

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 72

3
2018

Главный редактор

Микрин Е.А. — д.т.н., проф., академик РАН,
ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ

Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)

Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)

Кларк Р. — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик,
Великобритания)

Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)

Кузнецов А.Е. — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)

Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ

Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ

Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана

Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН

Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП
им. Н.А. Пилюгина»

Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана

Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное
машиностроение"» (заместитель
главного редактора)

Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во
"Инновационное машиностроение"»

Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский
политехн. ун-т (КНР)

Фу Ли — д.т.н., проф., ин-т Бейхан (КНР)

Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН,
президент МГТУ им. Н.Э. Баумана

Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т
науки и технологии (КНР)

Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.
центр им. В.П. Чкалова

Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский
политехн. ин-т (Польша)

Редакторы — **Мырзина И.Н., Селихова Е.А.**

Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Редакторы — **Мырзина И.Н., Селихова Е.А.**

Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Редакторы — **Мырзина И.Н., Селихова Е.А.**

Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.

Тел.: (499) 268-41-77.

E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;

http://www.mashin.ru

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г.

(ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК

при Минобрнауки России изданий для публикации трудов

соискателей учёных степеней, а также в систему Россий-

ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

- Тациян Г.О., Боярова Ю.С.** Автоматизированный мониторинг конкурентоспособности инженерных решений предприятия на основе его имиджа 99
- Шалумов М.А., Шалумов А.С.** Исследование особенностей оценки электрических режимов полупроводниковых приборов в схемах микроэлектронной аппаратуры 103
- Ашрятов А.А., Вишневский С.А., Микаева С.А.** Методика расчёта колориметрических характеристик световых приборов с изменяемым спектром излучения 108

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Моногаров О.И.** Разработка интеллектуального метода селекции сигналов частичных разрядов на основе анализа последовательности экстремумов 112
- Исаев С.А., Детков А.Н., Безуглов А.А.** Цифро-натурный метод оценки характеристик метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны 116
- Шашурин В.Д., Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Технология формирования акцептора действия навигационного комплекса с использованием динамического системного синтеза 121
- Толкачёв П.А., Шахтарин Б.И.** Модель расчёта шумов в синтезаторах частоты 127

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

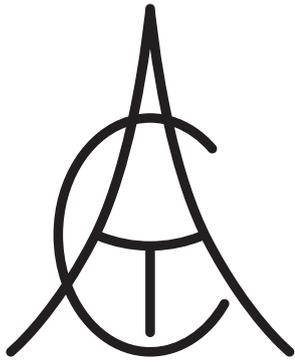
- Фокин С.В.** Оценка эффективности визуализации информации в системах мониторинга 132

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Глазков В.В., Микаэльян С.В., Муратов И.В.** Цифровая модель дискриминационной характеристики оптико-электронной следящей системы 138

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

- По страницам журналов 143



Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Chief in Editor

Mikrin E.A. – dr.en.s., prof., academician of the RAS,
RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev

EDITORIAL COUNCIL:

Afanasyev V.N. – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE

Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China

Ivanov A.P. – dr.ec.s., prof., MSURE (MIIT)

Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick
University, UK

Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa

Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan

Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE

Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MSUPI

Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS

Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP
behalf N.A. Pilyugin»

Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf
of N.E. Bauman

Putilov V.N. – LLC «Publishing Innovative mashine
building» (deputy chief editor)

Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Publishing
Innovative mashine building»

Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,
P.R. China

Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China

Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician RAS, President
of MSTU behalf of N.E. Bauman

He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science
and Technology, P.R. China

Shakhnov V.N. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,
MSTU behalf of N.E. Bauman

Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center
behalf of V.P. Chkalov

Yanovich E.A. – dr.ec.s., prof., Koszalin Polytechnic.
Inst., Poland

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**

Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:

107076 Moscow Kolodezny lane – 2a, build. 2

Tel: (499) 268-41-77.

