин А. В. Прибор контроля кондуктивных помех // Мат. Всеросс. науч.-технич. конф. „Навигационные спутниковые системы, их роль и значение в жизни современного человека“ / Под общ. ред. Н. А. Тестоедова. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2007. С. 99—101.
2. Андреев Ю. А., Абрамзон Г. В. Преобразователи тока для измерений без разрыва цепи. Л.: Энергия, 1979. 144 с.
3. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Уч. для вузов. М.: Высш. шк., 1988. 488 с.
4. Лейтман М. Б. Нормирующие измерительные преобразователи электрических сигналов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
5. Горностаев А. И., Терпугов Н. И. Пиковый детектор. Патент РФ № 2029395. МПК G11C 27/00. Заявл. 14.03.91. Оpubл. 20.02.95. Бюл. № 5.
6. Тимонтеев В. Н., Величко Л. М., Ткаченко В. А. Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Радио и связь, 1982. 112 с.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

УДК 60:62:167.7

А. А. НОСЕНКОВ, В. И. МЕДВЕДЕВ, Е. Н. СУХАРЕВ

*Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва
Красноярск*

ТЕХНИЧЕСКАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПРИБОРОВ КАК ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА СИСТЕМ

Представлены некоторые положения понятийного аппарата и общей теории технической совместимости приборов. Рассмотрена роль технической совместимости в обеспечении качества и эффективности создаваемых систем.

Согласно международному ГОСТ 30709-2002, принятому в десяти странах СНГ, техническая совместимость — совместимость изделий, их составных частей, конструкционных, горюче-смазочных материалов, технологических процессов изготовления и контроля [1]. В стандарте изложен ряд общих понятий, касающихся ТС, и даны определения девятнадцати ее видов. Несмотря на дискуссионность некоторых трактовок и определений, представленных стандартом, главная его ценность состоит в попытке директивно закрепить все понятийное многообразие совместимости современной техники. Для авторов настоящей статьи важность

стандарта объясняется еще и тем, что в нем нашли свое подтверждение некоторые ранее разработанные теоретические положения и определения.

Являясь одним из основных условий создания первого в мире технического устройства, совместимость (согласованность) составных частей техники превратилась по мере ускорения технического прогресса из рядовых задач, выполняемых интуитивно, в глобальную проблему современной техники, решением которой заняты значительные научные и инженерные силы. Начиная с середины прошлого века совместимость технических элементов теоретически и экспериментально исследуется как в дифференцированном (электромагнитная, тепловая, механическая и др.), так и в системном проявлении (совместимость АСУ, трибосистем и др.).

Авторы статьи убеждены, что технической совместимости как глобальному свойству техники следует дать общетеоретическое толкование. Кроме того, выполнен ряд разработок, касающийся диалектических основ ТС, формирования понятийного аппарата, повидовой классификации, выявления и трактовки закономерностей, моделирования ТС и т.д. [2—6].

Однако недостаточно исследованным является такой важный вопрос, как влияние совместимости на эффективность функционирования и качество техники. Это обстоятельство и определило цель настоящей статьи — показать на примере изделий приборостроения ведущую роль совместимости в обеспечении качества и эффективности техники. Изделия приборостроения (приборы) выбраны не случайно, так как на их основе строятся наиболее сложные и совершенные технические, например космические, системы, для которых характерны все установленные в настоящее время виды ТС (более 50, и это число продолжает расти).

Совместимость и качество техники. Зависимость качества техники от ее совместимости была рассмотрена авторами в диалектическом плане при установлении и формулировании методологических принципов теории технической совместимости (ТТС): принципов достаточной совместимости (ПДС), максимального совершенствования (ПМС) и рациональной преемственности (ПРП), обеспечивающих проявление в ТС основных законов диалектики (единства и борьбы противоположностей, взаимоперехода качественно-количественных изменений и отрицания отрицания соответственно) [3].

ПДС связан с первым законом диалектики. Физическую суть принципа можно показать на примере таких общих противоположностей, имеющих место в любой технической системе (устройстве), как взаимодействие и взаимовоздействие составных элементов. Взаимодействие является своего рода взаимопомощью элементов системы в процессе ее функционирования. Взаимовоздействие — вредное взаимовлияние элементов. И чем больше взаимодействие превалирует над взаимовоздействием, тем более высокая степень совместимости достигается и соответственно обеспечивается высокое качество функционирования системы. Уровень достаточной совместимости устанавливается исходя из индивидуального и совокупного (совместного) рассмотрения многочисленных факторов, сопутствующих разработке любой современной техники: назначения, гарантийного срока службы, срока морального старения, серийности производства, имеющегося научно-технического и экономического потенциала и т.д.

Со вторым законом диалектики связан ПМС: рекомендуется использовать результаты взаимного перехода качественных и количественных изменений техники таким образом, чтобы каждая вновь разрабатываемая система (устройство) получала наиболее совершенные параметры и характеристики, чем все ранее известные аналоги и прототипы. Иными словами, при изготовлении новой техники следует использовать только те новации, которые совместно с другими реализуемыми решениями придают новым изделиям максимум совершенства. Следовательно, в содержательно-смысловом уровне данного методологического принципа просматривается связь совместимости и качества техники, но несколько по-иному: грамотно выбранный вектор новых решений и их достаточная согласованность с другими реализуемыми решениями обеспечивают недостижимое ранее качество новой техники.

Наконец, ПРП опирается на третий закон диалектики и трактует, что любое вновь разработанное устройство должно (в меру целесообразного, разумного и обоснованного) содержать в себе идеи, физические принципы и элементы, ранее отвергнутые, например, по причине устаревания, так как они совместно с другими решениями в условиях новых достижений научно-технического прогресса могут обеспечить наивысшее качество, причем при наименьших затратах на него. Следовательно, и в ПРП центральное место занимает связь совместимости и качества в процессе технического творчества, но с использованием ранее отвергнутых решений.

Переходя от диалектического уровня к инженерному обеспечению ТС, остановимся на ее связях с конкретными показателями качества техники, а именно систем, построенных на основе приборов, например, космического аппарата связи (КАС) и наземного оборудования, используемого при наземной обработке и летной эксплуатации КАС.

Опыт работы с этими системами и результаты выполненных исследований позволяют утверждать, что физические виды ТС (электромагнитная, тепловая, механическая, электрическая, конструктивная, технологическая, эксплуатационная, совместимость систем „человек—машина“ — СЧМ и др.) непосредственно или опосредованно влияют на классификационные (например, мощность, дальность действия, объект—носитель), эксплуатационные (требуемые параметры окружающей среды, стабильность собственных параметров, диапазон их регулирования и др.) и конструктивные (удобство монтажа, габаритно-присоединительные размеры, уровень миниатюризации и др.) показатели назначения, на показатели надежности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость), на безопасность, на показатели эргономические (гигиенические, антропометрические, психофизиологические) и эстетические (выразительность, рациональность формы, целостность композиции, совершенство производственного исполнения), на показатели технологичности (трудоемкость, материалоемкость, себестоимость и др.) и унификации (применяемость, повторяемость).

Организационные виды совместимости могут опосредованно повлиять на любой из приведенных выше показателей качества техники, но основным объектом их воздействия являются патентно-правовые показатели (патентная защита, патентная чистота и др.). Такова общая концептуальная модель воздействия совместимости техники на показатели ее качества.

Количественная оценка такой связи пока возможна лишь для некоторых пар „вид совместимости—показатель качества“ и то не во всем ее диапазоне, а например, за пределами допуска: „размерная (геометрическая) совместимость—безотказность“, „размерная (геометрическая) совместимость—возможность монтажа на объекте (носителе)“, „антропометрическая совместимость—безотказность СЧМ“, „эксплуатационная совместимость—безотказность (сохраняемость)“, „тепловая совместимость — безотказность (сохраняемость)“ и т.п. Для количественной оценки абсолютного большинства связей „совместимость—качество“ приемлемы вероятностно-статистические методы, что требует знания соответствующих законов распределения и всех сопутствующих параметров совмещаемых элементов.

Совместимость и эффективность техники. Эффективность Э является важной и наиболее общей характеристикой современной техники. Для объективной оценки влияния совместимости на эффективность техники необходимо выбрать соответствующие критерии последней. В свое время Х. Б. Волховером был предложен критерий K_3 , учитывающий результаты использования $P_{и}$ техники по назначению, затраты P_3 на ее создание и эксплуатацию и назначение техники $P_{н}$, определяемый как результат применения техники в случае, когда стоящие перед ней задачи выполнены в полном объеме [7]:

$$K_3 = \frac{P_{и} - P_3}{P_{н}}. \quad (1)$$

Выражение (1) довольно полно охватывает все факторы, влияющие на эффективность, но весьма затруднено для практического применения. Поэтому более широкое применение находит раздельное рассмотрение эффективности как технической \mathcal{E}_T и экономической \mathcal{E}_3 составляющих [8, 9]. При этом для оценки технической эффективности в каждом конкретном случае могут быть использованы критерии

$$K'_{\mathcal{E}_T} = P_{\text{и}} - P_{\text{н}} \quad (2)$$

или

$$K''_{\mathcal{E}_T} = P_{\text{и}} / P_{\text{н}}, \quad (3)$$

а для оценки экономической эффективности (\mathcal{E}_3) — соответственно критерии

$$K'_{\mathcal{E}_3} = P_{\text{и}} - P_3 \quad (4)$$

или

$$K''_{\mathcal{E}_3} = P_{\text{и}} / P_3. \quad (5)$$

Хотя эти критерии имеют высокий уровень обобщения, их введение позволяет перейти к дальнейшему изложению содержания статьи.

Рассмотрим на системном уровне КАС, бортовой аппаратный комплекс которого и является совокупностью сотен приборов различного рода и назначения [9]. Естественно, первоочередной задачей для КАС является совместимость с воздействиями ракеты-носителя и условиями окружающей среды. К числу наиболее проблематичных для КАС относится обеспечение электромагнитной совместимости $C_{\text{эм}}$ бортовых приборов. Причина здесь общая для всех летательных аппаратов — абсолютное большинство бортовых приборов имеет постоянно возрастающую степень миниатюризации исполнения и плотность компоновки. Проблема усугубляется отсутствием достаточно достоверных теоретических методов расчета $C_{\text{эм}}$ и превалированием экспериментального подхода, а также профессиональной интуиции специалистов. Таким образом, нередки случаи, когда приходится выполнять значительный объем исследовательских работ даже на летных образцах КАС, чтобы установить причины непредвиденного появления в ходе заводских испытаний снижения $C_{\text{эм}}$ бортовых приборов и устранить их. Это приводит к затягиванию сроков сдачи аппарата, увеличению затрат P_3 и ухудшению показателей $K'_{\mathcal{E}_3}$ и $K''_{\mathcal{E}_3}$. В случае ухудшения $C_{\text{эм}}$ при орбитальном полете КАС снижаются показатели $P_{\text{и}}$ и соответственно $K'_{\mathcal{E}_3}$, $K''_{\mathcal{E}_3}$, $K'_{\mathcal{E}_T}$ и $K''_{\mathcal{E}_T}$.

Аналогичная ситуация имеет место и для тепловой совместимости (C_T) КАС. Она обусловлена тем, что миниатюризация приборов происходит более быстрыми темпами, чем снижение их электропотребления. Это приводит к возрастанию удельного тепловыделения и проблемам при терморегулировании таких приборов и КАС в целом. Влияние C_T приборов на показатели эффективности КАС полностью совпадает с показателями для $C_{\text{эм}}$.

Обеспечение других видов ТС (информационной, электрической, параметрической и др.) аппаратуры имеет свои проблемы и специфику, но влияние их на показатели эффективности синтезируемых систем носит тот же характер, что и для $C_{\text{эм}}$ и C_T .

Общий смысл предлагаемой концепции состоит в том, чтобы научиться целенаправленно обеспечивать качество и эффективность техники исходя из их первоосновы — обеспечения технической совместимости, т.е. идти от причины к следствию, а не наоборот, как это принято сейчас. Методологически такой шаг означает замену регрессивного подхода прогрессивным и предполагает значительное снижение ресурсоемкости процесса обеспечения качества современной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30709-2002. Техническая совместимость. Термины и определения. Минск: Международный совет по стандартизации, метрологии, сертификации, 2002. 4 с.
2. Носенков А. А. О методологической концепции теории технической совместимости // Микроэлектронные устройства. Проектирование и технология. Межвуз. сб. Красноярск: КрПИ, 1990. С. 100—103.
3. Носенков А. А., Медведев В. И. Теория технической совместимости как новая дисциплина системного анализа // Вестн. САА им. акад. М. Ф. Решетнёва. Вып. 2. Красноярск, 2001. С. 231—236.
4. Носенков А. А. Теория технической совместимости: диалектический базис, содержательный уровень, практический потенциал // XXIV Росс. шк. по проблемам науки и технологии. М.: РАН, 2004. С. 35—46.
5. Медведев В. И. Совместимость техники: вопросы моделирования // Там же. С. 47 — 54.
6. Носенков А. А. Техническая совместимость: практика, наука, проблемы. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2005. 136 с.
7. Волховер Х. Г. Обобщенная эффективность как критерий сравнения работы сложных систем // Вопросы радиоэлектроники. Сер. XII. 1965. Вып. 12. С. 5—7.
8. Цветков А. Г. Принципы количественной оценки эффективности радиоэлектронных средств. М.: Сов. радио, 1971. 200 с.
9. Носенков А. А. Исследование путей повышения эффективности контроля технического состояния космических аппаратов связи. Автореф. дис. канд. техн. наук. Красноярск-26, 1979. 23 с.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

УДК 002.55

А. А. НОСЕНКОВ

*Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва
Красноярск*

Р. П. ТУРКЕНИЧ

*Научно-производственное объединение прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва
Железногорск*

**ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ**

Рассмотрены этапы становления и развития информационного обеспечения отечественного приборостроения, а также задачи его совершенствования на современном этапе, изложены рекомендации по решению этих задач.

Проектно-конструкторские и технологические работы по созданию изделий приборостроения относятся к наиболее ресурсоемкой области созидательной человеческой деятельности. Для получения достойного результата (выходного эффекта) этих работ они должны быть объектом высокоорганизованной системы управления, построенной на основе совершенного информационного обеспечения (ИО). Однако понимание важной роли ИО и необходимости его совершенствования в нашей стране формировалось крайне медленно и усугублялось отсутствием достаточных экономических возможностей государства.

Первый этап становления ИО научных и инженерных разработок носил автономный, стихийный характер и продолжался вплоть до послевоенного периода. Основные задачи ИО разработок решались самими разработчиками за счет ранее полученных знаний, опыта руководящего звена и т. п. (рис. 1). И лишь особо важные разработки оборонного характера информационно обеспечивались специальными государственными источниками, в том числе разведкой. Аппарат управления (АУ) формирует и выдает управляющие воздействия (УВ) исходя из требований планового задания, получаемой от системы контроля (СК) производственной информации (ПИ) I_p , поступающих сведений от специального ИО, а также собственной инициативы (например, по ускорению выполняемых работ).

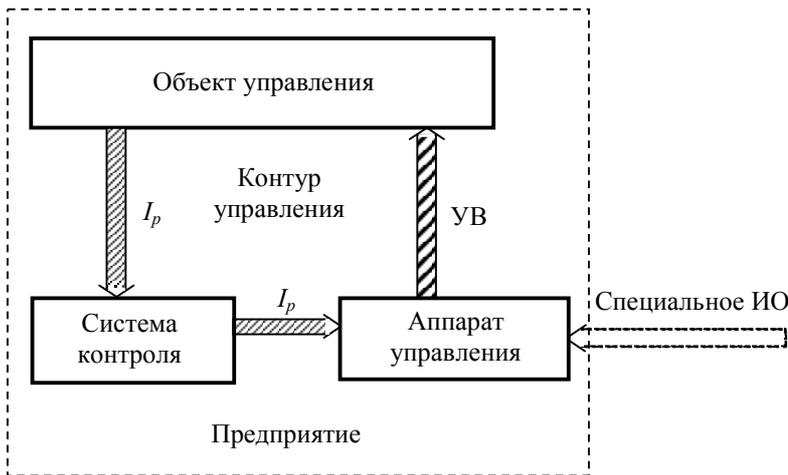


Рис. 1

Однако к середине прошлого века информационные потребности отечественного приборостроения, основными задачами которого стали оборонные заказы высокой сложности, возросли настолько, что лишь государственное вмешательство могло их удовлетворить. При этом содержательный уровень требуемой информации стал ориентироваться на научно-технический характер. Следует отдать должное советскому правительству в понимании возникшей проблемы. Несмотря на тяжелейший экономиче-

ский период страны, требующий огромных оборонных расходов средств на атомное оружие, ракетную технику, реактивную авиацию и полное переоснащение армии, были созданы государственные организации, основной задачей которых явилось обеспечение предприятий-создателей техники, прежде всего оборонной, необходимой научно-технической информацией (НТИ). Именно в этот период появились всесоюзные и отраслевые институты НТИ, научно-информационные центры, многочисленные научные издательства. Стали проводиться научно-технические конференции. Получили необходимое развитие государственные, отраслевые, региональные библиотеки. На предприятиях появились специальные информационные службы. Были созданы благоприятные условия для обмена опытом информационной деятельности даже на межотраслевом уровне (несмотря на закрытый характер выполняемых работ).

Под влиянием этих государственных мер система ИО предприятий-создателей новой техники приобрела централизованный характер и стала частью двухконтурной (внутренний — КУ-1 и внешний КУ-2) системы управления (рис. 2).

„Импульс влияния нового“, ИВН, замыкающий КУ-2, — условное понятие, определяющее степень влияния уровня (потенциала) совершенства созданного изделия как представителя новой техники на уровень мировых стандартов, УМС, для данного класса изделий и позволяющее с этих позиций дать изделию обобщенную оценку.

Так, если изделие по своим показателям не отвечает требованиям мировых стандартов, то ему дается неудовлетворительная оценка (и, естественно, встает вопрос о целесообразности его создания). Если изделие соответствует таковым, то оценка — удовлетворительная. Наконец, чем больше изделие по своим показателям превосходит известные в мире аналоги, тем более высокой оценки оно заслуживает и фактором своего появления повышает УМС.

Основная задача АУ — управление регулируемыми координатами процесса создания изделия в соответствии с заданными параметрами, ресурсами и ограничениями. Тогда целевую функцию управления можно представить выражением [1, 2]:

$$F_p^{(K)} = \text{contr} \left[t^{(d)}, \left\{ r_1^{(d)}, r_2^{(d)}, \dots, r_m^{(d)} \right\}, \left\{ y_1^{(d)}, y_2^{(d)}, \dots, y_n^{(d)} \right\} \right], \quad (1)$$

$$t^{(d)} \leq t^{(j)}, \quad r_1^{(d)} \leq r_1^{(j)}, \quad y_1^{(j)} \leq y_1^{(d)} \leq y_1^{(m)},$$

$$\dots\dots\dots$$

$$r_m^{(d)} \leq r_m^{(j)}, \quad y_n^{(j)} \leq y_n^{(d)} \leq y_n^{(m)},$$

где $t^{(d)}$ — время, фактически затраченное на создание изделия; $t^{(j)}$ — время создания, определенное заказчиком; $\{r_1^{(d)}, r_2^{(d)}, \dots, r_m^{(d)}\}$ — множество $R^{(d)}$ видов (номенклатура) фактических ресурсозатрат; $\{r_1^{(j)}, r_2^{(j)}, \dots, r_m^{(j)}\}$ — множество $R^{(j)}$ видов заданных ресурсозатрат; $\{y_1^{(d)}, y_2^{(d)}, \dots, y_n^{(d)}\}$ — множество $Y^{(d)}$ получаемых выходных параметров (ВП) изделия, характеризующих уровень его совершенства; $\{y_1^{(j)}, y_2^{(j)}, \dots, y_n^{(j)}\}$ — множество $Y^{(j)}$ ВП изделия, заданных заказчиком; $\{y_1^{(m)}, y_2^{(m)}, \dots, y_n^{(m)}\}$ — множество $Y^{(m)}$ ВП аналогов, составляющих УМС, $L^{(m)}$.