E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;

<http://www.mashin.ru>

Founder:

LLC «SCIENTIFIC AND TECHNICAL PUBLISHING
"INNOVATIVE MACHINE BUILDING"»

The journal was registered in the Roskomnadzor, on May 29, 2014 (PI No. FS77-78102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of Education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian Index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

Volume 72 $\frac{3}{2018}$

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

- Tashchiyan G.O., Boyarova Yu.S.** Automated monitoring of the competitiveness of engineering solutions based on the company's image 99
- Shalumov M.A., Shalumov A.S.** Investigation of the electrical regimes features evaluation for semiconductor devices in circuits of microelectronic equipment 103
- Ashryatov A.A., Vishnevskiy S.A., Mikaeva S.A.** Method for calculating the colorimetric characteristics of light devices with a variable spectrum of radiation 108

MODERN TECHNOLOGIES

- Monogarov O.I.** Development of an intelligent method for selecting partial-discharge signals based on an analysis of the sequence of extremums 112
- Isaev S.A., Detkov A.N., Bezuglov A.A.** A digital-natural method for evaluation the characteristics of meteorological radar complexes of a near aerodrome zone 116
- Shashurin V.D., Selezneva M.S., Neusypin K.A.** The formation technology of the navigation complex action acceptor through the use of dynamic system synthesis 121
- Tolkachev P.A., Shakhtarin B.I.** Model for noise calculation in frequency synthesizers 127

INFORMATION TECHNOLOGIES

- Fokin S.V.** Evaluation of the information visualization effectiveness in monitoring systems 132

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

- Glazkov V.V., Mikaelyan S.V., Muratov I.V.** Digital model of the discrimination characteristic of the optoelectronic servo system 138

SURVEY OF PERIODICALS

- Periodical review 143



УДК 659.4.012.12

Г.О. Ташиян, канд. техн. наук, доц., Ю.С. Боярова

(Юргинский технологический институт Томского политехнического университета)
gtashiyana@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ЕГО ИМИДЖА

Необходимость эффективного развития предприятий подталкивает современных руководителей к автоматизации практически всех его процессов. Рассматриваются вопросы применения программного обеспечения для автоматизации мониторинга конкурентоспособности инженерных решений предприятия на основе его имиджа.

Ключевые слова: автоматизированный мониторинг; конкурентоспособность; инженерное решение; имидж.

The necessity for effective development of enterprises makes modern managers to automate almost all of its processes. In the article questions of software application for automation monitoring of competitiveness of engineering decisions on the basis of its image are considered.

Keywords: automatic monitoring; competitiveness; engineering solution; image.

Для современных предприятий (организаций) получение максимальных прибылей в рыночных условиях обеспечивается за счёт высоких показателей уровня конкурентоспособности инженерных решений. При этом в любой организации ставится цель достичь такого уровня конкурентоспособности, который позволял бы не только выживать, но и занять лидирующие позиции на рынке в долгосрочной перспективе.

В работе [1] проведён анализ понятия «конкурентоспособность». Его результат в целом сводится к следующему: конкурентоспособность — это способность предприятия создавать более эффективные инженерные решения, чем у конкурентов в долгосрочной перспективе.

Оценка конкурентоспособности инженерных решений предприятия — достаточно сложная задача, поскольку существуют определённые экономические, финансовые, кадровые показатели и ряд других, которые характеризуют результативность его деятельности.

Одна из особенностей обеспечения конкурентоспособности инженерных решений предприятия заключается в создании и поддержании его положительного имиджа в глазах общественности.

Понятие «имидж» сегодня трактуется достаточно широко. Существуют такие понятия, как «производственный имидж», «организационный имидж», «имидж предприятия», «имиджевая политика» и др. Маркетинговое мышление обусловило активное развитие

имидж-науки. Имиджу уделяется достаточно большое внимание практически во всех областях деятельности современного человека. Особенную значимость имидж имеет в политике. Ведь «истинное лицо» большинства политических деятелей скрыто от общественности, а основой для формирования их репутации является имидж, создаваемый зачастую при помощи имиджмейкеров и СМИ. В последнее время значимость имиджа возросла и в бизнесе. Катализатором для данного процесса служит конкуренция. Большим спросом пользуется имиджевая реклама, т. е. реклама, ориентированная на поддержание образа компании, а не определённого товара.

Поскольку с каждым годом ценность имиджа для руководящего состава предприятий неуклонно растёт, то приобретает весомое значение его количественная оценка. Для систематической оценки и прогнозирования конкурентоспособности инженерных решений предприятия на основе имиджа необходимо проводить его автоматизированный мониторинг по балльным критериям методом опроса-анкетирования.