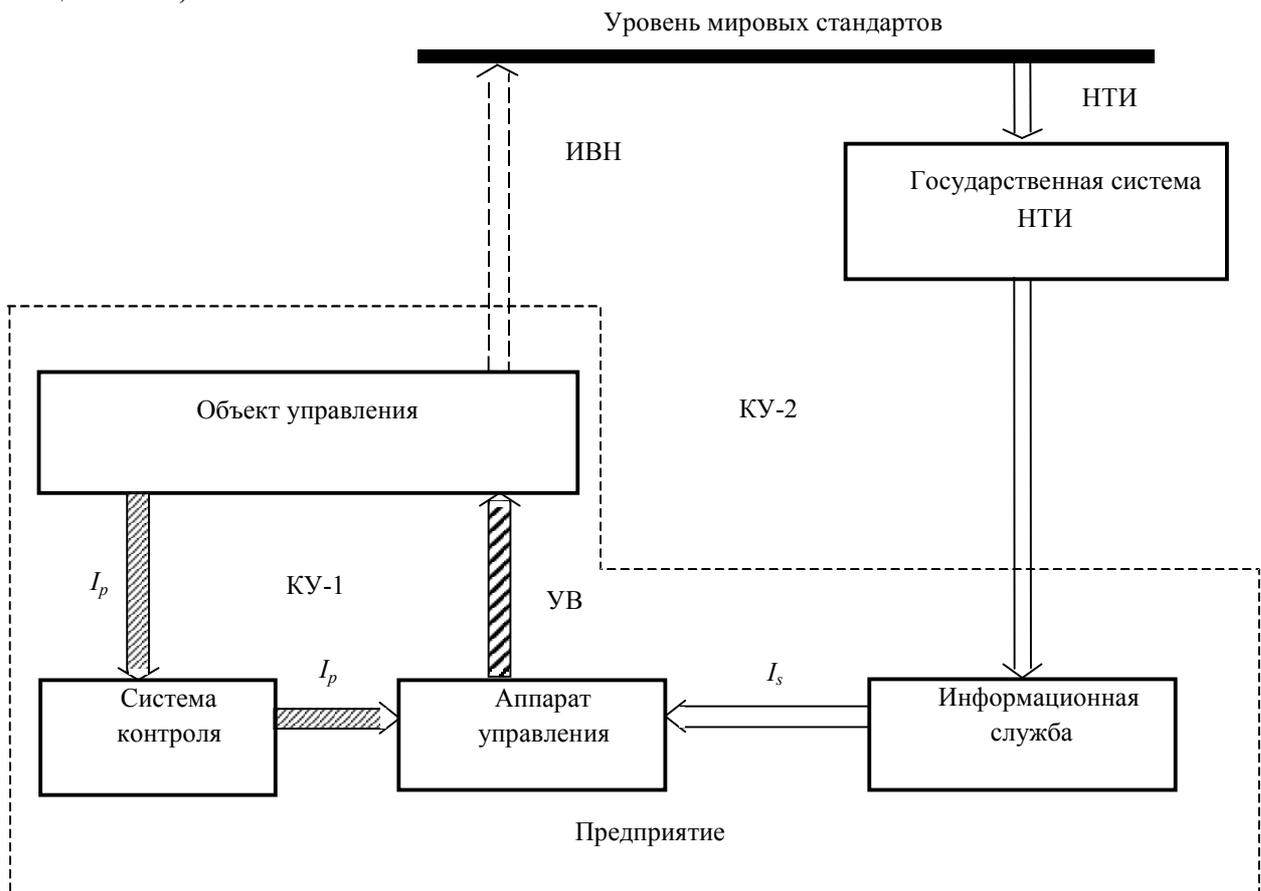


Рис. 2

Чтобы реализовать функцию (1), управление должно быть быстродействующим (оперативным), адаптированным и даже „предвидящим“.

На основании анализа этой информации выдаются необходимые сведения ПИ в АУ для выработки и выдачи управляющих воздействий. Так образуется контур управления координатами $t^{(d)}$ и $R^{(d)}$.

Для управления параметром $Y^{(d)}$ необходимо знать УМС $L^{(m)}$, сравнивать его с действительным уровнем $L^{(d)}$ и при появлении предельно допустимого отклонения вырабатывать соответствующие координирующие УВ. Решение этих задач входит в функции КУ-2, в котором НТИ передается информационной службой (ИС) как сведения I_s об уровне $L^{(m)}$ в АУ для учета в создаваемом изделии.

В общем плане задача сводится к необходимости выполнения качественной подготовки проектных решений, своевременного выявления тенденций устаревания разрабатываемых, и особенно принятых, проектных решений с оперативным проведением их корректировки и пересмотра.

Централизованная система ИО оказалась весьма эффективной и позволила отечественному приборостроению по многим видам изделий поднять УМС и достаточно успешно конкурировать с передовыми странами. Однако выполнение целевой функции (1) этой системой ИО постепенно становилось проблематичным, и к 1980-м гг. оно снизилось до критического уровня. Причиной тому явился наступивший в науке и технике информационный взрыв, приведший к небывалому росту количества источников НТИ (изобретений, монографий, журнальных статей и т.п.) — в результате АУ и ИС предприятий оказались перегруженными, потенциал ИС стал расходоваться в основном на запросы по НТИ, регистрацию поступающей НТИ и ее весьма поверхностную обработку, без анализа содержательного уровня и достоверности.

С другой стороны, возросшая сложность разработок поглотила творческий потенциал АУ. Возможностей его стало хватать лишь на „текущие“ дела. Как итог, сведения, выдаваемые ИС в АУ, все меньше соответствовали потребностям последнего. Говоря языком теории технической совместимости, была потеряна взаимная совместимость информационного и управляющего звеньев, что привело к разрыву контура КУ-2.

Выход из этой ситуации был предложен в работах [3—5] — введение в контур КУ-2 экспертного звена (ЭЗ) между информационным и управляющим звеньями (рис. 3). Основное отличие этой схемы состоит во включении контура управления КУ-3, по которому осуществляется самоподстройка процесса управления к изменяющимся условиям с целью поддержания требуемого значения параметров $Y^{(d)}$ (1). Такую самоподстройку выполняет ЭЗ по результатам анализа сведений I'_s и I'_p . При этом информация I'_s составляет незначительную часть данных I_s и формируется, например, для дифференцированного обслуживания руководящего звена.

Выше речь шла о формировании и становлении эксперта нового, активного типа, который не только участвует в экспертной оценке каких-либо вопросов, но и активно выполняет совокупность взаимосвязанных творческих задач. Для оценки влияния предложенного активного экспертного подхода на ценность НТИ воспользуемся выражением ценности так называемой актуальной информации [1, 2]:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n X(x_i, y_j)P(x_i) - \sum_{i=1}^n X(x_i, y_k)P(x_i/z_k), \quad (2)$$

где y_j — действие, выбираемое при отсутствии информации об опыте; y_k — действие, выбираемое в случае, когда получено сообщение z_k ; $X(x_m, y_n)$ — величина, характеризующая потери от действия y_n в случае, когда исход опыта X есть x_m ; $P(x_i)$ — вероятность исхода; $P(x_i/z_k)$ — условная вероятность того, что в результате опыта наступило событие x_i , если получено сообщение z_k .

Формула (2) показывает, что величина Π зависит от ее соответствия задаче, при решении которой информация используется. Ретроспективный информационный поиск с участием эксперта дает, разумеется, более ценную НТИ. Математически этот факт объясняется тем, что

потери $X(x_i, y_j)$ остаются постоянными, а потери $X(x_i, y_k)$ уменьшаются по мере роста опыта эксперта, который допускает все меньшее количество неточностей и ошибок. Это также означает, что ценность НТИ, предоставляемой с участием одного и того же эксперта, имеет постоянную тенденцию к повышению.

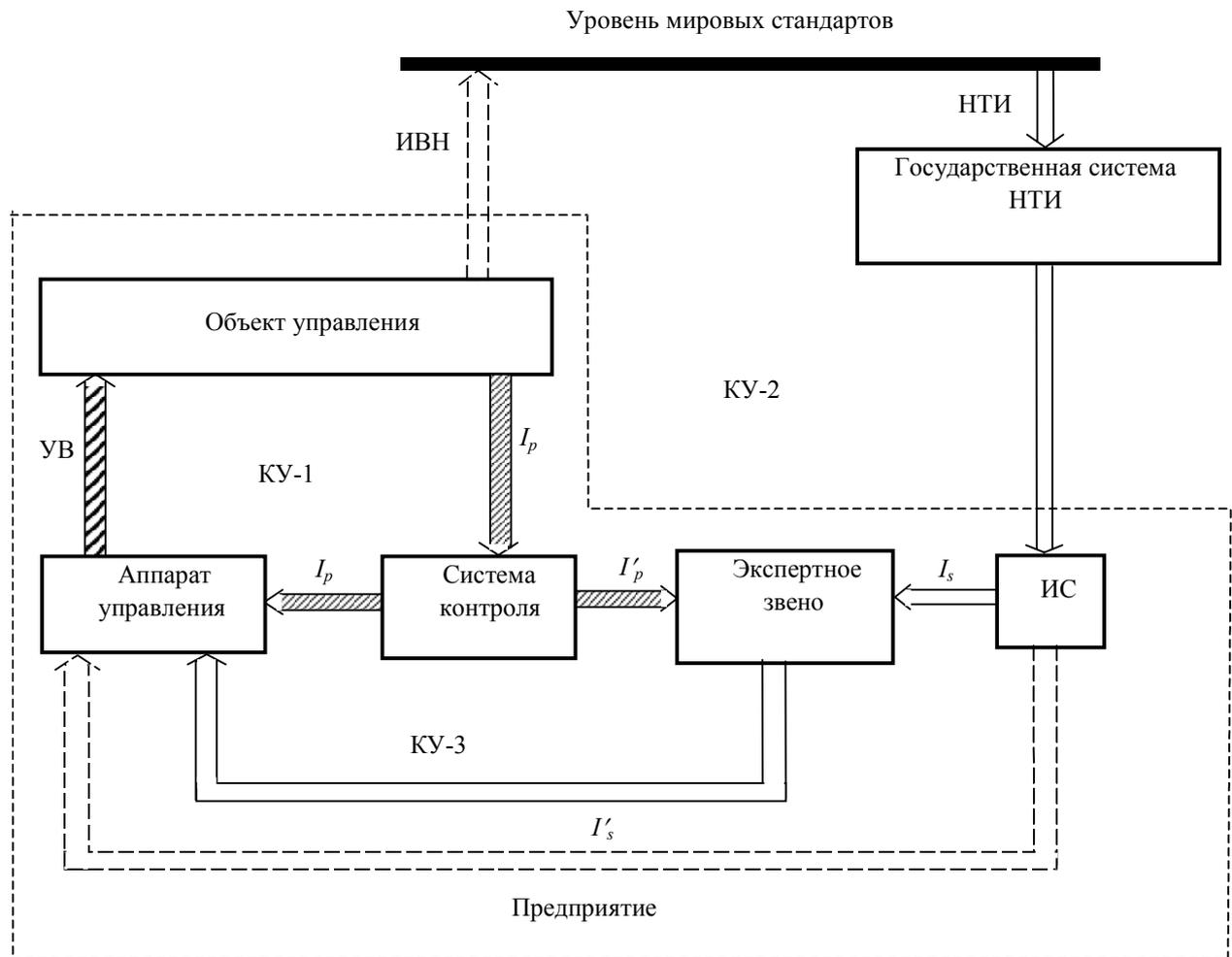


Рис. 3

Предложенная система ИО на основе экспертного подхода оказалась достаточно эффективной, так как обладает способностью оперативной адаптации к изменившимся условиям работы.

Самым тяжелым испытанием эта система подверглась в период наступления в стране так называемой перестройки, приведшей к распаду СССР и всех государственных структур. Распалась и государственная система НТИ.

Смена социально-политического строя в корне изменила условия инженерно-производственного и научного информирования предприятий и на государственном, и на местном уровнях. Так, например, в связи с появлением конкуренции между предприятиями возникла реальная угроза преднамеренной дезинформации, значительно сократился объем публикаций, усложнилось получение достоверной информации мирового уровня, возросла стоимость информационных услуг и т.д. Все это снижает эффективность внешнего ИО, диктует необходимость адаптации информационных служб предприятий к экстремальным условиям работы.

Такую адаптацию можно безболезненно провести на основе изложенного экспертного подхода. Но для этого необходимо расширить функции ЭЗ (рис. 4), предоставив ЭЗ выход непосредственно к информации по УМС (установление международных контактов) и к объекту

управления для непосредственного экспертного анализа процесса создания изделий новой техники. Таким образом, система ИО приобретает многоконтурную структуру (см. рис. 4).

Уровень мировых стандартов

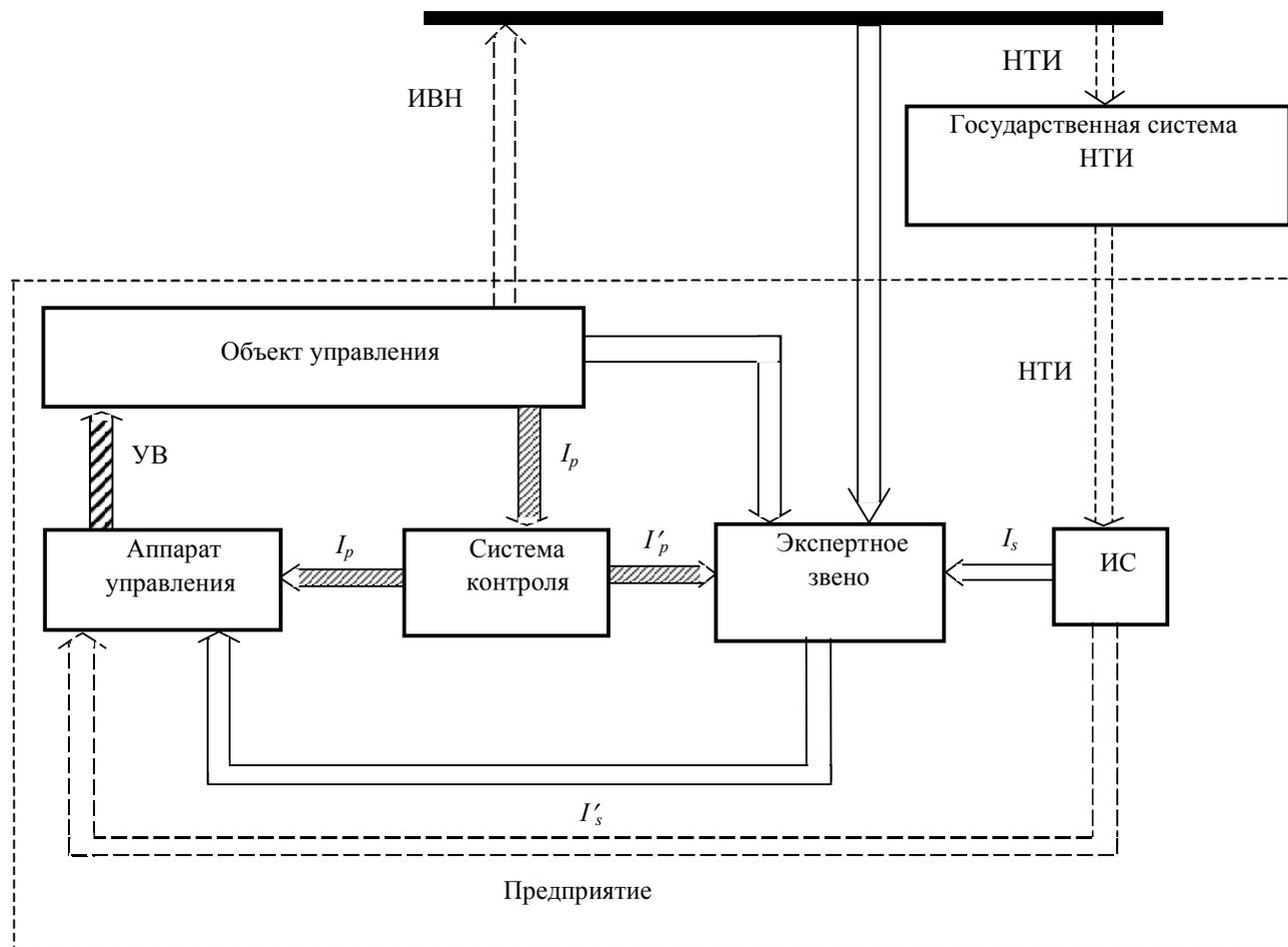


Рис. 4

Представленные в статье схемные решения и рекомендации показывают пути эффективного информационного обеспечения отечественного приборостроения, относящегося к наиболее наукоемким областям творческой деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Салчинский В. И. Модель информационного обеспечения цикла „Исследование—производство“ // НТИ. Сер. 1. 1977. № 7. С. 10—15.
2. Носенков А. А. Техническая совместимость: практика, наука, проблемы. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2005. 136 с.
3. Носенков А. А., Туркенич Р. П. Экспертное звено в системе информационного обеспечения процесса управления // НТИ. Сер. 1. 1982. № 6. С. 31—35.
4. Носенков А. А., Туркенич Р. П. К вопросу о повышении эффективности управления процессом создания сложных систем. М.: ЦНТИ „Поиск“, 1982. № 35—2911. Оpubл. в ПТО № 5.
5. Носенков А. А., Туркенич Р. П. Структурно-функциональное построение экспертного звена контура управления процессом создания сложных технических систем. М.: ЦНТИ „Поиск“, 1982. № 035—2955. Оpubл. в ПТО № 12.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОТРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

УДК 629.09:629.78

А. А. ЛОГАНОВ

*Научно-производственное объединение прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва
Железногорск*

М. И. СОКОЛОВ

*Сибирский федеральный университет,
Железногорский филиал*

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООТВОДА

Предложены методы повышения эффективности малорасходных электронасосных агрегатов модуля служебных систем. Проанализированы результаты испытаний различных вариантов таких агрегатов, вводятся соотношения геометрических параметров элементов конструкции, обеспечивающие наибольшую эффективность системы терморегулирования. Повышение эффективности электронасосных агрегатов за счет организации течения жидкости в рабочем колесе позволяет значительно увеличить их ресурс без применения подшипниковых опор повышенной грузоподъемности.

Введение. Важнейшей частью космических аппаратов (КА) различного назначения являются системы жизнеобеспечения, от работоспособности которых во многом зависит, сможет КА выполнять заданные функции в течение всего срока активного существования или нет. Для обеспечения циркуляции жидкого теплоносителя в активной системе терморегулирования (СТР) используются малорасходные электронасосные агрегаты (ЭНА). Использование активной жидкостной системы в настоящее время обусловлено тем, что в современных пассивных устройствах обеспечения теплового режима — контурных тепловых трубах (КТТ) — затраты энергии на предпусковой подогрев сопоставимы с потребляемой мощностью ЭНА [1].

Фактически возможность применения активной системы терморегулирования ограничена эффективностью ЭНА. При превышении значения мощности полезной нагрузки КА в 5400 Вт экономичность бортового ЭНА становится одним из условий, от которого существенно зависят функциональные возможности КА в целом. При повышении мощности КА свыше 8000 Вт из-за почти двукратного увеличения длины трубопровода значительно (в 2—3 раза) возрастает перепад давления, который должен быть обеспечен ЭНА, вследствие чего снижается КПД агрегата. Опыт показывает, что при двукратном увеличении перепада давления

нагрузка на ротор ЭНА увеличивается втрое. Такое повышение мощности аппаратуры спутника практически сводит к нулю существовавшие при мощности до 3500 Вт как минимум двукратные расчетные запасы по ресурсу ЭНА. Таким образом, основным условием обеспечения теплоотвода от приборов КА в течение всего срока активного существования (12 лет и более) для спутников повышенной мощности становится ресурс ЭНА, а именно — долговечность подшипниковых опор электродвигателя (ЭД). Из-за увеличения нагрузок качественно изменяется ситуация с обеспечением ресурса ЭНА и становится актуальной задача снижения нагрузок на подшипники за счет повышения эффективности конструкции. Наиболее полно эффективность конструкции ЭНА отражает его КПД.

Фактическое значение КПД рассчитывается по формуле [2]

$$\eta_{\phi} = Q\Delta P / (M\omega), \quad (1)$$

где Q — объемный расход рабочей жидкости при наиболее экономичном режиме, м³/с; ΔP — перепад давления рабочей жидкости (РЖ), обеспечиваемый ЭНА, Па; M — момент на валу двигателя, Нм; ω — угловая скорость двигателя, с⁻¹.

В работе [2] приведена формула Риппа для расчета оптимального КПД ЭНА различной быстроходности с учетом масштабного фактора

$$\eta_p = 1 - (1 - 0,265\sqrt[4]{n_s}) \left(\frac{150}{D_{1np}} \right)^{0,2}, \quad (2)$$

где параметр быстроходности [1]

$$n_s = 193,3 \frac{\omega\sqrt{Q}}{H^{0,75}}; \quad (3)$$

D_{1np} — приведенный диаметр входа в рабочее колесо (РК) [2]

$$D_{1np} = 4,5 \cdot 103 \cdot \sqrt[3]{Q/n},$$

n — скорость вращения РК, мин⁻¹, параметр H — напор ЭНА в расчетном режиме, Дж/кг.

Подставив в (2) значение n_s , вычисленное с помощью (3), нетрудно убедиться, что повышение напора ЭНА при расчетном режиме H при прочих неизменных условиях приводит к снижению КПД ЭНА. КПД всегда меньше единицы. В случае с ЭНА это означает, в частности, что значение напора, измеряемое между входом и выходом, в действительности всегда ниже, чем напор, фактически существующий внутри ЭНА (1), большим значениям которого соответствуют более высокие нагрузки, воздействующие на элементы его конструкции, в том числе на подшипниковые опоры. Следовательно, увеличение мощности элементов КА, сопровождающееся возрастанием необходимого напора ЭНА, ужесточает требования к ресурсу ЭНА и одновременно ухудшает условия достижения требуемого ресурса. Повышение ресурса подшипниковых опор за счет применения подшипников большего размера увеличивает габариты и массу электродвигателей и всего ЭНА в целом, что неприемлемо для использования в КА.

Цель исследования. В настоящей работе оценивается возможность сохранения рабочего ресурса ЭНА при значительном увеличении перепада давления. Так как компенсация увеличения нагрузки за счет применения более грузоподъемных подшипников возможна в ограниченных пределах, то необходимо снижать нагрузки за счет повышения КПД ЭНА. Относительное снижение нагрузки на опоры будет пропорциональным относительному приращению КПД.

В настоящей статье исследуется возможность повышения КПД ЭНА за счет выявления критических элементов конструкции при анализе результатов испытаний различных вариантов ЭНА как применяемых в эксплуатируемых КА, так и экспериментальных.

Постановка задачи. На основе анализа результатов испытаний различных ЭНА разной эффективности необходимо:

- выявить элементы конструкции, геометрические параметры которых вносят решающий вклад в эффективность ЭНА;
- получить зависимость для оценки эффективности конструкции с учетом вклада в нее геометрических параметров этих критичных элементов.

В данном случае эффективность понимается как сочетание максимально достижимого КПД и минимальной расчетной нагрузки на конструкцию. На рис. 1 приведены значения η_ϕ (квадраты) и η_p (треугольники).

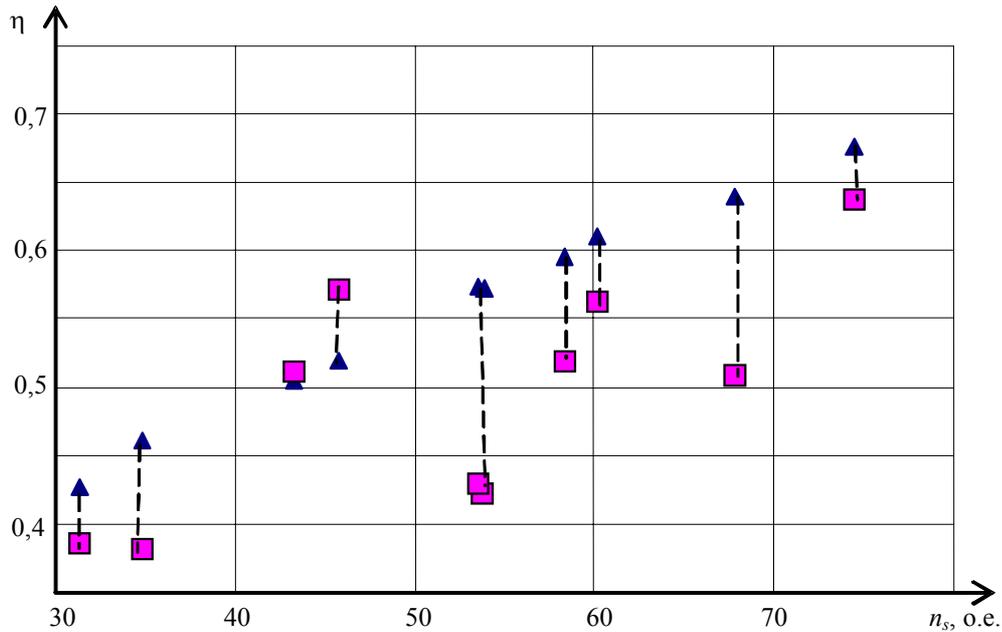


Рис. 1

Для некоторых ЭНА значения КПД, вычисленные по формуле (1), оказались выше расчетных, определенных по (2), что может быть обусловлено принципиальными отличиями конструкции рассматриваемых ЭНА от стандартных промышленных. Необходимо определить, каким образом конструкция РК этих ЭНА влияет на их КПД, и выявить зависимость КПД от определяющего конструктивного параметра в случае, если повышение эффективности связано со снижением нагрузки на РК и на опоры электродвигателя. Величина нагрузки определяется разностью сил давления, обусловленной распределением давления РЖ на боковые поверхности колеса. На рис. 2 приведены схема РК ЭНА 1417-0 [2] и распределение давления по радиусу с учетом геометрических особенностей торцевого зазора (здесь сплошной линией обозначен контур распределения давления при использовании дополнительного уплотнения; пунктиром — контур без дополнительного уплотнения).

Анализ экспериментальных данных. Более высокое по сравнению с расчетом по выражению (2) экспериментально определенное значение КПД (см. рис. 1) в одном из случаев может быть объяснено с помощью рис. 2, из него видно, что применение дополнительного уплотнения позволяет снизить напор перед щелевым уплотнением у входа в РК. Эта конструктивная особенность способствует значительному снижению объемных потерь [2]

$$Q = \mu S \sqrt{2H} . \tag{4}$$

Здесь μ — коэффициент расхода в уплотнении, S — площадь просвета в щелевом уплотнении, H — напор перед уплотнением, Дж/кг.

Благодаря уменьшению объемных потерь РЖ снижаются и потери давления.

Как следует из распределения давления РЖ на боковые поверхности РК (см. рис. 2), повышение КПД за счет дополнительного уплотнения вследствие изменения профиля давления может увеличить нагрузку на подшипниковые опоры электродвигателя. Соответственно дополнительное уплотнение, по крайней мере, не позволит снизить нагрузку на конструкцию.

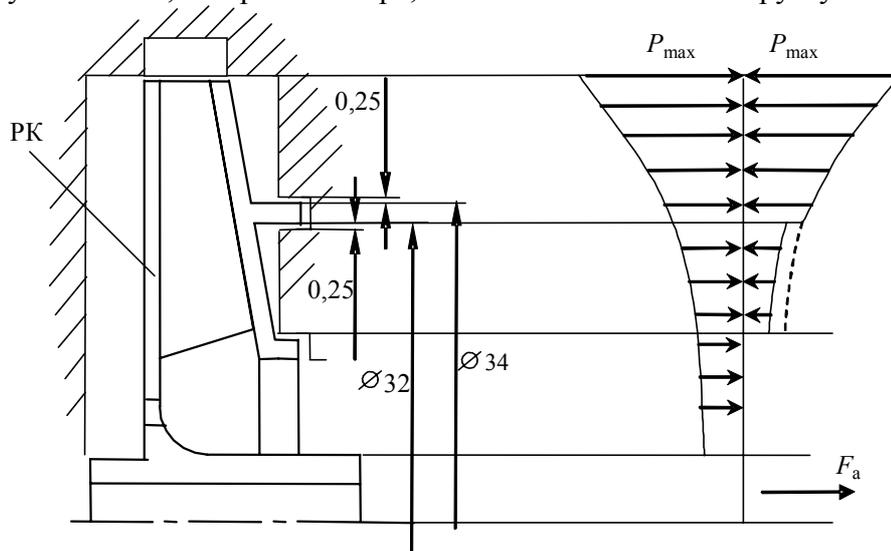


Рис. 2

Вторая причина превышения результатов эксперимента по сравнению с расчетными по выражению (2) состоит в специфике применения рассматриваемых вариантов ЭНА в составе бортовой системы терморегулирования космических аппаратов. В жидкостных системах охлаждения космических аппаратов поддерживается постоянное избыточное давление, полностью исключая риск возникновения кавитации [3]. Обычно ЭНА для наземного использования проектируются с расчетом на то, что при входе в насос статическое давление РЖ должно быть не ниже атмосферного. Применительно к конструкции промышленных ЭНА это заключается в завышении диаметра входного всасывающего патрубка с целью снижения скорости потока РЖ на входе в РК [2].

Для оценки возможностей повышения КПД ЭНА за счет исключения ограничений по условиям кавитации введем безразмерное отношение, сопоставляющее углу установки лопасти $\beta_{1л}$ расчетный угол потока на входе в РК,

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\arctg(v_1/u_1)}{\beta_{1л}}, \quad (5)$$

где радиальная составляющая средней скорости потока в межлопастном канале РК на входе в лопаточный аппарат [3]

$$v_1 = Q/(\pi D_1 b_1),$$

D_1 и b_1 — соответственно диаметр и ширина лопасти на входе в РК.

Окружная составляющая средней скорости потока в межлопастном канале РК на входе в лопаточный аппарат определяется по формуле

$$u_1 = D_1 \omega / 2,$$

где ω — угловая скорость рабочего колеса, c^{-1} .

В таблице приведены значения D_1 , $\hat{\beta}_1$, n_s , фактического КПД, рассчитанного по выражению (1), и теоретического максимального расчетного КПД, определенного по формуле (2)

для десяти вариантов ЭНА (с электродвигателями) с самым высоким КПД для своего расчетного режима.

Оценка эффективности ЭНА, работающих в бескавитационных режимах

№	Вариант ЭНА	$D_1, \text{ м}$	n_s	$\hat{\beta}_1$	η_ϕ	η_p	η_ϕ/η_p
1	1142-0 с РК 3420-300 (ДБ-9)	0,017	58,4	0,301	0,509	0,573	0,888
2	1115-(ДБ-9)	0,017	74,5	0,357	0,553	0,587	0,942
3	3420-0 (ДБ-9)	0,0165	60,2	0,477	0,628	0,652	0,963
4	1417-0 (БЭП-121)	0,016	45,8	0,154	0,562	0,496	1,133
5	1К.15 №1	0,014	67,2	1,088	0,66	0,646	1,022
6	1К.15 №2	0,014	68,6	1,063	0,63	0,651	0,968
7	1К.15 №3	0,014	64,6	0,993	0,61	0,632	0,965
8	1К.15 №4	0,014	37,4	0,396	0,44	0,455	0,967
9	1К.15 №5	0,014	40,8	0,544	0,57	0,489	1,166
10	1К.15 №6	0,014	47,6	0,670	0,63	0,536	1,175

Анализ данных таблицы показывает, что фактическое значение КПД в некоторых случаях в 1,133—1,175 раза превышает расчетное, вычисляемое по (2) для вариантов ЭНА, значения $\hat{\beta}_1$ для которых находятся в пределах 0,55—0,67 (таблица, № 9 и 10; пример ЭНА 1417-0, № 4, был рассмотрен выше). Оба варианта принадлежат к группе элементов выборки с индексом 1К.15. Общая особенность всех вариантов ЭНА этой группы — малый диаметр D_1 , выполненный с учетом гарантированного отсутствия кавитации.

Для трех вариантов ЭНА значение $\hat{\beta}_1$ близко к единице, что соответствует случаю, когда угол установки лопасти примерно равен расчетному углу потока. Обнаруженный эффект повышения КПД в области значений $\hat{\beta}_1 \in 0,55—0,67$ объясняется снижением объемных потерь из-за уменьшения проходного сечения S уплотнения (4). Другая возможная причина — данный диапазон значений $\hat{\beta}_1$ соответствует режиму течения с наименьшими потерями давления.

Более достоверная оценка общего качества конструкции ЭНА по результатам испытаний требует перехода от выражения (2) к формуле, более полно учитывающей особенности конструкции РК. Это достигается введением нового критерия эффективности с использованием поправочного коэффициента на бескавитационные условия работы $K_{\text{БК}}$, определяемого как отношение максимального фактического КПД (1), к КПД, рассчитанному по (2) на этом же режиме работы, т.е. при таком же значении n_s .

Восстановление зависимости $K_{\text{БК}}$ от показателя качества входа в РК $\hat{\beta}_1$, выполненное по пяти лучшим ЭНА рассмотренной выборки, дало выражение

$$K_{\text{БК}} = -1,843\hat{\beta}_1^3 + 2,67\hat{\beta}_1^2 - 0,75\hat{\beta}_1 + 1,07 \frac{1}{2}. \tag{6}$$

Оценка достоверности аппроксимации $R^2 = 0,989$.

Зависимость поправочного коэффициента $K_{\text{БК}}$ на условия входа от $\hat{\beta}_1$ отражена на рис. 3 (точки 1 соответствуют пяти наиболее эффективным ЭНА из таблицы; 2 — восстановленная зависимость для поправочного коэффициента $K_{\text{БК}}$).

В ходе работ был выявлен критичный с точки зрения эффективности элемент конструкции ЭНА — вход в РК. Вклад геометрических параметров этого элемента в эффективность отражают зависимости (5) и (6).

Для оценки эффективности конструкции ЭНА введен параметр „относительная эффективность“ E_r :

$$E_r = \eta_\phi / (\eta_p K_{\text{БК}}),$$

который не учитывает возможности повышения КПД ЭНА с помощью дополнительного уплотнения, так как его применение, как следует из рис. 2, приведет к повышению нагрузки на элементы конструкции ЭНА за счет увеличения разницы давлений на сторонах РК.

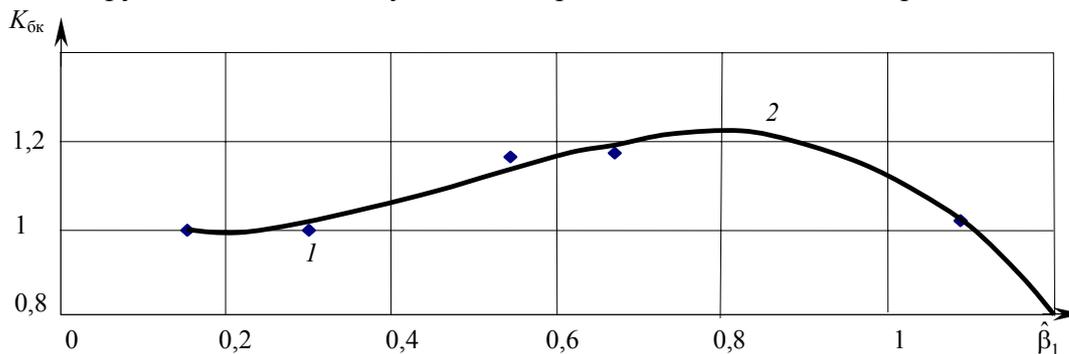


Рис. 3

Из рис. 3 видно, что относительный прирост КПД, возможный при учете бескавитационных условий работы ЭНА, может составить 20 % ($K_{бк \max} = 1,2$). В соответствии с [5] расчетный ресурс шарикоподшипниковых опор обратно пропорционален третьей степени эквивалентной нагрузки. Следовательно, относительное приращение ресурса подшипниковых опор при увеличении КПД ЭНА (и соответственно при снижении нагрузки) в 1,2 раза достигает значения $\approx 1,7$.

Заключение. Повышение КПД малорасходных электронасосных агрегатов, применяемых в системах терморегулирования космических аппаратов, возможно за счет выбора наиболее эффективных значений диаметра входа в РК. Реализация выявленных резервов повышения эффективности ЭНА позволяет повысить их КПД в 1,2 раза. Такой прирост КПД, сопровождающийся снижением нагрузки на подшипниковые опоры, означает возможность без применения более грузоподъемных подшипников, и следовательно без повышения массы конструкции, увеличить ее расчетный ресурс в 1,7 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yun S., Wolf D., Krolczek E. Design and Test Results of Multi-Evaporator Heat Pipe // 29th Int. Conf. on Environmental Systems. 1999. SAE Paper № 1999-01-2051.
2. Васильцов О. А., Невелич В. Г. Герметичные электронасосы. Л.: Машиностроение, 1968. 260 с.
3. Альтигуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов И. П. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987. 413 с.
4. Кривченко Г. И. Насосы и гидротурбины. М.: Энергия, 1970. 448 с.
5. Подшипники качения. Динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс (долговечность). ГОСТ 18855-94.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

В. Л. ГОЛЬДИН, Е. М. КУРБАТОВ

*Научно-производственное объединение прикладной механики им. акад. М. Ф. Решетнёва
Железногорск*

Э. М. ЯМАШЕВ

*Сибирский федеральный университет,
Железногорский филиал*

УСТРОЙСТВА ПОВОРОТА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрены основные принципы построения устройств поворота солнечных батарей, разработанных и серийно производимых в НПО ПМ, приведены технические характеристики, структурные схемы и внешний вид приводов.

Создание систем электропитания является одной из ключевых задач при проектировании космических аппаратов. Необходимость эффективного использования солнечной энергии во многом определяет принципы построения устройств поворота панелей солнечных батарей.

В НПО ПМ накоплен достаточно большой опыт проектирования и производства устройств поворота солнечных батарей (УПБС). Ориентируемые панели солнечных батарей (СБ) применяются на всех современных космических аппаратах (КА), эксплуатируемых на геостационарных, высокоэллиптических и высоких круговых орбитах: Радуга, Экран, Горизонт, Радуга-1, Поток, Луч, Луч-1, Галс, Экспресс, Экспресс-А, SESAT, Экспресс-АМ, Радуга-1М, Меридиан, ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-М, ГЛОНАСС-К.

Рассмотрим основные принципы построения УПБС для указанных выше КА. Все УПБС можно разделить на два конструктивных типа по виду механических блоков:

— с одним фланцем для вращения одного крыла СБ: КА Радуга, Радуга-1, Горизонт, ГЛОНАСС, ГЛОНАСС-К, Луч-5;

— с двумя фланцами для вращения двух крыльев СБ одновременно: КА Экран, Поток, Луч, Луч-1, Галс, Экспресс, Экспресс-А, SESAT, Экспресс-АМ, Радуга-1М, ГЛОНАСС-М.

На первых КА для геостационарной орбиты (Радуга, Горизонт, Экран) УПБС строились на базе коллекторных двигателей постоянного тока и с потенциометрами в качестве датчиков текущего положения выходного вала устройства. Это обеспечивало средний технический ресурс УПБС от трех до пяти лет. В связи повышением энерговооруженности космических аппаратов с 3 до 10—12 кВт и увеличением требований по ресурсу до 12—15 лет появилась необходимость разработки и производства УПБС нового поколения. В первую очередь был осуществлен переход от использования коллекторных двигателей постоянного тока к бесконтактным электродвигателям — шаговым и управляемым вентильным. Это позволило реализовать функционально более полные устройства. Замена потенциометрического датчика угла вращающимся трансформатором обеспечила гарантированный технический ресурс УПБС пять лет и уменьшила погрешность определения углового положения выходного вала, и, следовательно, панелей СБ до $2,5^\circ$. Для КА SESAT было достигнуто значение погрешности измерения углового положения панелей солнечных батарей не более 1° , для ГЛОНАСС-М — не более $0,15^\circ$, для ГЛОНАСС-К — не более $0,08^\circ$.

Рассмотрим основные технические решения, реализованные на различных этапах создания УПБС. Для КА Радуга УПБС состоит из двух механических блоков (МБ) и двух электронных блоков (ЭБ). МБ каждого крыла СБ обеспечивает передачу электроэнергии мощностью до 1,5 кВт по двум силовым кольцам с максимальным током через каждое кольцо 45 А. Для передачи сигналов управления и телеметрической информации в УПБС встроены 24 слаботочных кольца; в нем используются два вентильных электродвигателя ДБ-8 (основной и резервный). При штатной эксплуатации данный тип УПБС обеспечивает поворот крыла СБ со скоростью, незначительно превышающей орбитальную, и два раза в сутки (при угле 0 и 180°) по сигналам контактных датчиков происходит останов панелей СБ для обнуления накопившейся ошибки. В начальных режимах при раскрытии панелей батарей и при нештатных ситуациях для ускоренной ориентации солнечных панелей используется повышенная скорость. Информация о текущем положении панелей СБ снимается с потенциометрического датчика.

УПБС для КА Горизонт построено по такому же принципу и отличается установленными в каждом МБ четырьмя электродвигателями ДБ-8 для повышения надежности. В КА Экран с помощью одного УПБС осуществляются поворот одновременно двух крыльев СБ и передача большей мощности ($\approx 2,7$ кВт). В остальном построение и логика работы аналогичны УПБС для КА Радуга.

Для КА Поток впервые в отечественной практике в составе УПБС были применен шаговый электродвигатель ДШ-40 и реализован цифровой информационный канал определения текущего углового положения панелей СБ на базе вращающегося трансформатора типа 2,5ВТ. Данное устройство обеспечивает одновременный поворот двух крыльев СБ и рассчитано на передачу $\approx 4,5$ кВт электроэнергии. Электронный блок управления обеспечивает как управление электродвигателем, так и получение информации с датчиков угла. В данном типе УПБС используется скважный режим управления: цикл управления составляет один час, в течение 10—15 минут которого осуществляется вращение СБ со скоростью 1,2 °/мин и 45—50 минут — останов привода. Недостатком такого управления является наличие больших возмущающих динамических моментов во время режима пуск—останов.

Данное устройство использовалось также в составе КА Луч. Для последующих КА (Луч-1, Галс, Экспресс и Экспресс-А) использовано модернизированное УПБС, обеспечивающее передачу 8,5 кВт электроэнергии. В нем применены более мощные шаговые электродвигатели (типа ДШ-48), разработанные и изготовленные в НПО ПМ. Особенностью конструкции этих двигателей является наличие магнитного демпфера, значительно увеличившего ресурс как самого электродвигателя, так и МБ в целом.