В работе [2] для автоматизированного мониторинга конкурентоспособности наукоемкой машиностроительной продукции (АМК НМП) были использованы возможности платформы Microsoft Access. На базе Microsoft Access был разработан программный продукт «Инноватор». В сочетании с функциональным модулем «Анкетирование» платформа Microsoft Business

Solutions-Axapta [3] позволила создать интегрированную систему «Автоматизированный мониторинг конкурентоспособности наукоёмкой продукции». Данная система зарегистрирована как программный продукт в Федеральной службе по интеллектуальной собственности за № 2004612408 от 22 октября 2004 г.

Основные достоинства системы АМК НМП: переназначение информационной загрузки с человека на ЭВМ для уменьшения работы запоминания, анализа и обработки информации человеком;

возможность использовать личный опыт и знания высококвалифицированных специалистов;

простота в обучении, пользовании, экспериментировании с системой;

психологически комфортное общение пользователя с ЭВМ;

высокая степень адаптации системы к формированию новых знаний экспертов по решаемой проблеме, а также к уровню подготовки пользователей;

представление данных системы в виде текстовых, табличных и графических форм отчётности.

Вопросы конкурентоспособности предприятия и его продукции связаны между собой. Поэтому автоматизировать процесс мониторинга конкурентоспособности инженерных решений предприятия на основе его имиджа также предлагается средствами Microsoft Access. Это связано с тем, что среда функционирования позволяет работать совместно с модулями различных программных продуктов. А это позволит рассмотреть проблему конкурентоспособности предприятия в целом, включая широкий спектр решаемых проблем: экономических, финансовых, кадровых, производственных, маркетинговых и др.

Более того, каждая из названных проблем позволит создать соответствующие модули её решения с применением единого комплекса программ. Таким образом, будет решаться не менее значимая для современных предприятий проблема — модульная совместимость используемых компьютерных программ.

Исходя из изложенного автоматизация мониторинга конкурентоспособности инженерных решений предприятия на основе имиджа проводилась средствами платформы Microsoft Access. С использованием возможностей среды Microsoft Access была создана компьютерная программа «Автоматизированный мониторинг конкурентоспособности имиджа организации» (АМКИО). Данная программа была зарегистрирована в Федеральной служ-

бе по интеллектуальной собственности за № 2015615283 от 14 мая 2015 г.

Ниже представлены диалоговые окна программы АМКИО с пошаговой инструкцией по её работе.

Работа программы начинается с запуска файла Имидж.mdb. При этом загружается Microsoft Access и среда конфигурируется, возникает окно заставки программы Имидж.mdb (рис. 1). В данном окне есть две кнопки: «Войти в систему» и «Выход из системы». При нажатии кнопки «Выход из системы» происходит выход из приложения Microsoft Access. Для работы с программой необходимо нажать кнопку «Войти в систему». Появится новое диалоговое окно с необходимой информацией и кнопками (рис. 2).

Информация в верхней части окна содержит перечень показателей для последующей оценки конкурентоспособности предприятия по комплексу критериев его имиджа. Ниже расположены кнопки для дальнейшей работы с системой: «Работа с системой», «Описание имиджа предприятия», «Описание экспертных процедур» и «Предыдущее меню».

Кнопки «Описание имиджа предприятия» и «Описание экспертных процедур» открывают окна с соответствующей информацией об имидже предприятий и экспертных процедурах.

Кнопка «Предыдущее меню» возвращает процедуру на один шаг назад.

Кнопка «Работа с системой» открывает диалоговое окно (рис. 3), содержащее текст и две кнопки: «Экспертная оценка имиджа предприятия» и «Предыдущее меню».

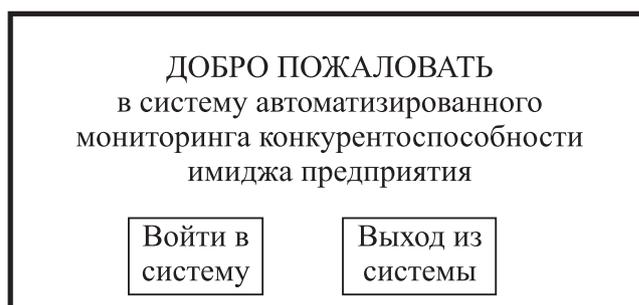


Рис. 1. Окно заставки программы «Имидж»