Разработанное УПБС для КА SESAT обеспечивает одновременный поворот двух крыльев СБ и рассчитано на передачу 6,5 кВт электроэнергии и 62 слаботочных сигналов. С целью минимизации возмущающих моментов в данном устройстве на КА впервые в России применен следящий цифровой электропривод, обеспечивший полную синхронизацию вращения панелей СБ и орбитальной скорости КА независимо от фактических параметров орбиты. Это достигается за счет широкой кратности линейного регулирования скорости в диапазоне 1:4000 при малом единичном приращении. Управление осуществляется путем подачи соответствующего цифрового кода требуемой скорости вращения, стабилизацию которой обеспечивает электронный блок управления электродвигателем с допустимой погрешностью отклонением не более 0,1 % за весь срок эксплуатации КА на орбите (не менее 10 лет).

В качестве исполнительного элемента использован оригинальный малогабаритный электродвигатель разработки и изготовления НПО ПМ, в качестве первичного преобразователя датчика угла — бесконтактный вращающийся трансформатор типа 2,5ВТ-2. Выходным сигналом датчика угла является 12-разрядный двоичный натуральный код угла с ценой единицы младшего разряда 5'. Структурные схемы данного УПБС и его электропривода приведены соответственно на рис. 1, 2. (Обозначения на рис. 1: ТМ — телеметрический; БЭУП — электронный блок

устройства поворота; БУД — блок управления двигателем; ПФК — преобразователь фаза—код; ЭД — электродвигатель; ВТ — вращающийся трансформатор; СТУ — силовое токосъемное устройство; ТТУ — телеметрическое токосъемное устройство; СЭП — система электропитания; УС — управляющие сигналы; на рис. 2: ГОЧ — генератор опорной частоты; ПКЧ — преобразователь код—частота; ПУФ — преобразователь угол—фаза; ФЧВ — фазочувствительный выпрямитель; ИЧФД — импульсный частотно-фазовый детектор; КУ — корректирующее устройство; ПС — перемножитель сигналов; РТ — регулятор тока.)

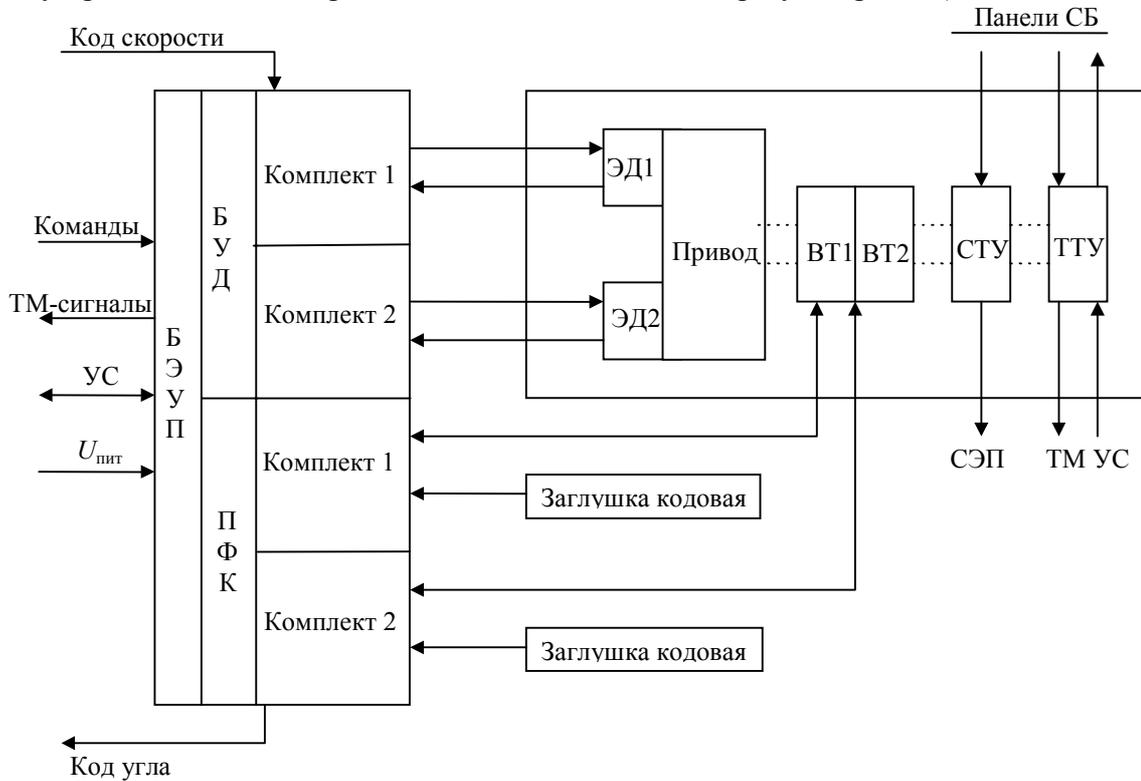


Рис. 1

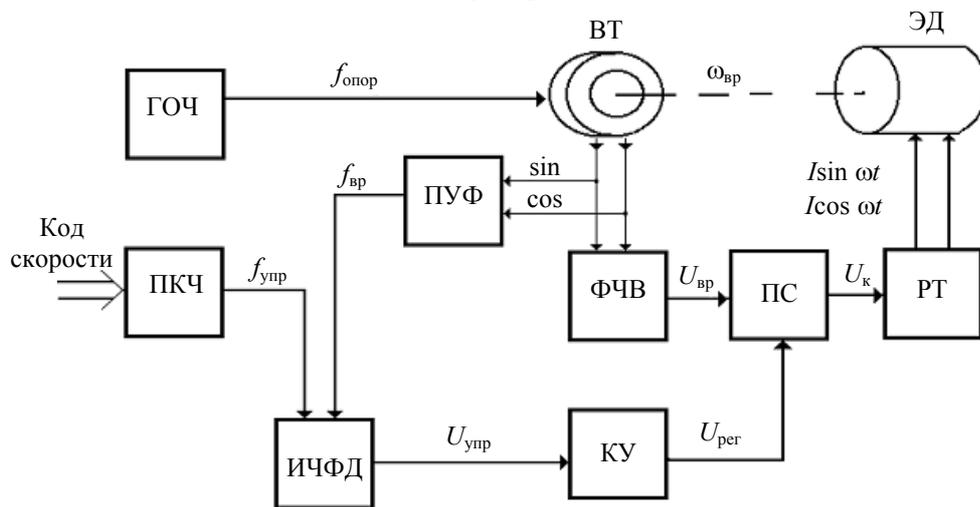


Рис. 2

Аналогичное техническое решение было применено в УПБС для КА ГЛОНАСС-М и Меридиан. Здесь МБ этого УПБС обеспечивает одновременный поворот двух крыльев СБ и рассчитан на передачу 9 кВт электроэнергии и 96 слаботочных сигналов.

В КА ГЛОНАСС в связи с особыми требованиями по минимизации погрешности ориентации панелей СБ, в значительной степени влияющей на выполнение целевой задачи всей системы ГЛОНАСС, в качестве первичного преобразователя датчика угла использован

многополюсный двухотсчетный вращающийся трансформатор типа ВТ-100. Это позволило получить фактическую погрешность измерения текущего положения панелей СБ не более $8'$. Выдача информации о текущем угловом положении панелей СБ осуществляется 16-разрядным двоичным натуральным кодом с ценой единицы младшего разряда $10''$.

Во всех рассмотренных УПБС МБ выполнены герметичными, что обеспечивает относительно „комфортные“ условия эксплуатации электродвигателей и зубчатых многоступенчатых редукторов с передаточным отношением $(80—100) \cdot 10^3$.

Последние разработки УПБС ведутся для КА Луч-5 и ГЛОНАСС-К, в которых для вращения каждого крыла СБ также используются свой МБ и единый электронный блок. Для электропривода применяется синхронный электродвигатель с электромагнитной редукцией (СДЭР).

Для УПБС КА Луч-5 в качестве датчика угла использован потенциометр. Каждый механический блок обеспечивает передачу 1,6 кВт электроэнергии и 15 слаботочных сигналов. Для этого КА использует режим непрерывной работы „Слежение-1“ со скоростью, близкой к орбитальной, с переходом в режим „Стоп“ или „Слежение-2“ (с удвоенной орбитальной скоростью) для обнуления накопившейся ошибки. Структурная схема УПБС для КА Луч-5 приведена на рис. 3 (здесь БУД — блок управления двигателем; БПУК — блок преобразователя угол—код; Р — редуктор, ДУ — датчик угла).

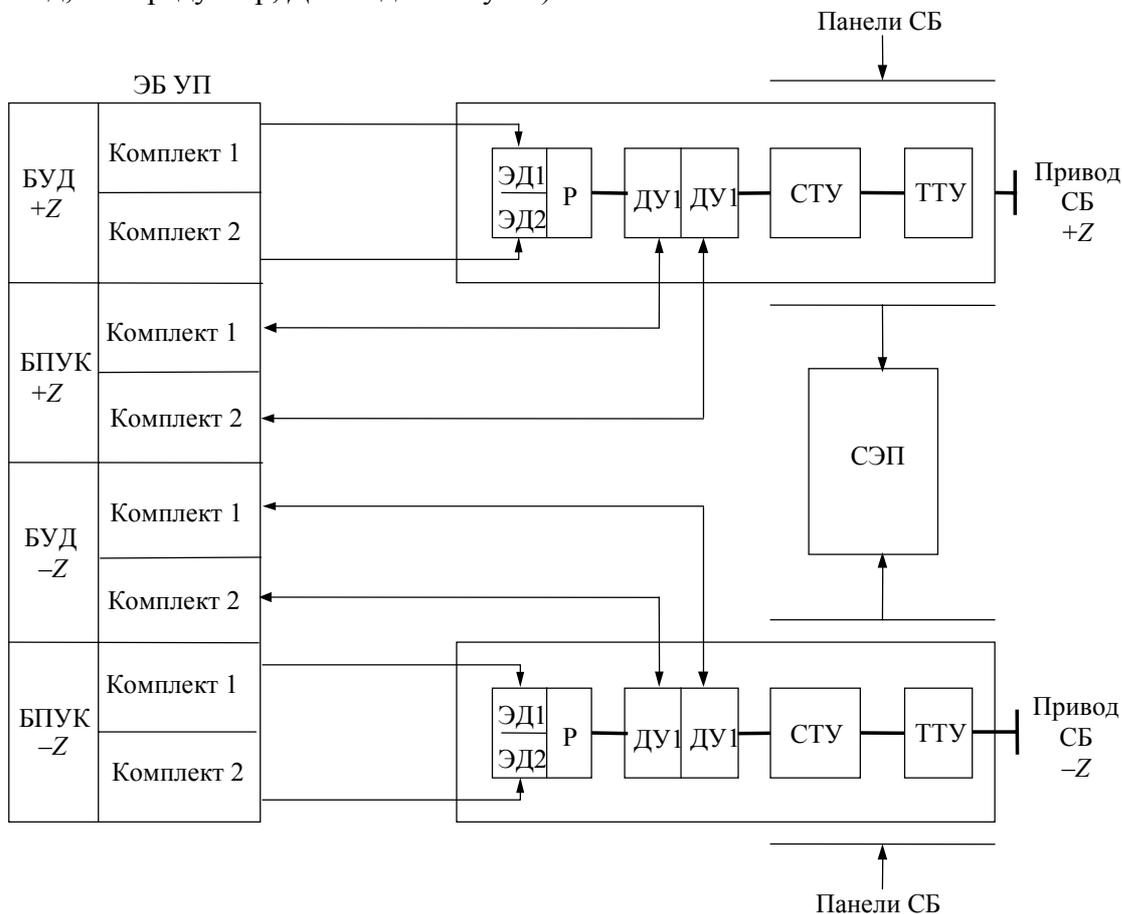


Рис. 3

Отличительной особенностью УПБС для КА ГЛОНАСС-К является использование режима работы с непрерывным направлением СБ на Солнце путем управления скоростью вращения панелей и применении 16-разрядного оптоэлектронного датчика угла. Параметры всех перечисленных устройств представлены в табл. 1.

Сравнительные данные по УПБС разработки НПО ПМ и зарубежных фирм приведены в табл. 2. Сравнительные данные по УПБС разработки НПО ПМ и российских производителей приведены в табл. 3.

Внешний вид механических блоков представлен на рис. 4—8 (рис. 4 — для КА Поток, Луч; рис. 5 — Луч-1, Галс; рис. 6 — SESAT, Экспресс-АМ; рис. 7 — ГЛОНАСС-М, Меридиан).

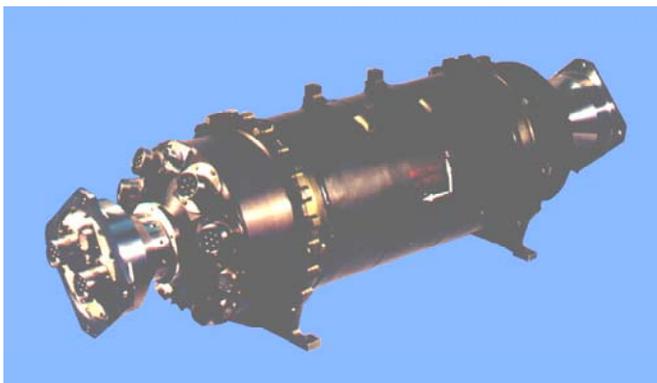


Рис. 4

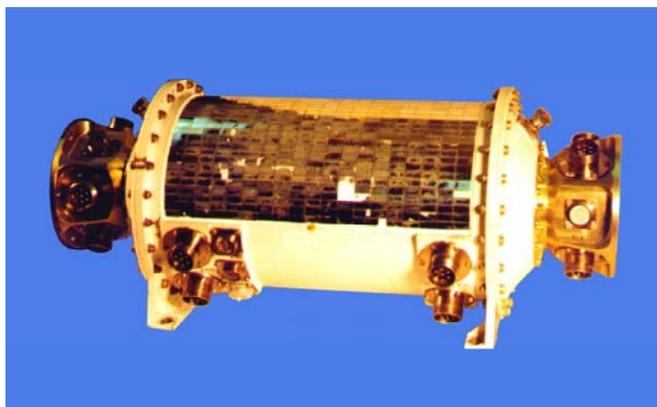


Рис. 5

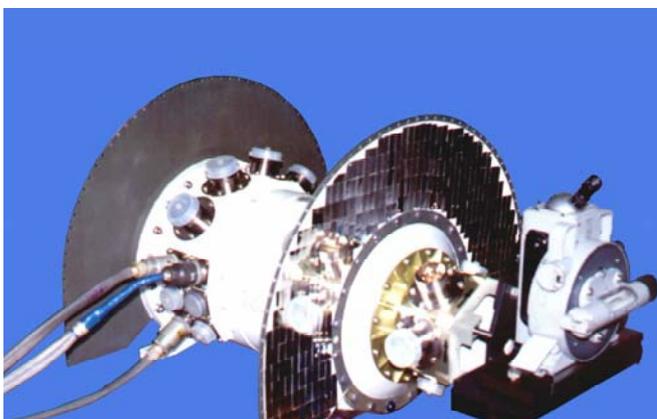


Рис. 6

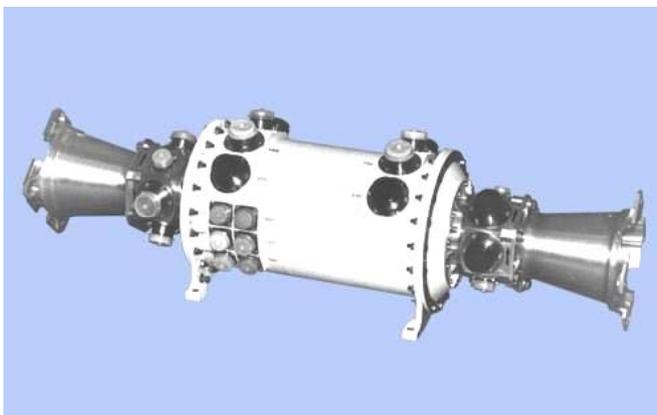


Рис. 7

Результаты эксплуатации и сравнительный анализ приведенных таблиц показывают, что НПО ПМ достигло значительных результатов в совершенствовании характеристик УПБС КА и является признанным лидером в этой отрасли космического приборостроения как в России, так и среди зарубежных производителей.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

УДК 621.833:539.4

В. Н. РАЖИКОВ

*Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова
Санкт-Петербург*

Э. М. ЯМАШЕВ, М. В. ИВШИНА

*Сибирский федеральный университет
Железногорский филиал*

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В ЗУБЧАТОМ ПЛАНЕТАРНОМ РЕДУКТОРЕ К-Н-V ПРИВОДА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ АНТЕННЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СПУТНИКАМИ СВЯЗИ

Представлен метод расчета распределения усилий между зубьями в многопарном зацеплении мелкомодульных зубчатых колес планетарной передачи К-Н-V. При расчете учитываются геометрия зубчатого зацепления, погрешности изготовления и монтажа зубчатых колес, значение действующего момента и вызываемые им деформации.

Для мачтовой выдвижной антенны наземного сегмента связи со спутником Земли разработано опорно-поворотное устройство, в котором сочетаются механизм (привод) поворота антенны и собственно поворотное устройство.

Многочисленные ограничения и взаимоисключающие требования определили в качестве механизма поворота антенны следящий электромеханический привод на основе планетарного редуктора типа К-Н-V в форме тора, вписывающегося в ранее созданную конструкцию выдвижного антенного устройства.

Особенности рассматриваемой передачи и погрешности зубчатых колес существенно влияют на неравномерность распределения нагрузки среди пар зубьев в многопарном зацеплении [1]. В этой связи для расчета нагрузочной способности планетарной передачи необходимо оценить неравномерность распределения усилий в зубчатом зацеплении.

В рассматриваемой конструкции поворотного устройства с планетарной передачей К-Н-V в рабочем зацеплении находятся два сателлита и колесо внутреннего зацепления с модулем зубьев 0,4 мм и числом зубьев 928 и 932 соответственно. Для оценки неравномерности распределения усилий среди пар зубьев с учетом зазоров и деформаций при действии внешних нагрузок была разработана модель нагружения зубьев в зацеплении сателлита и колеса планетарной передачи К-Н-V. При взаимодействии сателлитов с колесом планетарной передачи К-Н-V имеет место многопарное зацепление зубьев. Количество зубьев, участвующих в зацеплении при заданных геометрических параметрах колес, будет зависеть от действующего крутящего момента, жесткости зубчатых зацеплений и от зазоров между рабочими поверхностями зубьев. Значения рабочих зазоров в зацеплениях зубьев получаются сложением значений

зазоров, возникающих при смещении делительных окружностей шестерни и колеса, а также вследствие погрешности шагов шестерни и колеса в зацеплениях. В свою очередь, распределение погрешностей шагов зависит от точности изготовления и монтажа передачи, которые регламентируются ГОСТ 9178-81, по двум показателям: предельному отклонению шага и допуску на накопленную погрешность шагов зубчатого колеса.

Для оценки распределения величины номинальных зазоров между рабочими поверхностями зубьев идеально точных зубчатых колес, связанных со смещением делительных окружностей шестерни и колеса при удалении их от полюса зацепления, воспользуемся зависимостью, приведенной в работе [2]. Расчеты показывают, что для значений диаметров окружностей выступов, задаваемых чертежами, $d_{a1}=371,8$ мм и $d_{a2}=372,4$ мм в зацеплении зубьев теоретически может участвовать 176 пар. При перемещении зубчатой пары от полюса зацепления зазоры в зацеплении зубьев сначала увеличиваются до ~ 25 мкм, а затем уменьшаются вплоть до образования натяга в ~ 25 мкм (рис. 1, где Ω — расчетное изменение зазоров между рабочими поверхностями в зацеплениях зубьев, Δ — диаметральное смещение зацепляемых зубьев при удалении от полюса зацепления, k — номер зубчатого зацепления, считая от полюса).

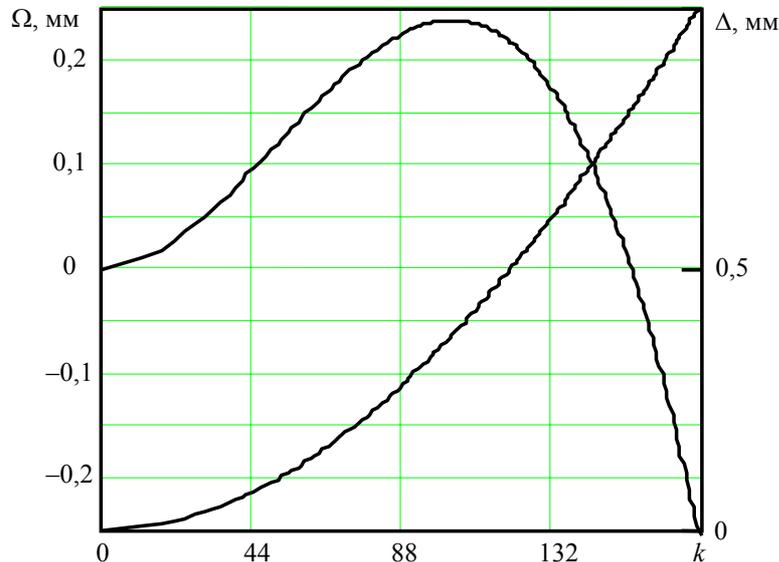


Рис. 1

В соответствии с ГОСТ 9178-81 для колес поворотного устройства, имеющих 7-ю степень точности, допуск на накопленную погрешность шага как шестерен, так и зубчатого колеса, равен $F_p = 63$ мкм, а предельные отклонения шага равны $f_{pt} = \pm 11$ мкм. Характер изменения накопленной погрешности шагов как колеса, так и шестерен, при движении по делительной окружности близок к синусоидальному. В зацеплении шестерни и колеса значения погрешности будут алгебраически суммироваться, постоянно смещаясь друг относительно друга по фазе.

Погрешности отдельных шагов шестерни и колеса, обусловленные значениями предельных отклонений, как правило, распределяются по нормальному закону. На рис. 2 представлены плотность вероятности для нормального закона распределения отклонений шагов колеса (а) и реализация случайной выборки отклонений, z , этих шагов, j (б).

При многопарном зацеплении зубьев существенное значение приобретают и накопленные погрешности шагов шестерни и колеса, так как их распределение может значительно влиять на изменение рабочих зазоров и, следовательно, на распределение усилий в зацеплениях зубьев. Наибольшее значение накопленных погрешностей шагов соответствует их алгебраическому суммированию в противофазе. Этот случай положен в дальнейшем в основу расчетов. Важную роль играет и фаза суммарной накопленной погрешности, приходящаяся на полюс зацепления.

Значения накопленных погрешностей шагов шестерни и колеса используются в дальнейшем для моделирования распределения зазоров между рабочими поверхностями зубьев. Для того чтобы при суммировании накопленных погрешностей и предельных отклонений шагов допуск не превысил величину, указанную в ГОСТ 9178-81, допуск на накопленную погрешность шагов уменьшен на удвоенную предельную погрешность шага $2f_{pl} = 0,022$ мм.

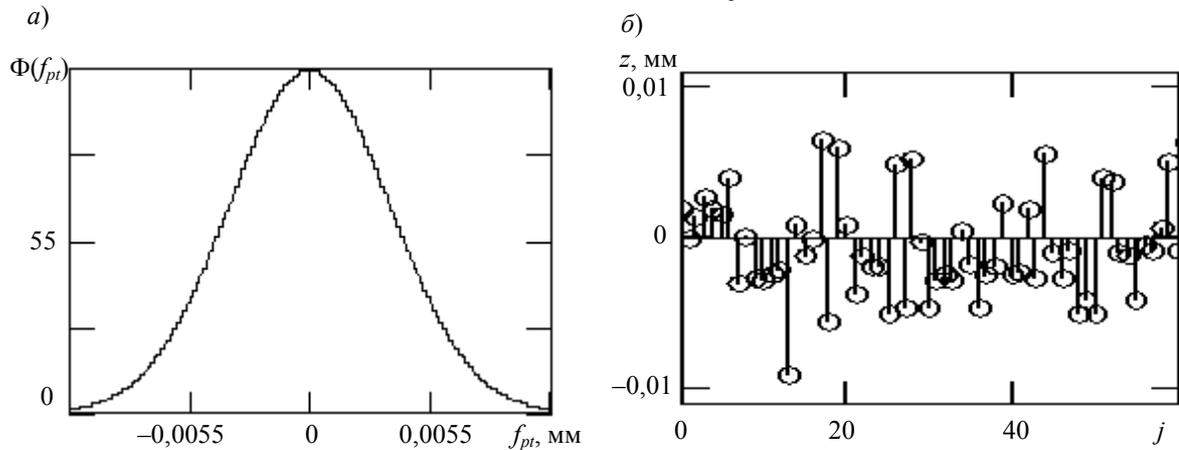


Рис. 2

Для моделирования распределения зазоров между рабочими поверхностями зубьев алгебраически просуммируем изменение зазоров, связанное со смещением делительных диаметров шестерни и колеса, случайное распределение отклонений шагов и реализацию суммы накопленной погрешности шагов.

Во время действия крутящего момента количество зубьев, находящихся в зацеплении, будет зависеть как от величины момента, жесткости взаимодействующих зубьев, так и от распределения зазоров в зацеплениях зубьев, прилежащих к полюсу. Силы, возникающие при взаимодействии зубьев, будут направлены к полюсу зацепления. Вблизи полюса зацепления жесткость пары зубьев принимается равной $C_q = 14\ 000$ МПа. При кромочном контакте головки и ножки в зубчатом зацеплении величина удельной жесткости принимается равной $C_q = 10\ 000$ МПа. На выходе из теоретически возможной области зацепления пары взаимодействуют вершинами зубьев, поэтому жесткость будет меньше \approx в 2 раза, т.е. $C_q = 5000$ МПа. При расчете в первом приближении был использован линейный закон уменьшения жесткости зубчатой пары от момента начала входа ее в нагруженную зону до момента выхода.

Если считать, что полюс зацепления не смещен вследствие деформаций, а крутящий момент равномерно распределяется между двумя сателлитами, то для составления уравнения равновесия можно рассмотреть расчетную схему, представленную на рис. 3. Здесь крутящий момент $T_{c1} = 5700$ Н·м уравнивается силами, возникающими в зацеплениях зубьев F .

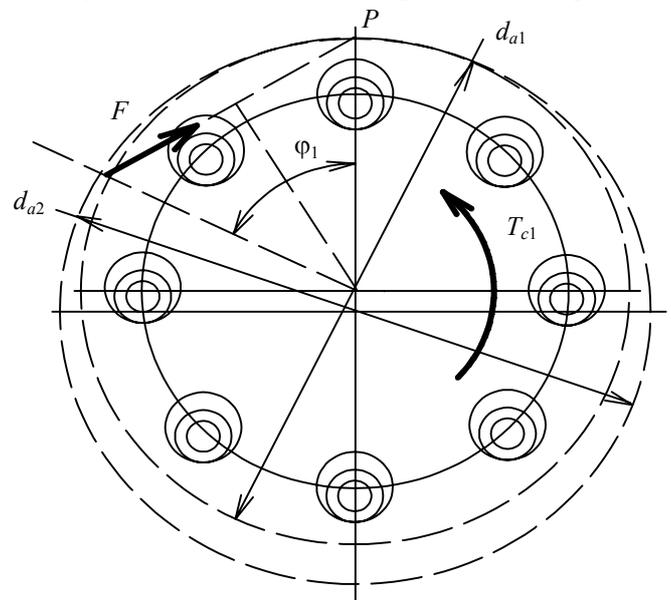


Рис. 3

Эти силы направлены к полюсу зацепления P . При расчете угловая деформация сателлита под действием момента, переведенная в длину дуги начальной окружности ΔL , подбирается

таким образом, чтобы установилось равновесие. Зацепления зубьев, у которых суммарные зазоры больше ΔL , из рассмотрения исключаются.

При проведении расчетов распределения усилий в зацеплениях зубьев принимались следующие допущения.

1. Полнос зацепления шестерни и колеса соответствует расчетному. Таким образом, погрешности изготовления и деформации пальцев водила и отверстий под нагрузкой не учитываются.

2. Распределение крутящего момента привода между двумя сателлитами равномерное.

3. Рассматривается только случай, когда накопленные погрешности шагов шестерни и колеса находятся в противофазе. Все другие случаи приводят к более равномерному распределению нагрузки среди зубчатых пар. Вместе с тем фаза суммарной накопленной погрешности шагов в полюсе зацепления изменяется при работе привода, поэтому для анализа используются четыре характерных случая, соответствующие фазам: 0 ; $\pi/2$; π ; $3\pi/2$.

4. Расчеты ведутся на основе разработанной стохастической модели, поэтому распределение нагрузки носит случайный характер, близкий к распределению в реальном приводе, поэтому для анализа используется несколько реализаций.

На рис. 4 приведены фрагмент распределения зазоров между рабочими поверхностями и распределение нагрузок среди зубьев во входной и выходной зонах при фазе, равной нулю.

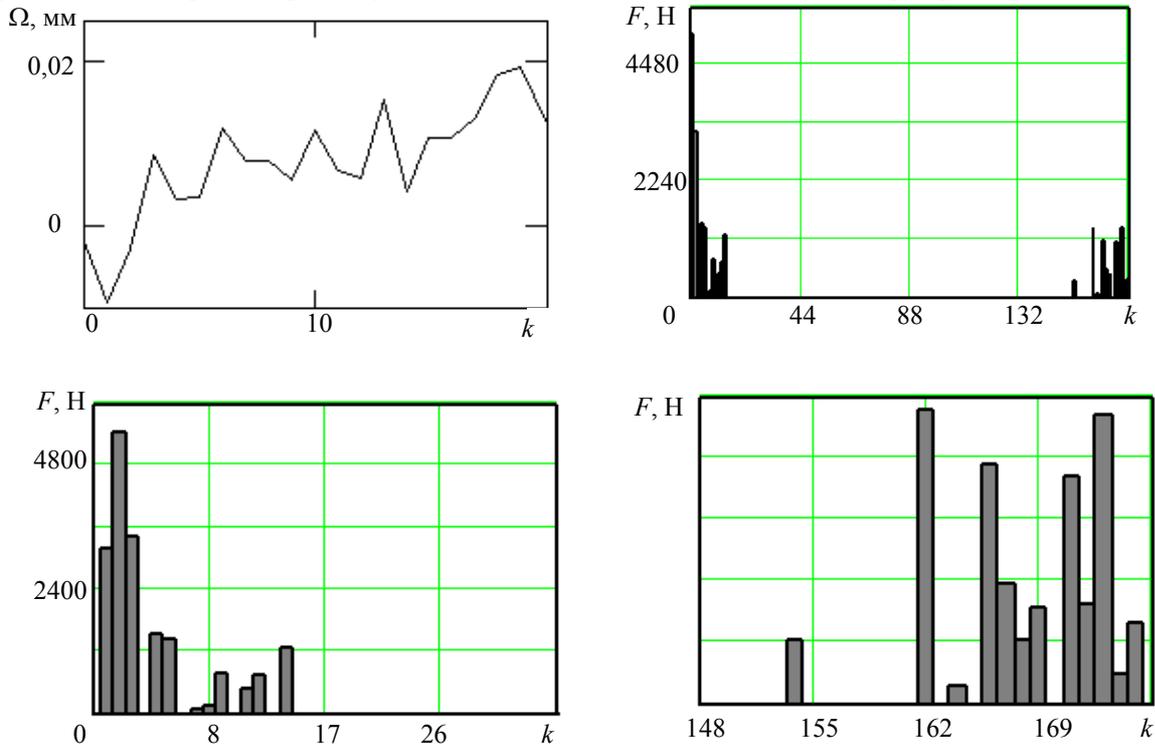


Рис. 4

Анализ расчетов показывает, что в зацеплении сателлита и колеса поворотного устройства имеет место многопарное зацепление. Число зубчатых пар, находящихся в зацеплении одновременно, колеблется от 14 до 26 в зависимости от распределения погрешности в передаче. Распределение усилий в зацеплениях зубьев может охватывать входную зону, прилегающую к полюсу (9—12 пар зубьев), и выходную зону (5—26 пар зубьев). На распределение нагрузки между зубьями существенное влияние оказывают погрешности изготовления и сборки передачи. При фазах суммарной накопленной погрешности шагов, равной 0 и $\pi/2$, усилия в зацеплениях зубьев распределяются как между зубьями входной зоны, так и между зубьями выходной зоны, а при фазах π и $3\pi/2$ усилия между зубьями распределяются только в выходной зоне. В последних двух случаях накопленная погрешность шагов заставляет сател-

лит развернуться в сторону направления вращения, поэтому величина ΔL имеет отрицательное значение. Оно выведено в результатах расчетов.

При фазе суммарной накопленной погрешности шагов, равной нулю, наибольшее значение усилия, действующего в зацеплении зубьев входной зоны, равно 6500 Н, а в выходной зоне — 1700 Н. Если фаза суммарной накопленной погрешности шагов равна $\pi/2$, то наибольшее значение усилия в зубчатой паре входной зоны достигает 8300 Н, в то время как в выходной зоне оно снижается до 1500 Н.

В случаях, когда фаза суммарной накопленной погрешности шагов равна π и $3\pi/2$, наибольшие значения усилий в зацеплениях зубчатых пар соответственно равны 3300 и 2700 Н. Таким образом, более равномерное распределение нагрузки имеет место при фазе $3\pi/2$.

Из вышеизложенного следует, что в процессе пересопряжения зубьев зубчатой пары во входной зоне под нагрузкой оказываются поверхности головок зубьев шестерни и колеса в районе полюсной линии с наибольшим усилием 8300 Н. При выходе из зацепления у зубчатой пары нагружены также поверхности головок зубьев, прилежащие к диаметрам окружностей выступов. Наибольшее усилие в этом случае равно 3300 Н.

Результаты расчетов распределения усилий в зубчатом зацеплении служат основой для расчетов несущей способности и ресурса зубчатых передач планетарного редуктора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин И. С., Ражиков В. Н. Нагрузочная способность мелкомодульных зубчатых редукторов // Прочность и надежность механического привода. Л., 1977. С. 144—158.
2. Кудрявцев В. Н. Планетарные передачи. М.—Л.: Машиностроение, 1966. 308 с.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.513

А. В. ЛАПКО, М. А. ШАРКОВ

*Сибирский федеральный университет
Красноярск*

В. А. ЛАПКО

*Институт вычислительного моделирования СО РАН
Красноярск*

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ ВЫБОРОК

Рассматриваются непараметрические оценки плотности вероятности и алгоритмы распознавания образов в условиях малых выборок, основанные на искусственной генерации дополнительных статистических данных. Исследования их свойств выполнены аналитически и методом вычислительного эксперимента.

Большинство статистических методов распознавания образов ориентировано на представительные обучающие выборки. Однако при решении прикладных задач исследователи часто располагают ограниченным объемом наблюдений — короткой либо малой выборкой, что обуславливается нестационарностью объекта исследования, высокой сложностью и стоимостью получения дополнительной информации. Получаемые решающие правила не всегда обеспечивают приемлемых результатов классификации, так как информации малых обучающих выборок недостаточно для оценивания вероятностных характеристик изучаемых закономерностей.

В условиях малых выборок широкое распространение получили принципы декомпозиции систем и последовательные процедуры формирования решений. Так, для увеличения отношения „объем/размерность“ (n/k) обучающей выборки формируются наборы признаков классифицируемых объектов, в пространстве которых формулируются частные решающие правила. Для получения обобщенного решения используются методы коллективного оценивания на основе вторичных факторов, определяемых количеством наборов исходных признаков [1, 2].

Метод группового учета аргументов (МГУА) реализует последовательную процедуру усложнения решающего правила путем целенаправленного отбора (селекции) пар, состоящих из первичных и промежуточных признаков [3]. Каждый этап синтеза алгоритма характеризуется отношением $n/k = n/2$. Алгоритмы МГУА отличаются друг от друга критерием селекции, количеством промежуточных моделей и их сложностью.

В работе [4] приведены результаты исследований по генерации случайных величин с плотностью вероятности, представляющей собой ядерную оценку Розенблатта—Парзена. Предложенные процедуры продолжения случайных последовательностей обосновывают возможность искусственного увеличения объема n обучающей выборки, а следовательно и отношения n/k . Асимптотические свойства получаемой при этом ядерной оценки плотности вероятности исследованы в работе [5], результаты которой являются основой для синтеза непараметрических алгоритмов распознавания образов в условиях малых выборок.

Оценивание плотности вероятности в условиях малых выборок. Будем считать, что восстанавливаемая плотность вероятности $p(x)$ и первые две ее производные ограничены и непрерывны.

При оценивании плотности вероятности $p(x) \forall x \in R^1$ в условиях малых выборок увеличим объем исходных данных $V = (x^i, i = \overline{1, n})$ за счет результатов статистического моделирования. С этой целью в β -окрестности каждой i -й ситуации выборки проведем m имитаций случайной величины \bar{x} с законом распределения $p_i(\bar{x})$ и нулевым математическим ожиданием.

Нетрудно заметить, что полученная статистическая выборка $V_2 = (x^i + \bar{x}^j, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n})$ соответствует смеси плотностей вероятности

$$\hat{p}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i(\bar{x}),$$

ее непараметрическая оценка запишется в виде

$$\bar{p}(x) = (nmc)^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Phi \left(\frac{x - x^i - \bar{x}^j}{c} \right), \tag{1}$$

где $\Phi(u)$ — ядерная функция, удовлетворяющая условиям

$$\Phi(u) \geq 0, \int \Phi(u) du = 1, \Phi(u) = \Phi(-u), \int u^v \Phi(u) du < \infty, v \geq 2,$$

$$\Phi(u_2) \geq \Phi(u_1), \forall |u_2| \leq |u_1|,$$

$c = c(n)$ — параметр размытости ядерной функции.

В многомерном случае $x \in R^k$ оценка плотности вероятности имеет вид

$$\bar{p}(x) = (nm)^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \prod_{v=1}^k \frac{1}{c_v} \Phi \left(\frac{x_v - x_v^i - \bar{x}_v^j}{c_v} \right). \tag{2}$$

В работе [5] определены асимптотические выражения для смещения

$$M(\hat{p}(x) - p(x)) \sim \frac{p^{(2)}(x)}{2} (c^2 + \mu^{-2}) \tag{3}$$

и среднего квадратического отклонения

$$\begin{aligned} \tilde{W}(x, \bar{x}) = M(\bar{p}(x) - p(x))^2 &\sim \frac{p(x) \|\Phi(u)\|^2}{2nmc} \mu^{-2} + \frac{1}{n} [p^2(\bar{x}) - 2p(\bar{x})p^{(1)}(\bar{x})\mu + \\ &+ ((p^{(1)}(\bar{x}))^2 + p(\bar{x})p^{(2)}(\bar{x}))\mu^2 - p^{(1)}(\bar{x})p^{(2)}(\bar{x})\mu^3 + \frac{(p^{(2)}(\bar{x}))^2}{4}\mu^4] + \\ &+ \frac{1}{m} \left[p^2(x) - (p^{(1)}(x))^2 \mu^{-2} + \frac{(p^{(2)}(x))^2}{4} \mu^{-4} + p(x)p^{(2)}(x)\mu^{-2} \right] + \frac{(p^{(2)}(x))^2}{4} (c^2 + \mu^{-2})^2. \end{aligned} \tag{4}$$

Здесь M — знак математического ожидания; $p^{(v)}(x), p^{(v)}(\bar{x}), v = 1, 2$ — первые и вторые производные плотностей вероятности случайных величин x и \bar{x} ;

$$\mu^v = \int x^v p(x) dx, v = \overline{1, 4}, \quad \bar{\mu}^v = \int_{-\beta}^{\beta} \bar{x}^v p(\bar{x}) d\bar{x}, v = \overline{1, 2}, \quad \|\Phi(u)\|^2 = \int \Phi^2(u) du.$$

Доказательство асимптотической сходимости непараметрических оценок, предназначенных для обнаружения закономерностей в условиях малых выборок, позволяет аналитически обосновать методику их синтеза. На этой основе появляется возможность определить количественную взаимосвязь между характеристиками обучающей выборки, параметрами имитационной процедуры формирования дополнительной статистической информации и исследуемых алгоритмов их обработки, что необходимо для объяснения результатов вычислительных экспериментов.

Проведем анализ асимптотического выражения среднего квадратического отклонения $\tilde{W}(x, \bar{x})$ на всем диапазоне изменения x и \bar{x} . При этом будем полагать

$$p(\bar{x}) = (2\beta)^{-1} \forall x \in [-\beta; \beta]$$

и пренебрегать вследствие малости $\beta^3, \beta^2 c^2, c^4, \beta^3 / (nmc)$ в процессе преобразований. Тогда, проинтегрировав выражения $W(x, \bar{x})$ по переменным x, \bar{x} , получим

$$\tilde{W} \sim \frac{\Delta}{2n\beta} + \frac{2\|p(x)\|^2 \beta}{m}, \quad (5)$$

где Δ — длина интервала изменения x .

Отметим зависимость асимптотических свойств оценки плотности $\bar{p}(x)$ от объема исходной информации и результатов статистического моделирования.

Как и следовало ожидать, с ростом m оценка среднего квадратического отклонения (5) стремится к пределу $\frac{\Delta}{2n\beta}$. Полученные выводы подтверждают принципиальную возможность использования оценок типа (1) при обработке малых выборок. Вместе с тем условия конечных n и $m \rightarrow \infty$ не обеспечивают сходимость $\bar{p}(x)$ к $p(x)$.

Причем зависимость W от β при определенных значениях m и n имеет экстремальный характер и при оптимальном

$$\beta^* = \left(\frac{m\Delta}{4n\|p(x)\|^2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

достигает своего минимума.

Из анализа выражения (6) следуют вполне очевидные соотношения между параметрами β^*, m и Δ . Интервал $2\beta^*$ генерирования искусственной обучающей последовательности увеличивается с ростом области определения $p(x)$ и количества имитаций m и снижается по мере увеличения объема n исходной выборки.

Определим условия, при которых предлагаемая методика увеличения объема выборки обеспечивает повышение эффективности оценивания плотности вероятности.

Известно, что традиционной непараметрической оценке ядерного типа [6]

$$\tilde{p}(x) = (nc)^{-1} \sum_{i=1}^n \Phi \left(\frac{x - x^i}{c} \right) \quad (7)$$

соответствует минимальное значение асимптотического выражения среднего квадратического отклонения

$$\tilde{W} = \|\tilde{p}(x) - p(x)\|^2 \sim \frac{5}{4} \left(\left(\frac{\|\Phi\|^2}{n} \right)^4 \|p^{(2)}(x)\|^2 \right)^{1/5}.$$

Для определения эффективности оценки (1) используем выражение (5) для ее среднего квадратического отклонения при оптимальном значении β^* (6):

$$\bar{W} \sim 2 \left(\frac{\Delta \|p(x)\|^2}{nm} \right)^{1/2}.$$

Тогда из условия $\tilde{W} / \bar{W} > 1$ можно определить требование на количество имитаций m процедуры генерирования искусственной обучающей выборки

$$m > 2,56 \Delta \|p(x)\|^2 \left(n^3 / \left(\left(\|\Phi\|^2 \right)^4 \|p^{(2)}(x)\|^2 \right) \right)^{1/5}, \tag{8}$$

при котором оценка (1) будет обладать более высокими аппроксимационными свойствами по сравнению с традиционной непараметрической оценкой плотности вероятности ядерного типа (7).

Синтез уравнения разделяющей поверхности в условиях малых выборок. Для упрощения выкладок, без существенной потери в получаемых результатах, рассмотрим методику построения уравнения разделяющей поверхности в условиях малых выборок на примере двухвариантной задачи распознавания образов в пространстве непрерывных признаков.

В этом случае решающее правило имеет вид

$$r(x) : \begin{cases} x \in \Omega_1, & \text{если } f_{12}(x) > 0, \\ x \in \Omega_2, & \text{если } f_{12}(x) \leq 0, \end{cases} \tag{9}$$

где $f_{12}(x) = p_1(x) - p_2(x)$ — байесовское уравнение разделяющей поверхности между классами Ω_1 и Ω_2 , соответствующее критерию максимального правдоподобия.

Для построения решающего правила воспользуемся оценкой плотности вероятности, предложенной в выражении (2). Пусть n_1 и n_2 — количество ситуаций обучающей выборки $(x^i, \sigma(i), i = \overline{1, n})$, принадлежащих первому и второму классу. Тогда непараметрическая оценка уравнения разделяющей поверхности может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{12}(x) = \bar{p}_1(x) - \bar{p}_2(x) &= \frac{1}{n_1 m} \sum_{i \in I_1} \sum_{j=1}^k \prod_{v=1}^k \frac{1}{c_v} \Phi \left(\frac{x_v - x_v^i - \bar{x}_v^j}{c_v} \right) - \frac{1}{n_2 m} \sum_{i \in I_2} \sum_{j=1}^k \prod_{v=1}^k \frac{1}{c_v} \Phi \left(\frac{x_v - x_v^i - \bar{x}_v^j}{c_v} \right) = \\ &= \left(nm \prod_{v=1}^k c_v \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \sigma(i) \sum_{j=1}^k \prod_{v=1}^k \Phi \left(\frac{x_v - x_v^i - \bar{x}_v^j}{c_v} \right), \end{aligned} \tag{10}$$

где

$$\sigma(i) = \begin{cases} (n_1 / n), & \text{если } x \in \Omega_1, \\ -(n_2 / n), & \text{если } x \in \Omega_2, \end{cases}$$

I_1, I_2 — множество номеров ситуаций из обучающей выборки, принадлежащих первому и второму классу соответственно.

При оптимизации решающей функции (10) сначала определяются параметры β процедуры генерирования обучающей выборки $\bar{V} = (x^i + \bar{x}^j, \sigma(i), j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n})$, где параметр $\sigma(i)$

указывает на принадлежность ситуации $x^i + \bar{x}^j$ к одному из классов. Выбор значения β осуществляется для каждого класса из условия полного покрытия β -окрестностями области определения соответствующей части обучающей выборки. При этом количество пересечений всех β -окрестностей должно быть минимальным.

Затем определяются параметры m и $c_{v, v=1, \bar{k}}$ непараметрической оценки уравнения разделяющей поверхности из условия минимума эмпирической оценки вероятности ошибки распознавания образов в режиме „скользящего экзамена“ по выборке \bar{V} [7].

Для повышения эффективности непараметрических алгоритмов распознавания образов в условиях малых выборок возможно использовать принципы коллективного оценивания. Пусть $\tilde{r}_{12}^j(x)$, $j=1, \bar{M}$ — непараметрические решающие правила для двухвариантной задачи распознавания образов, которые построены по выборкам $(x^i + \bar{x}^j, \sigma(i), j=1, \bar{m}, i=1, \bar{n})$, отличающимся случайными последовательностями, „расширяющими“ при одних и тех же значениях параметров имитации m и β исходную обучающую выборку.

Воспользуемся одним из известных подходов коллективного оценивания, например, методом „голосования“ и построим решающее правило

$$\tilde{r}_{12}(x) : \begin{cases} x \in \Omega_1, \text{ если } \frac{M_1}{M} \geq \frac{M_2}{M}; \\ x \in \Omega_2, \text{ если } \frac{M_1}{M} < \frac{M_2}{M}, \end{cases}$$

где M_j , $j=1, 2$ — число „решений“, которые принимают „члены коллектива“ о принадлежности объекта с набором признаков x в пользу j -го класса.

Результаты вычислительного эксперимента. Анализ результатов вычислительного эксперимента подтверждает преимущество в условиях малых выборок исследуемого классификатора по сравнению с традиционным непараметрическим алгоритмом распознавания образов. Достаточно конечного числа имитаций m в β -окрестности ситуаций исходной обучающей выборки для значительного снижения ошибки классификации. Подтверждено наличие порогового значения m , что согласуется с аналитическим результатом (8).

Обнаруженную закономерность можно объяснить, если учесть, что выражение (1) является непараметрической оценкой смеси плотностей вероятности $p_i(\bar{x})$, $i=1, n$. Каждая составляющая $p_i(\bar{x})$ определена на β -окрестности исходной ситуации x^i и восстанавливается по данным $V_j = (x^i + \bar{x}^j, j=1, \bar{m})$. Очевидно, что при малых значениях m информации выборки V_j явно недостаточно для оценивания $p_i(\bar{x})$, поэтому закон распределения x в классах, представленных исходными данными, искажается. Следовательно, в области малых значений m преимущество предлагаемого непараметрического классификатора не наблюдается.

Установлено наличие минимума зависимости оценки вероятности ошибки распознавания образов от значения β -окрестности процедуры генерирования искусственной обучающей выборки. Данный факт согласуется с аналитическим выводом (6), полученным при анализе асимптотического выражения среднего квадратического отклонения (5) непараметрической оценки плотности вероятности $\bar{p}(x)$ от $p(x)$.

Результаты вычислительного эксперимента подтверждают, что значение параметра β должно обеспечивать полное покрытие β -окрестностями области определения классов при их минимальном взаимном пересечении.

Увеличение объема исходных данных на основе принципов имитационного моделирования является эффективным средством решения задач классификации в условиях малых обучающих выборок. Получаемые при этом непараметрические алгоритмы распознавания образов обеспечивают существенное снижение ошибки распознавания на контрольных выборках по сравнению с традиционным классификатором ядерного типа.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ № НШ-3431.2008.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапко В. А., Капустин А. Н. Синтез нелинейных непараметрических коллективов решающих правил в задачах распознавания образов // *Автометрия*. 2006. № 6. С. 26—34.
2. Лапко В. А. Синтез и анализ непараметрических моделей коллективного типа // *Автометрия*. 2001. № 6. С. 98—106.
3. Ивахненко А. Г., Чаинская В. А., Ивахненко Н. А. Непараметрический комбинаторный алгоритм МГУА на операторах поиска аналогов // *Автоматика*. 1990. № 5. С. 14—27.
4. Деврой Л., Дьерфи Л. Непараметрическое оценивание плотности (L_1 -подход). М.: Мир, 1988. 407 с.
5. Лапко А. В., Лапко В. А., Соколов М. И., Ченцов С. В. Непараметрические системы классификации. Новосибирск: Наука, 2000. 240 с.
6. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // *Теория вероятности и ее применения*. 1969. Т. 14, вып. 1. С. 156—161.
7. Лапко А. В., Ченцов С. В., Крохов С. И., Фельдман Л. А. Обучающиеся системы обработки информации и принятия решений. Новосибирск: Наука, 1996. 296 с.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

УДК 519.95

М. И. СОКОЛОВ

*Сибирский федеральный университет
Железногорский филиал*

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ РЕГРЕССИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОПУСКА ДАННЫХ

С использованием принципов имитации систем и коллективного оценивания разработаны непараметрические модели восстановления стохастических зависимостей в условиях пропуска данных путем „размножения“ строк на основе их аналогов из исходной таблицы „объект—признак“ с последующим синтезом непараметрической регрессии.

Одной из проблем теории обучающихся систем является обработка массивов данных с пропусками. В этих условиях перед исследователем возникает дилемма — исключение информации с пропусками или их заполнение, решать которую необходимо исходя из имеющихся объективных предпосылок.

В первом случае теряется полезная информация, содержащаяся в остальных позициях строки таблицы „объект—признак“, и возрастают материальные затраты на их получение. Основным путем решения проблемы недостающих данных является их восстановление в соответствии с закономерностями, определяющими взаимосвязь между признаками исходной выборки данных. Наиболее известны локальные алгоритмы заполнения пропусков исходной

некомплектной таблицы „объект—признак“, основанные на оценивании зависимостей между ее строками и столбцами в ограниченной окрестности анализируемого элемента [1].

В предлагаемом в настоящей статье подходе преобразование исходной информации заменяется процедурой „размножения“ строк с пропусками данных на основе принципов имитации систем, что позволяет обойти проблему искажений априорных сведений за счет неточности используемых моделей и субъективных предположений исследователя. Возникающая при этом естественная неоднородность получаемых данных (наличие в преобразованной таблице строк с пропусками и без них) требует разработки модифицированных непараметрических алгоритмов обработки информации. Для этой цели используются совокупности решающих правил, позволяющие учитывать особенности обрабатываемой информации.

Имитационный метод заполнения пропусков данных. Пусть при восстановлении однозначной стохастической зависимости

$$y = \varphi(x), \quad x \in R^k, \quad y \in R^1 \quad (1)$$

имеется выборка $V = (x^i, y^i, i = \overline{1, n})$, составленная из статистически независимых наблюдений переменных x, y с неизвестной плотностью вероятности $p(x, y)$.

В выборке V часть данных с номерами $i \in I_{\Pi} \subset I = [i = \overline{1, n}]$ имеет пропуски некоторых значений (x_1^i, \dots, x_k^i) . Обозначим через J^i множество номеров этих признаков, $J = [\gamma = \overline{1, k}]$.

Идея предлагаемого подхода заключается в поиске m -аналогов для каждой строки выборки V с номером $i \in I_{\Pi}$ в пространстве переменных $(x_{\gamma}, \gamma \in J \setminus J^i, y)$ с последующим использованием их информации в процессе „размножения“ строки с пропусками данных, что предполагает выполнение следующих действий.

1. Выбор строки с номером $i \in I_{\Pi}$ и определение показателей ее близости $d_{ij}(x_{\gamma}, \gamma \in J \setminus J^i, y)$ со строками $j \in I \setminus I_{\Pi}$ выборки V в пространстве переменных $(x_{\gamma}, \gamma \in J \setminus J^i, y)$.

В качестве показателя близости может быть принято, например, евклидово расстояние:

$$d_{ij}(x_{\gamma}, \gamma \in J \setminus J^i, y) = \left[\sum_{\gamma \in J \setminus J^i} (x_{\gamma}^i - x_{\gamma}^j)^2 + (y^i - y^j)^2 \right]^{1/2}.$$

2. Ранжирование значений $d_{ij}(x_{\gamma}, \gamma \in J \setminus J^i, y)$, $j \in I \setminus I_{\Pi}$ по их возрастанию. Строки (x^j, y^j) , $j \in I_a \subset I \setminus I_{\Pi}$, $|I_a| = m$ обучающей выборки, соответствующие первым m элементам ранжированного ряда $\{d_{ij}(x_{\gamma}, \gamma \in J \setminus J^i, y)\}$, будем называть аналогами i -й строки с пропусками.

3. Выполнение операции „размножения“ i -й строки на m новых строк $(x_v^i, v \in J \setminus J^i, x_v^j, v \in J^i, y^i)$, $j \in I_a$, каждая из которых повторяет информацию i -й строки, а пробелы заполняются значениями соответствующих переменных $x_v^j, v \in J^i$ из строк аналогов.

4. Повторение действий 1—3 для каждой строки с пропусками, т.е. для строк с номерами $i \in I_{\Pi}$.

В результате получим преобразованную выборку $V_1 = (x^i, y^i, i \in I \setminus I_{\Pi}, x^i, y^i, i \in I_3)$, где I_3 — множество номеров строк с заполненными пробелами.

Если n_{Π} — количество строк с пропусками данных в исходной выборке V , то количество элементов множества $I_3 = n_{\Pi} m$, а общий объем выборки $V_1 = n + n_{\Pi}(m-1)$.

Непараметрические модели восстановления стохастических зависимостей. Наличие выборки $V_1 = (x^i, y^i, i = \overline{1, n + n_{\Pi}(m-1)})$ объясняет желание исследователя использовать для восстановления стохастической зависимости (1) традиционную непараметрическую регрессию

$$\bar{y}(x) = \sum_{i=1}^{n+n_{\Pi}(m-1)} y^i \beta(x^i), \quad (2)$$

где

$$\beta(x^i) = \frac{\prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v}\right)}{\sum_{i=1}^{n+n_{\Pi}(m-1)} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v}\right)},$$

$\Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v}\right)$ — положительные, симметричные и нормированные ядерные функции [2]. Однако неоднородность выборки V_1 и различная информационная ценность ее составляющих ставят под сомнение целесообразность использования модели типа (2).

Будем различать в выборке V_1 строки без пропусков $(x^i, y^i, i \in I \setminus I_{\Pi})$, с малым их количеством $(x^i, y^i, i \in I_3^1)$, средним — $(x^i, y^i, i \in I_3^2)$ и большим — $(x^i, y^i, i \in I_3^3)$, причем $I_3 = I_3^1 \cup I_3^2 \cup I_3^3$. Тогда появляется возможность с использованием принципов коллективного оценивания построить модель типа

$$\bar{y}(x) = \sum_{j=0}^3 \alpha_j \bar{\varphi}_j(x), \quad \sum_{j=0}^3 \alpha_j = 1, \quad (3)$$

где

$$\bar{\varphi}_0(x) = \frac{\sum_{j \in I \setminus I_{\Pi}} y^j \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^j}{c_v}\right)}{\sum_{j \in I \setminus I_{\Pi}} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^j}{c_v}\right)}, \quad \bar{\varphi}_j(x) = \sum_{i \in I_3^j} y^i \beta_1(x^i), \quad j = \overline{1, 3}, \quad (4)$$

$$\beta_1(x^i) = \frac{\prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v}\right)}{\sum_{j \in I_3^j} \prod_{v=1}^k \Phi\left(\frac{x_v - x_v^j}{c_v}\right)}.$$

Оптимизация непараметрической модели в основном сводится к выбору коэффициентов размытости $c_v, v = \overline{1, k}$, ядерных функций и параметров α совокупности решающих правил. При этом информация $(x^i, y^i, i \in I \setminus I_{\Pi})$, содержащаяся в данных без пропусков, пользуется преимущественным доверием.

Поэтому эмпирический критерий точности аппроксимации целесообразно формировать на этой основе

$$\bar{W} = \frac{1}{|I \setminus I_{\Pi}|} \sum_{i \in I \setminus I_{\Pi}} (y^i - \bar{y}(x^i))^2. \quad (5)$$

Непараметрические модели допускают упрощение задачи оптимизации по коэффициентам размытости за счет введения допущения $c_v = c \bar{\sigma}_v$, $v = \overline{1, k}$, где $\bar{\sigma}_v$ — статистическая оценка среднего квадратичного отклонения переменной x_v , $v = \overline{1, k}$, вычисляемые по выборке x_v^i , $v = \overline{1, k}$, $i \in I \setminus I_{\Pi}$.

Выбор параметров α_j , $j = \overline{0, 2}$ в модели (3) может быть осуществлен последовательно по следующей методике:

— построить коллектив для второй и третьей группы данных выборки V_1

$$\bar{\varphi}_{23}(x, \bar{\alpha}_2) = \bar{\alpha}_2 \bar{\varphi}_2(x) + (1 - \bar{\alpha}_2) \bar{\varphi}_3(x), \quad (6)$$

где параметр $\bar{\alpha}_2$ обеспечивает минимум критерия (5);

— по аналогии с пунктом 1 осуществить синтез выражения

$$\bar{\varphi}_{1-3}(x, \bar{\alpha}_2, \bar{\alpha}_1) = \bar{\alpha}_1 \bar{\varphi}_1(x) + (1 - \bar{\alpha}_1) \bar{\varphi}_{23}(x); \quad (7)$$

— используя модели (6), (7), построить интегрированную модель

$$\bar{\varphi}_{0-3}(x, \bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2) = \bar{\alpha}_0 \bar{\varphi}_0(x) + (1 - \bar{\alpha}_0) [\bar{\alpha}_1 \bar{\varphi}_1(x) + (1 - \bar{\alpha}_1) \bar{\alpha}_2 \bar{\varphi}_2(x) + (1 - \bar{\alpha}_1)(1 - \bar{\alpha}_2) \bar{\varphi}_3(x)],$$

в которой параметры $\bar{\alpha}_0, \bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2$ последовательно находятся из условия минимума критерия (5).

Асимптотические свойства непараметрической модели. Для упрощения доказательства без существенной потери общности получаемых выводов примем модель (3) в виде

$$\bar{y}(x) = \alpha \bar{y}_1(x) + (1 - \alpha) \bar{y}_2(x) \quad \forall x \in R^2, \quad (8)$$

где

$$\bar{y}_1(x) = \frac{1}{n_1 p(x_1, x_2) c_1 c_2} \sum_{i=1}^{n_1} y^i \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_1}\right) \Phi\left(\frac{x_2 - x_2^i}{c_2}\right),$$

$$\bar{y}_2(x) = \frac{1}{n_2 p(x_1, x_2) c_1 c_2} \sum_{i=n_1+1}^n y^i \Phi\left(\frac{x_1 - x_1^i}{c_1}\right) \Phi\left(\frac{x_2 - x_2^i}{c_2}\right)$$

— непараметрические регрессии, построенные по выборке данных без пропусков $V_1 = (x^i, y^i, i = \overline{1, n_1})$ и с пропусками $V_2 = (\bar{x}_1^i, x_2^i, y^i, i = \overline{n_1+1, n})$.

Элементы выборки V_2 формируются на основе имитационного метода заполнения пропусков значений переменной x_1 .

Предположим, что некоторая функция $\psi(u)$ ограничена и непрерывна со всеми своими производными до порядка t включительно. Эти условия, накладываемые на $\psi(u)$, обозначим через G_m , тогда справедлива следующая теорема.

Теорема. Пусть

1) $\varphi(x)$, $p(x, y)$ и $p(x) \quad \forall x \in R^2$ в области определения восстанавливаемой зависимости $y = \varphi(x)$ удовлетворяют условиям G_2 ;

2) погрешности ε имитационного метода заполнения пропусков являются случайными $\bar{x}_1 = x_1 + \varepsilon$ с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией $M\varepsilon^2 = \sigma^2(n)$, зависящей от объема обучающей выборки;

3) ядерные функции $\Phi(u)$ являются положительными, симметричными и нормированными при $\int u^m \Phi(u) du < \infty \quad \forall m < \infty$;

4) последовательности $c_v = c_v(n_v) \rightarrow \infty$ при $n_v \rightarrow \infty$, а $n_v c_1 c_2 \rightarrow \infty, v=1, 2$;

5) дисперсия погрешности метода $\sigma^2(n) \rightarrow 0$ при $n = (n_1 + n_2) \rightarrow \infty$.

Тогда смещение модели (8) имеет вид

$$\begin{aligned}
 M(\bar{y}(x) - \varphi(x_1, x_2)) = & \frac{c_1^2}{2p(x_1, x_2)} \left(\varphi(x_1, x_2) p_1^{(2)}(x_1, x_2) + 2\varphi_1^{(1)}(x_1, x_2) p_1^{(1)}(x_1, x_2) + \right. \\
 & \left. + \varphi_1^{(2)}(x_1, x_2) p(x_1, x_2) \right) + \frac{c_2^2}{2p(x_1, x_2)} \left(\varphi(x_1, x_2) p_2^{(2)}(x_1, x_2) + 2 p_2^{(1)}(x_1, x_2) \varphi_2^{(1)}(x_1, x_2) + \right. \\
 & \left. + \varphi_2^{(2)}(x_1, x_2) p(x_1, x_2) \right) + \frac{3c_1^2(1-\alpha)\sigma^2}{2p(x_1, x_2)} \varphi_1^{(2)}(x_1, x_2) p_1^{(2)}(x_1, x_2) + \\
 & + \frac{c_2^2(1-\alpha)\sigma^2}{4p(x_1, x_2)} \left(\varphi_1^{(2)}(x_1, x_2) p_2^{(2)}(x_1, x_2) + \varphi_2^{(2)}(x_1, x_2) p_1^{(2)}(x_1, x_2) \right) + \\
 & + \frac{(1-\alpha)\sigma^2}{2p(x_1, x_2)} \left(p_1^{(2)}(x_1, x_2) \varphi(x_1, x_2) + 2\varphi_1^{(1)}(x_1, x_2) p_1^1(x_1, x_2) + \varphi_1^{(2)}(x_1, x_2) p(x_1, x_2) \right) + \\
 & + \frac{M\varepsilon^4(1-\alpha)}{4p(x_1, x_2)} \varphi_1^{(2)}(x_1, x_2) p_1^{(2)}(x_1, x_2) + O(c_1^4, c_2^4, c_1^2 c_2^2), \tag{9}
 \end{aligned}$$

а среднее квадратическое отклонение

$$M(y(x) - \bar{y}(x))^2 \leq \left(\alpha \left[M(y(x) - \bar{y}_1(x))^2 \right]^{1/2} + (1-\alpha) \left[M(y(x) - \bar{y}_2(x))^2 \right]^{1/2} \right)^2, \tag{10}$$

где

$$\begin{aligned}
 M(y(x) - \bar{y}_1(x))^2 = & M \bar{y}_1^2(x) - 2y(x) M \bar{y}_1(x) + y^2(x) \sim \\
 \sim & \frac{\varphi^2(x_1, x_2) \left(\|\Phi(u)\|^2 \right)^2}{n_1 p(x_1, x_2) c_1 c_2} + \frac{1}{4p^2(x_1, x_2)} \left[c_1^2 (\varphi(x_1, x_2) p(x_1, x_2))_1^{(2)} + c_2^2 (\varphi(x_1, x_2) p(x_1, x_2))_2^{(2)} \right]^2 + \\
 & + O(c_1^4, c_2^4, c_1^2 c_2^2) + O\left(\frac{1}{n_1}\right), \tag{11}
 \end{aligned}$$

$$M(y(x) - \bar{y}_2(x))^2 \sim$$

$$\begin{aligned}
 \sim & \frac{\varphi^2(x_1, x_2) \left(\|\Phi(u)\|^2 \right)^2}{n_2 p(x_1, x_2) c_1 c_2} + \left[\frac{(c_1^2 + \sigma^2)}{2p(x_1, x_2)} (\varphi(x_1, x_2) p(x_1, x_2))_1^{(2)} + \frac{c_2^2}{2p(x_1, x_2)} (\varphi(x_1, x_2) p(x_1, x_2))_2^{(2)} + \right. \\
 & \left. + \sigma^2 \left(\frac{3c_1^2}{2p(x_1, x_2)} \varphi_1^{(2)}(x_1, x_2) p_1^{(2)}(x_1, x_2) + \right. \right.
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{c_2^2}{4p(x_1, x_2)} \left(\varphi_1^{(2)}(x_1, x_2) p_2^{(2)}(x_1, x_2) + \varphi_2^{(2)}(x_1, x_2) p_1^{(2)}(x_1, x_2) \right) \Bigg]^2. \quad (12)$$

Здесь $\varphi(x_1, x_2) = \int y p\left(\frac{y}{x_1 x_2}\right) dy$ — оптимальное решающее правило в смысле минимума среднего квадратического критерия; $p_v^{(t)}(x_1, x_2)$, $\varphi_v^{(t)}(x_1, x_2)$ — t -е производные функций $p(x_1, x_2)$, $\varphi(x_1, x_2)$ по v -й компоненте вектора $x = (x_1, x_2)$.

Из анализа выражения (9) следует, что выражение (8) обладает свойством асимптотической несмещенности, если при $n_1 \rightarrow \infty$ и $n_2 \rightarrow \infty$ параметры размытости ядерной функции $c_1 \rightarrow 0$ и $c_2 \rightarrow 0$, а дисперсия σ^2 и $M\varepsilon^4$ погрешности метода заполнения пропусков близки к нулю.

Если закон распределения случайных величин (x_1, x_2) является равномерным, то смещение определяется выражением $\frac{(1-\alpha)\sigma^2}{2} \varphi_1^{(2)}(x_1, x_2)$. Поэтому в случае линейного характера полинома $\varphi(x_1, x_2)$ относительно переменной x_1 , которой в обучающей выборке свойственны пропуски, смещения можно избежать.

Нелинейность восстанавливаемой зависимости по переменным, имеющим пропуски в исходных данных, приводит к появлению смещения ее оценки. Причем величина смещения зависит от метода заполнения пропусков в исходных данных и может быть компенсирована за счет особенностей структуры коллектива (8) — выбора параметра α из условия минимума эмпирической ошибки аппроксимации.

Подставим асимптотические выражения (11), (12) в соотношение (10). Из его анализа следует, что при выполнении условий 4 и 5 теоремы верхняя граница среднего квадратического отклонения (10) стремится к нулю.

Если дисперсия σ является конечной, т.е. не выполняется условие 5 теоремы, то минимальное значение (10) соответствует

$$\frac{(1-\alpha)^2 \sigma^4}{4 p^2(x_1, x_2)} \left[\left(\varphi(x_1, x_2) p(x_1, x_2) \right)_1^{(2)} \right]^2.$$

Тогда сходимость в среднем квадратическом отклонении наблюдается только при наличии линейного преобразования заполненных данных в обучающей выборке, когда соблюдается условие $\varphi_1^{(2)}(x_1, x_2) = 0$.

Анализ некомплектных таблиц „объект—признак“ сопряжен не только с решением проблем заполнения имеющихся пропусков в данных, но и с созданием адекватных алгоритмов обработки получаемых при этом неоднородных обучающих выборок. Идея предлагаемого подхода состоит в дублировании строк с пропусками исходной таблицы и их заполнении соответствующими данными строк-аналогов, что позволяет избежать традиционного этапа восстановления пропусков на основе специальных моделей. Затем производятся декомпозиция полученной неоднородной обучающей выборки на части, из которых формируется семейство непараметрических регрессий. Объединение последних в обобщенную модель, которая обладает свойствами асимптотической несмещенности и состоятельности, если дисперсия погрешности метода заполнения пропусков с ростом объема обучающей выборки стремится к нулю либо если искомая зависимость является линейной относительно ее признаков, имеющих пропуски данных. При нарушении указанных условий существует возможность частичной компенсации смещений за счет оптимизации предлагаемой совокупности непара-

метрических регрессий. Полученные выводы являются общими и не зависят от используемого метода заполнения пропусков в исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск, 1999. 270 с.
2. Лапко А. В., Лапко В. А., Соколов М. И., Ченцов С. В. Непараметрические модели коллективного типа. Новосибирск: Наука, 2000. 144 с.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

УДК 681.5.015

А. И. РУБАН

*Сибирский федеральный университет
Красноярск*

МОДУЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНЫХ СТАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТОХАСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены модульные характеристики, определяющие качество нелинейных статических моделей стохастических объектов, на их основе построены коэффициенты близости между медианной моделью (оптимальной моделью в смысле минимума среднего модульного отклонения выходов объекта и модели) и субоптимальными медианными параметрическими статическими моделями стохастических объектов. По коэффициентам близости можно отслеживать изменение качества параметрических моделей при подборе их структуры.

Введение. Рассмотрим стохастический объект, который имеет один вход и один выход. X и Y — непрерывные входная и выходная случайные величины. Идеализированными моделями стохастического объекта являются условные статистические характеристики. Особое место среди них занимает регрессия — зависимость средних значений между выходом и входом объекта [1, 2]:

$$M\{Y|x\} \equiv \eta(x) = \int_{-\infty}^{\infty} y f(y|x) dy, \quad (1)$$

где $M\{Y|x\}$ — условное математическое ожидание.

Для фиксированного значения входа $X=x$ регрессия удовлетворяет критерию минимума среднего условного квадратического отклонения:

$$I_1(x) = M_Y \{(Y - \bar{\eta})^2 | X=x\} = \min_{\bar{\eta}}. \quad (2)$$

Наименьшее значение параметра $I_1(x)$ обозначим через

$$D_1(x) = M_Y \{[Y - \eta(x)]^2 | X=x\} \equiv D\{Y|x\}. \quad (3)$$

Здесь $D_1(x) \equiv D\{Y|x\}$ — условная дисперсия выхода объекта.

Минимума достигает и усредненное (по X) значение условной дисперсии

$$D_1 \equiv D\{Y|X\} = M_X \{D_1(X)\} = M_{Y,X} \{(Y - \eta(X))^2\}, \quad (4)$$

т.е.

$$\eta(X) = \arg \min_{\bar{\eta}(X)} M_{Y,X} \{ (Y - \bar{\eta}(X))^2 \}. \quad (5)$$

В работах [1, 2] D_1 названа средней условной дисперсией, там же введено понятие средней дисперсии регрессии:

$$D_2 \equiv D\{\eta(X)\} = M_X \{ (\eta(X) - m_Y)^2 \}. \quad (6)$$

Известна теорема о разложении дисперсии выхода объекта $D\{Y\} \equiv D_Y$ на сумму дисперсий D_1 и D_2 :

$$D_Y = D_1 + D_2. \quad (7)$$

Смысл составляющих в равенстве (7) следующий: средняя дисперсия регрессии D_2 характеризует ту часть флуктуаций выхода объекта Y , которая вызвана влиянием входной переменной X , и это влияние описано с помощью модели — регрессии. Средняя условная дисперсия D_1 определяется влиянием на выход всех остальных переменных объекта, кроме X , т.е. дисперсия D_1 характеризует степень неопределенности математического описания объекта. Если объект полностью описан регрессионной зависимостью $\eta(X)$ (т.е. нет дополнительных воздействий на объект и нет дополнительной стохастичности внутри объекта; в этом случае $Y = \eta(X)$), то $D_1 = 0$ и $D_2 = D_Y$. Если объект никак не описан регрессией $\eta(X)$, то $D_1 = D\{Y\}$ и одновременно $D_2 = 0$.

Ранее было указано, что для модели в виде регрессии $\eta(X)$ средняя условная дисперсия D_1 достигает минимального значения. Тогда из равенства (7) следует, что средняя дисперсия регрессии D_2 достигает своего максимального значения.

На основе дисперсии условного математического ожидания D_2 построено [1, 2] дисперсионное отношение

$$\eta_{Y|X} = \sqrt{\frac{DM\{Y|X\}}{D_Y}} = \sqrt{\frac{D_2}{D_Y}}, \quad (8)$$

значение которого находится в интервале $[0; 1]$.

Дисперсионное отношение $\eta_{Y|X}$ достигает предельных значений в следующих случаях:

— $\eta_{Y|X} = 0$, если выход объекта Y не зависит от входа X . Обратное утверждение верно не всегда;

— $\eta_{Y|X} = 1$, если Y и X связаны жесткой зависимостью в виде функции $Y = \varphi(X)$. Тогда $M\{Y|X\} = \varphi(X)$. В этом случае другие воздействия (кроме X) не влияют на выход Y и $D_1 = 0$ (т.е. $D_2 = D_Y$).

В работах [3—5] на основе использования непараметрической оценки Розенблатта—Парзена для плотности распределения вероятностей построены сравнительно простые и эффективные оценки дисперсионных характеристик: условной дисперсии выхода объекта $D_1(x) \equiv D\{Y|x\}$, средней условной дисперсии $D_1 = M_X \{D_1(X)\}$, средней дисперсии регрессии $D_2 = M_X \{(\eta(X) - m_Y)^2\}$, дисперсионного отношения $\eta_{Y|X}$, коэффициента степени нелинейности объекта.

В статье [6] введены аналогичные вышеуказанным дисперсионные характеристики для субоптимальных (в соответствии с критерием минимума среднего квадратичного отклонения

выходов объекта и модели) параметрических нелинейных моделей $\hat{Y} = \alpha_0 + \sum_{j=1}^m \alpha_j \varphi_j(X)$,

$\hat{Y} = \alpha_0 + \mu(\mathbf{a}, X)$, и на основе дисперсионных характеристик построен коэффициент близости параметрических моделей и регрессии. При оценивании этих статистических характеристик применимы результаты работ [3—5].

Постановка задачи. При разработке моделей объектов стремятся построить субоптимальные параметрические линейные и нелинейные модели. Изменение критерия (2), (5) позволяет получить другие (в отличие от регрессии) модели, которые более слабо реагируют (т. е. являются робастными) на нежелательные изменения условной плотности распределения $f(y|x)$. Применение вместо квадратического (2), (6) модульного критерия оптимальности [7] приводит к медианной модели. Оценки для медианной модели, построенные по экспериментальным данным, обладают (по сравнению с оценками регрессии) свойством робастности по отношению к малой доле аномальных измерений выхода.

Целью предлагаемой работы является построение соответствующих идеализированных модульных характеристик, которые характеризуют качество получаемых параметрических субоптимальных параметрических моделей по отношению к оптимальной медианной модели.

Медианная модель. Для каждого фиксированного значения входа $X = x$ медианная модель $\mu(x)$ удовлетворяет критерию минимума условного среднего модульного отклонения:

$$I_{1,\mu}(x) = M_Y \{|Y - \bar{\mu}| | X = x\} = \min_{\bar{\mu}} \quad (9)$$

Убедимся в этом. Из необходимого условия минимума показателя $I_{1,\mu}(x)$

$$\frac{d I_{1,\mu}(x)}{d \bar{\mu}} = -M_Y \{[\text{sgn}(Y - \bar{\mu})] | X = x\} = 0$$

получим решение в виде условной медианы:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{sgn}(y - \mu) f(y|x) dy = 0, \quad - \int_{-\infty}^{\mu} f(y|x) dy + \int_{\mu}^{\infty} f(y|x) dy = 0,$$

$$\int_{-\infty}^{\mu} f(y|x) dy = \int_{\mu}^{\infty} f(y|x) dy = \frac{1}{2}.$$

Здесь $\text{sgn } z$ — знаковая функция, при этом учитывается условие нормировки для плотности распределения вероятности $f(y|x)$.

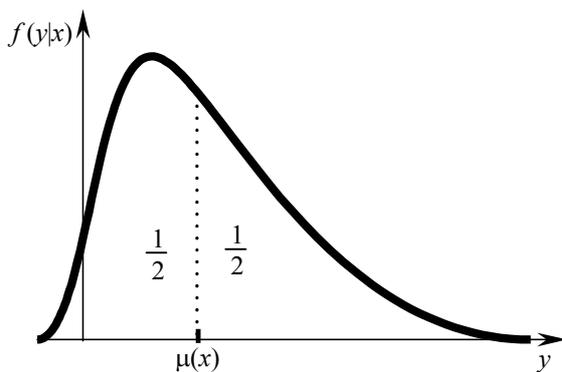


Рис. 1

Для фиксированного значения $X = x$ на рис. 1 приведены условная плотность распределения выхода $f(y|x)$ и значение медианы $\mu(x)$ — среднего по вероятности значения.

Убедимся в слабом влиянии на значение условной медианы $\mu(x)$ слабых изменений условной плотности $f(y|x)$ при сильном влиянии их на значение регрессии $\eta(x)$ (условного математического ожидания).

Считаем, что $f(y|x)$ состоит из двух компонент (первая часть — основная, вторая — аномальная)

$$f(y|x) = (1 - \alpha) f_1(y|x) + \alpha f_2(y|x).$$

Здесь α — вероятность появления аномальной компоненты (она мала и обычно не превышает 0,1).

Местоположение (например, условное математическое ожидание $\eta_2(x)$) аномальной компоненты находится на сравнительно большом удалении δ от основной, т.е. $\eta_2(x) = \eta_1(x) + \delta$:

$$M\{Y|x\} = \eta(x) = (1-\alpha)\eta_1(x) + \alpha\eta_2(x) = (1-\alpha)\eta_1(x) + \alpha[\eta_1(x) + \delta] = \eta_1(x) + \alpha\delta.$$

При неизменной вероятности α с ростом δ регрессия $\eta(x)$ нарастает, а медиана $\mu(x)$ не изменяет своего значения. Она робастна (рис. 2) по отношению к указанной аномалии в условном законе распределения.

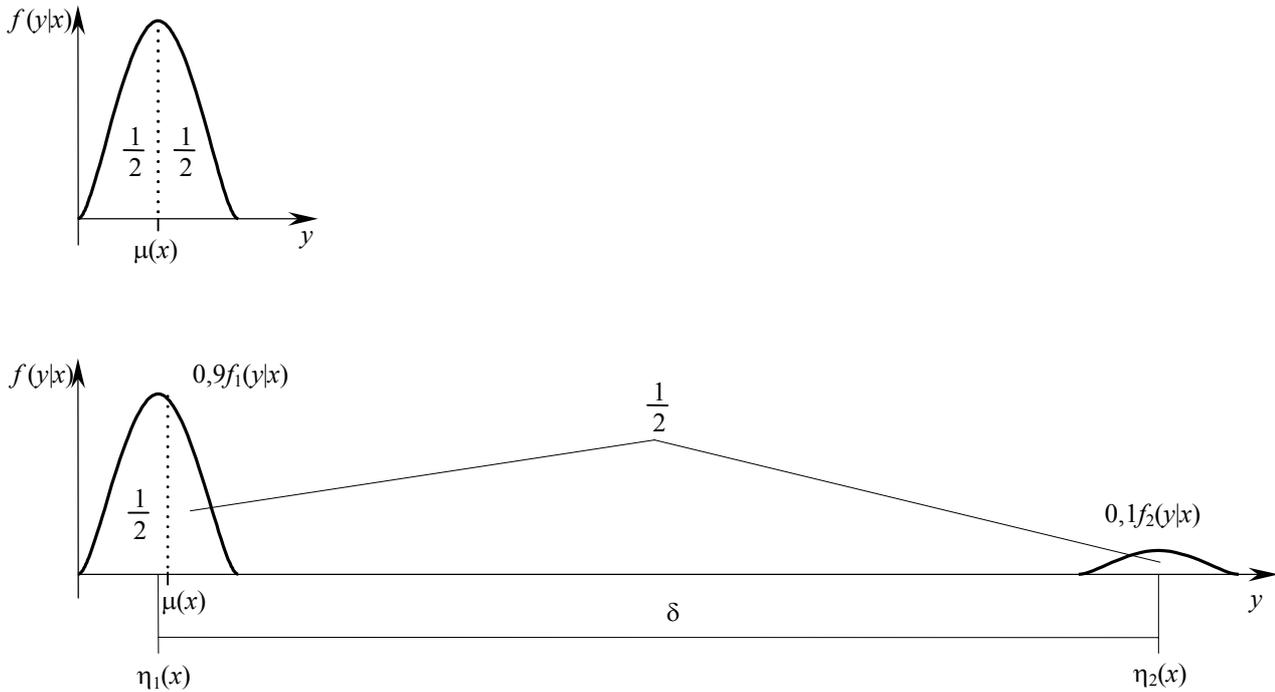


Рис. 2

В верхней части рис. 2 представлено исходное симметричное распределение $f(y|x)$, при этом $\eta(x) = \mu(x)$. В нижней части рисунка показано распределение $f(y|x)$ с основной $(1-\alpha)f_1(y|x)$ и аномальной $\alpha f_2(y|x)$ компонентами при $\alpha = 0,1$; там же отмечены указанные выше характеристики и параметры.

Наименьшее значение $I_{1,\mu}(x)$ обозначим через

$$\Delta_1(x) = M_Y \{|Y - \mu(x)| | X = x\}. \quad (10)$$

Этот показатель является аналогом $\sigma_1(x) = \sqrt{D_1(x)} \equiv \sqrt{D\{Y|x\}}$ при рассмотрении регрессии.

Для медианной модели $\mu(x)$ своего наименьшего значения достигает и усредненное (по X) условное модульное отклонение (10)

$$\Delta_1 = M_X \{\Delta_1(X)\} = M_{Y,X} \{|Y - \mu(X)|\}, \quad (11)$$

т.е.

$$\mu(X) = \arg \min_{\bar{\mu}(X)} M_{Y,X} \{|Y - \bar{\mu}(X)|\}. \quad (12)$$

Параметр Δ_1 представляет собой среднее модульное отклонение выхода объекта и условной медианы (медианной модели). Можно (как и ранее при использовании регрессии и дисперсионных функций) ввести среднее модульное отклонение условной медианы и медианы выхода:

$$\Delta_2 = M_X \{ |\mu(X) - \mu_Y| \}. \quad (13)$$

Введем Δ_Y — среднее модульное отклонение выхода объекта и медианы μ_Y , которое является аналогом среднего квадратического отклонения $\sigma_Y = \sqrt{D_Y}$:

$$\Delta_Y = M_Y \{ |Y - \mu_Y| \}. \quad (14)$$

В дальнейшем для упрощения записи формул убираем индексы операторов усреднения (математического ожидания) $M\{\}$, где указаны случайные величины, по которым ведется усреднение.

Для квадратов модульных характеристик $\Delta_Y, \Delta_1, \Delta_2$ справедливо равенство, аналогичное (7),

$$\Delta_Y^2 = \Delta_1^2 + \Delta_2^2. \quad (15)$$

↓ Докажем его.

На рис. 3 в линейном пространстве представлена проекция вектора $Y - \mu_Y$ на плоскость моделей $\bar{\mu}(X) - \mu_Y$. Результатом проекции является вектор $\mu(X) - \mu_Y$. Разность между этими векторами есть вектор $Y - \mu(X)$. Длина

$$\rho(Y, \mu(X)) = M \{ |Y - \mu(X)| \} \equiv \Delta_1 \quad (16)$$

этого вектора минимальна (12):

$$\mu(X) = \arg \min_{\bar{\mu}(X)} M \{ |Y - \bar{\mu}(X)| \}.$$

Здесь $\mu(X)$ — оптимальная модель. Для прямоугольного треугольника верна теорема Пифагора: квадрат длины вектора $Y - \mu_Y$ равен сумме квадратов длин векторов $Y - \mu(X)$ и $\mu(X) - \mu_Y$:

$$\rho^2(Y, \mu_Y) = \rho^2(Y, \mu(X)) + \rho^2(\mu(X), \mu_Y),$$

где $\rho(Y, \mu_Y) = M \{ |Y - \mu_Y| \} \equiv \Delta_Y$, $\rho(\mu(X), \mu_Y) = M \{ |\mu(X) - \mu_Y| \} \equiv \Delta_2$. ↑

Смысл модульных характеристик тот же, что и для соответствующих дисперсионных характеристик, представленных во Введении.

Среднее модульное отклонение условной медианы и медианы выхода Δ_2 характеризует ту часть флуктуаций выхода объекта Y , которая вызвана влиянием входной переменной X , и это влияние описано с помощью модели — условной медианы. Средним модульным отклонением Δ_1 выхода объекта и условной медианы определяется влияние на выход всех остальных переменных объекта, кроме входной X . Таким образом, параметр Δ_1 характеризует степень неопределенности описания объекта. Если объект полностью описан условной медианой $\mu(X)$ (т. е. нет дополнительных воздействий на объект и нет дополнительной стохастичности внутри объекта; в этом случае $Y = \mu(X)$), то $\Delta_1 = 0$ и одновременно $\Delta_2 = \Delta_Y$. Если объект не описан условной медианой $\mu(X)$, то $\Delta_1 = \Delta_Y$ и одновременно $\Delta_2 = 0$.

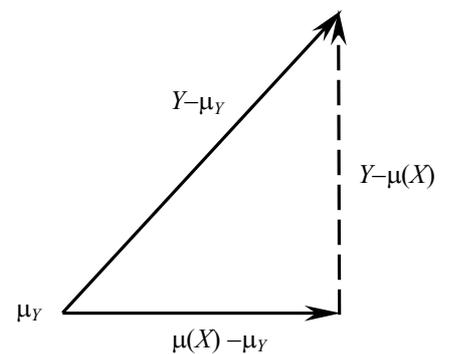


Рис. 3

На основе модульных характеристик Δ_2, Δ_Y строим модульное отношение

$$\mu_{Y|X} = \Delta_2 / \Delta_Y, \quad (17)$$

которое лежит в интервале $[0; 1]$.

Модульное отношение $\mu_{Y|X}$ похоже по своей сути на дисперсионное отношение (8) и достигает предельных значений в тех же случаях; $\mu_{Y|X} = 0$, если выход объекта Y не зависит от входа X , а зависимость отслеживается с помощью условной медианы. Обратное утверждение верно не всегда — $\mu_{Y|X} = 1$, если Y и X связаны жесткой зависимостью в виде функции $Y = \varphi(X)$, тогда $\mu(X) = \varphi(X)$. В этом случае другие воздействия (кроме X) не влияют на выход Y и $\Delta_1 = 0$ (т.е. $\Delta_2 = \Delta_Y$).

Нелинейные медианные параметрические модели. Считаем, что параметрическая нелинейная (по каналу вход—выход и по параметрам) модель объекта имеет вид

$$\hat{Y} = \alpha_0 + \phi(\mathbf{a}, X), \quad \mathbf{a} = (\alpha_1, \dots, \alpha_m). \quad (18)$$

Здесь специально выделены слагаемые α_0 и $\phi(\mathbf{a}, X)$ — в первом всегда отсутствует зависимость от входа X , во втором — всегда присутствует эта зависимость, причем $\phi(\mathbf{a}, 0) = 0$.

Параметры α_0, \mathbf{a} модели (18) также найдены из критерия [см. (12)] минимума среднего модульного отклонения выходов объекта Y и модели $\bar{\alpha}_0 + \phi(\bar{\mathbf{a}}, X)$

$$\alpha_0, \mathbf{a} = \arg \min_{\bar{\alpha}_0, \bar{\mathbf{a}}} M\{|Y - \bar{\alpha}_0 - \phi(\bar{\mathbf{a}}, X)|\}. \quad (19)$$

Модель (18) является оптимальной по параметрам среди моделей выбранной структуры, т. е. это субоптимальная модель. Это название используем, чтобы отличать модель от соответствующей оптимальной модели — условной медианы.

Наименьшее значение минимизируемого в (19) модульного показателя обозначим [см. (11) для оптимальной модели — условной медианы] через

$$\Delta_{1\text{парам}} = M\{|Y - \hat{Y}|\} = M\{|Y - \alpha_0 - \phi(\mathbf{a}, X)|\}. \quad (20)$$

Введем также среднее модульное отклонение субоптимальной параметрической модели (18) и медианы выхода

$$\Delta_{2\text{парам}} = M\{|\hat{Y} - \mu_Y|\} = M\{|\alpha_0 + \phi(\mathbf{a}, X) - \mu_Y|\}. \quad (21)$$

В результате получим выражение, аналогичное (15), связывающее квадраты модульных характеристик $\Delta_Y, \Delta_{1\text{парам}}, \Delta_{2\text{парам}}$:

$$\Delta_Y^2 = \Delta_{1\text{парам}}^2 + \Delta_{2\text{парам}}^2. \quad (22)$$

Как и ранее (17), введем модульное отношение, основанное на использовании субоптимальной модели \hat{Y} (18),

$$\mu_{Y|X\text{парам}} = \frac{\Delta_{2\text{парам}}}{\Delta_Y}, \quad (23)$$

значение которого находится в интервале $[0; 1]$. Для него и модульного отношения (17) справедливо неравенство:

$$\mu_{Y|X\text{парам}} \leq \mu_{Y|X}. \quad (24)$$

↓ Доказательство неравенства (24) основано на том, что при построении оптимальной (условной медианы) и субоптимальной параметрической модели (18) использован один и тот же критерий оптимальности. Применяются также равенства (15), (22).

Во-первых, всегда выполняется неравенство

$$\Delta_1 \equiv M\{|Y - \mu(X)|\} \leq M\{|Y - \hat{Y}|\} \equiv \Delta_{1\text{парам}}, \quad (25)$$

следующее из критерия оптимальности условной медианы $\mu(X)$ в смысле модульного критерия $\mu(X) = \arg \min_{\bar{\mu}(X)} M\{|Y - \bar{\mu}(X)|\}$. Любые другие выбранные зависимости $\bar{\mu}(X)$ от X , в том

числе и параметрические модели $\hat{Y} = \alpha_0 + \phi(\mathbf{a}, X)$ [с оптимальными параметрами α_0, \mathbf{a} , вычисленными из того же модульного критерия оптимальности (19)], не могут уменьшить нижней границы $M\{|Y - \mu(X)|\}$ модульного показателя $M\{|Y - \bar{\mu}(X)|\}$. Модель (18) является только субоптимальной.

Второе неравенство, эквивалентное (24)

$$\Delta_{2\text{парам}} \equiv M\{|\hat{Y} - \mu_Y|\} \leq M\{|\mu(X) - \mu_Y|\} \equiv \Delta_2, \quad (26)$$

следует из предыдущего неравенства с учетом разложений (15), (22) квадрата среднего модульного отклонения выхода объекта и медианы на две квадратичные компоненты. \uparrow

Коэффициент близости субоптимальной параметрической модели $\hat{Y} = \alpha_0 + \phi(\mathbf{a}, X)$ и условной медианы $\mu(X)$ зададим в естественном виде

$$\lambda_{\hat{Y} \leftrightarrow \mu} = \frac{\mu_{Y|X\text{парам}}}{\mu_{Y|X}} \equiv \frac{M\{|\alpha_0 + \phi(\mathbf{a}, X) - \mu_Y|\}}{M\{|\mu(X) - \mu_Y|\}}. \quad (27)$$

Можно также ввести относительный коэффициент корреляции между выбранной субоптимальной параметрической моделью и условной медианой

$$R_{\hat{Y} \leftrightarrow \mu} = \frac{M\{[\hat{Y} - \mu_Y][\mu(X) - \mu_Y]\}}{\sqrt{M\{(\hat{Y} - \mu_Y)^2\}} \sqrt{M\{(\mu(X) - \mu_Y)^2\}}}. \quad (28)$$

Модуль этого коэффициента корреляции $|R_{\hat{Y} \leftrightarrow \mu}|$ по своей сути эквивалентен коэффициенту $\lambda_{\hat{Y} \leftrightarrow \mu}$.

Итоговые соотношения между модульными характеристиками представлены на рис. 4.

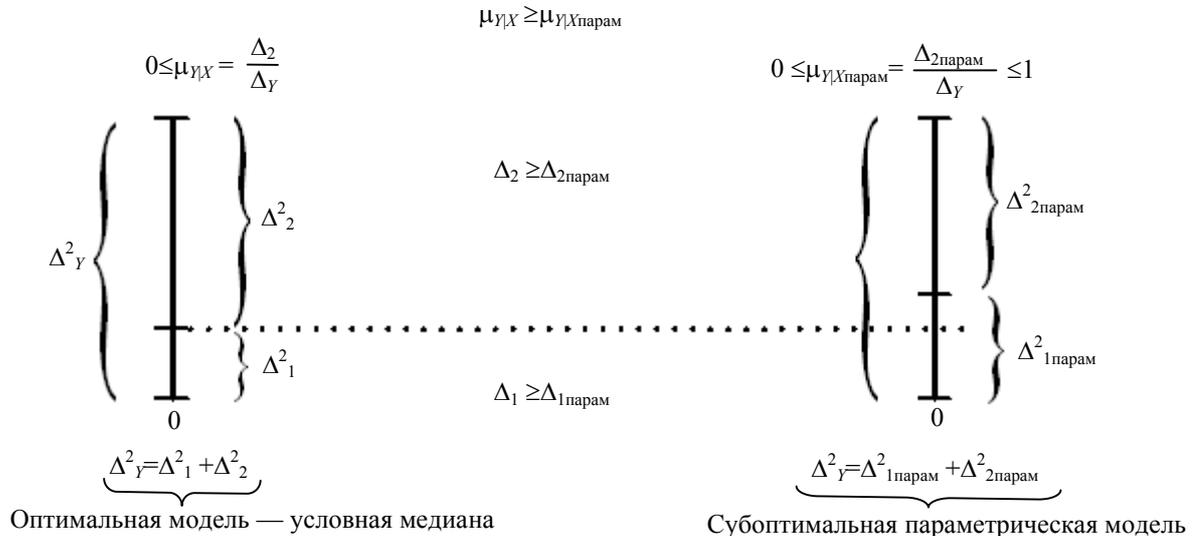


Рис. 4

Заключение. В многомерном случае (когда объект имеет m входов \mathbf{X} и один выход Y) все вышеприведенные модульные характеристики сохраняются. В них лишь следует скалярную случайную величину X заменить на векторную \mathbf{X} .

Для введенных коэффициентов соответствия оптимальной модели в виде условной медианы и субоптимальных параметрических моделей с фиксированной структурой необходимо построить хорошие (состоятельные) оценки. На этом пути получить практически реализуемые результаты удастся за счет использования непараметрической оценки медианной модели [5, § 4.8] с усеченными ядрами и оптимально настроенными коэффициентами размытости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райбман Н. С., Чадеев В. М. Построение моделей процессов производства. М.: Энергия, 1975.
2. Дисперсионная идентификация / Под ред. Н. С. Райбмана. М.: Наука, 1981.
3. Рубан А. И. Непараметрическая дисперсионная идентификация // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1989. № 3. С. 212.
4. Rouban A. I. Nonparametric dispersing identification // Advances in Modeling & Analysis: Series D. Mathematical Tools; General Computer Tools. France: A.M.S.E. 1998. Vol. 1, N 2. P. 43—50.
5. Рубан А. И. Методы анализа данных: Уч. пос. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004.
6. Рубан А. И. Дисперсионные характеристики нелинейных статических моделей стохастических объектов // Информатика и системы управления. Вып. 10. Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: ГУ НИИ информатики и процессов управления, 2004. С. 5—20.
7. Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984.

Рекомендована
НПО ПМ

Поступила в редакцию
12.01.08 г.

РЕФЕРАТЫ

УДК 629.78.051.017.1

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛИТЕЛЬНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ / В. Е. ПАТРАЕВ, Ю. В. МАКСИМОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 5—12.

Рассмотрен комплекс методов поэтапного обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования на этапах проектирования, наземной экспериментальной отработки, летных испытаний и штатной эксплуатации.

Ил. 1, табл. 1, библиогр. 13.

УДК 621.396.6-001.4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОТРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ / А. А. КОВЕЛЬ, С. В. ПОКИДЬКО // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 13—18.

Рассмотрена возможность применения математического планирования эксперимента (МПЭ) на этапе наземной экспериментальной отработки элементов автоматики служебных систем космических аппаратов. Показано, что применение МПЭ позволяет оценить ряд существенных для проектирования, оптимизации, производства показателей устройств (ограничение исследуемых параметров, совместимость устройств в единой структуре, параметрические запасы работоспособности и др.) и расширяет арсенал аналитических и технологических средств инженера.

Ил. 4, библиогр. 8.

УДК 621.396.6-001.4

УСТАНОВЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА / А. А. КОВЕЛЬ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 18—22.

Предложен подход к формированию допусков на параметры электронной аппаратуры по результатам математического планирования эксперимента, расширяющий номенклатуру допусков с учетом внешних воздействий и внутренних факторов.

Ил. 2, библиогр. 9.

УДК 681.586: 621.317.799

ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЕЙ КОНТРОЛЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА / А. И. ГОРНОСТАЕВ, С. А. РЫБАКОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 22—27.

Рассмотрены особенности построения измерительного тракта при контроле разнополярных напряжений нескольких коммутируемых датчиков. Показаны варианты построения измерительного тракта при разбиении общего диапазона измерения на поддиапазоны. Приведен способ формирования калибровочных напряжений для проведения автокалибровок измерительного тракта с помощью микроЭВМ.

Ил. 1, библиогр. 6.

УДК 621.317.743

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПОМЕХ НА ШИНАХ ПИТАНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ / А. И. ГОРНОСТАЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 28—33.

Исследована проблема контроля параметров помех при анализе помеховой обстановки на шинах питания бортовой аппаратуры в служебных системах космического аппарата. Предложен способ решения задачи выделения различных параметров сигналов помех для определения их динамических свойств. Приведен пример практической реализации устройства выделения параметров помех.

Ил. 3, библиогр. 6.

УДК 60:62:167.7

ТЕХНИЧЕСКАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПРИБОРОВ КАК ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА СИСТЕМ / А. А. НОСЕНКОВ, В. И. МЕДВЕДЕВ Е. Н. СУХАРЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 33—37.

Представлены некоторые положения понятийного аппарата и общей теории технической совместимости приборов. Рассмотрена роль технической совместимости в обеспечении качества и эффективности создаваемых систем.

Библиогр. 9.

УДК 002.55

ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ / А. А. НОСЕНКОВ, Р. П. ТУРКЕНИЧ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 37—43.

Рассмотрены этапы становления и развития информационного обеспечения отечественного приборостроения, а также задачи его совершенствования на современном этапе, изложены рекомендации по решению этих задач.

Ил. 4, библиогр. 5.

УДК 629.09:629.78

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОТВОДА / А. А. ЛОГАНОВ, М. И. СОКОЛОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 43—48.

Предложены методы повышения эффективности малорасходных электронасосных агрегатов модуля служебных систем. Проанализированы результаты испытаний различных вариантов таких агрегатов, вводятся соотношения геометрических параметров элементов конструкции, обеспечивающие наибольшую эффективность системы терморегулирования. Повышение эффективности электронасосных агрегатов за счет организации течения жидкости в рабочем колесе позволяет значительно увеличить их ресурс без применения подшипниковых опор повышенной грузоподъемности.

Ил. 3, табл. 1, библиогр. 5.

УДК 621.313

УСТРОЙСТВА ПОВОРОТА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ / В. Л. ГОЛЬДИН, Е. М. КУРБАТОВ, Э. М. ЯМАШЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 49—57.

Рассмотрены состав и конструктивные особенности многих типов устройств поворота солнечных батарей космических аппаратов разработки НПО ПМ, приведены их технические характеристики и структурные схемы. В сравнении с характеристиками аналогичных устройств других отечественных предприятий-изготовителей и зарубежных производителей. Представлены фотографии некоторых устройств поворота солнечных батарей.

Ил. 7, табл. 3.

УДК 621.833:539.4

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В ЗУБЧАТОМ ПЛАНЕТАРНОМ РЕДУКТОРЕ К-Н-V ПРИВОДА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ АНТЕННЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СПУТНИКАМИ СВЯЗИ / В. Н. РАЖИКОВ, Э. М. ЯМАШЕВ, М. В. ИВШИНА // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 57—61.

Представлен метод расчета распределения усилий между зубьями в многопарном зацеплении мелкомодульных зубчатых колес планетарной передачи К-Н-V. Метод основан на использовании специально разработанной стохастической модели. При расчете учитываются геометрия зубчатого зацепления, погрешности изготовления и монтажа зубчатых колес, величина действующего момента и вызываемые им деформации. Результаты расчетов показывают, что усилия среди зубчатых пар распределяются существенно неравномерно и это необходимо учитывать при дальнейшей оценке технических характеристик привода.

Ил. 4, библиогр. 2.

УДК 681.513

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ МАЛЫХ ВЫБОРОК / А. В. ЛАПКО, М. А. ШАРКОВ, В. А. ЛАПКО // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 62—67.

Рассматриваются непараметрические оценки плотности вероятности и алгоритмы распознавания образов в условиях малых выборок, основанные на искусственной генерации дополнительных статистических данных. Их свойства исследуются аналитически и методом вычислительного эксперимента. Полученные результаты имеют важное значение при проектировании сложных систем.

Библиогр. 7.

УДК 519.95

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ РЕГРЕССИЯ В УСЛОВИЯХ ПРОПУСКА ДАННЫХ / М. И. СОКОЛОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 67—73.

С использованием принципов имитации систем и коллективного оценивания разработаны непараметрические модели восстановления стохастических зависимостей в условиях пропуска данных. Идея предлагаемого подхода состоит в „размножении“ строк на основе их аналогов из исходной таблицы „объект—признак“ с последующим синтезом непараметрической регрессии.

Библиогр. 2.

УДК 681.5.015

МОДУЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНЫХ СТАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТОХАСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ / А. И. РУБАН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 8. С. 73—80.

Введены модульные характеристики, определяющие качество нелинейных статических моделей стохастических объектов, на их основе получены коэффициенты близости между медианной моделью (оптимальной моделью в смысле минимума среднего модульного отклонения выходов объекта и модели) и субоптимальными медианными параметрическими статическими моделями стохастических объектов. По коэффициентам близости можно следить за изменением качества параметрических моделей при подборе их структуры.

Ил. 4, библиогр. 7.