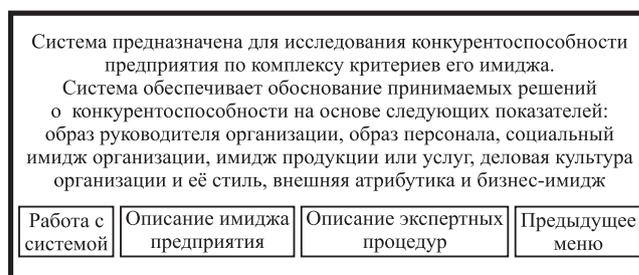


Рис. 2. Диалоговое окно «Войти в систему»

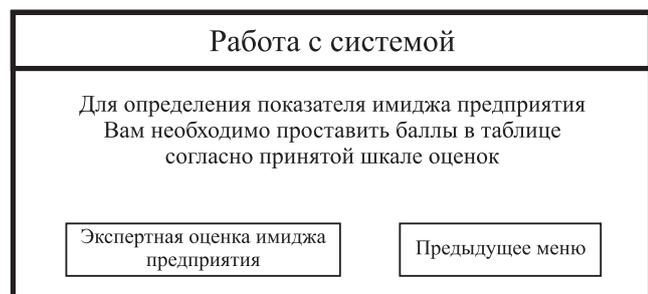


Рис. 3. Диалоговое окно «Работа с системой»

В верхней части окна указывается, что для определения показателя имиджа предприятия необходимо проставить баллы в таблице согласно принятой шкале оценок.

Кнопка «Предыдущее меню» возвращает процедуру на один шаг назад.

Кнопка «Экспертная оценка имиджа предприятия» открывает диалоговое окно «Показатели имиджа предприятия» (рис. 4). В данном окне представлены основные критерии оценки конкурентоспособности инженерных решений предприятий на основе их репутации (имиджа). К ним относятся репутация руководителя организации, качество обслуживания клиентов, социальная ответственность, представление о качестве продукции или услуги, деловая культура организации, фирменный стиль, бизнес-имидж.

Ниже расположены кнопки «Показать критерии», «Назад», «Далее».

При нажатии кнопки «Показать критерии» откроются вспомогательные окна с информацией по каждому критерию и их оценочные баллы. На рис. 5 представлен пример информации по одному из семи оценочных критериев. Такая информация позволяет экспертам ориентироваться в выборе оценки по каждому критерию.

После просмотра критериев оценки необходимо для каждого из них проставить соответствующую оценку для первого объекта (предприятия) в окне «Показатели имиджа предприятия» (см. рис. 4). Затем можно нажать либо на кнопку «Назад», либо на кнопку «Далее». Если нажать на кнопку «Назад», то система прекратит процедуру заполнения формы «Показатели имиджа предприятия» и перейдет на один шаг назад, в форму «Работа с системой» (см. рис. 3). Если нажать кнопку «Далее», то система перейдет к просмотру итогового результата для первого оцениваемого объекта. В результате откроется форма «Итоговая оценка», где показано числовое значение уровня конкурентоспособности имиджа организации (предприятия) (рис. 6).

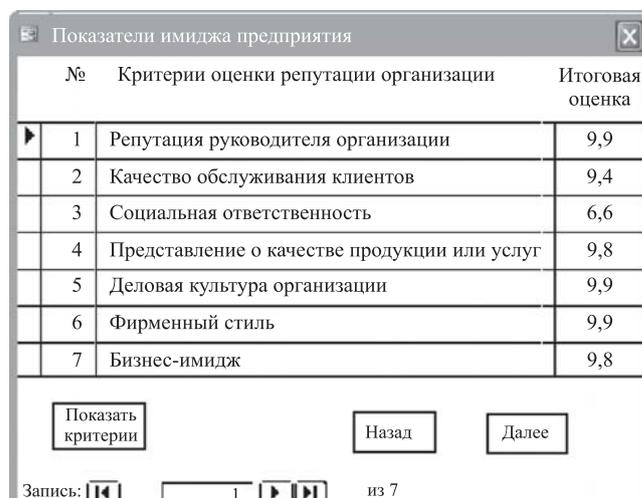


Рис. 4. Диалоговое окно «Показатели имиджа предприятия»

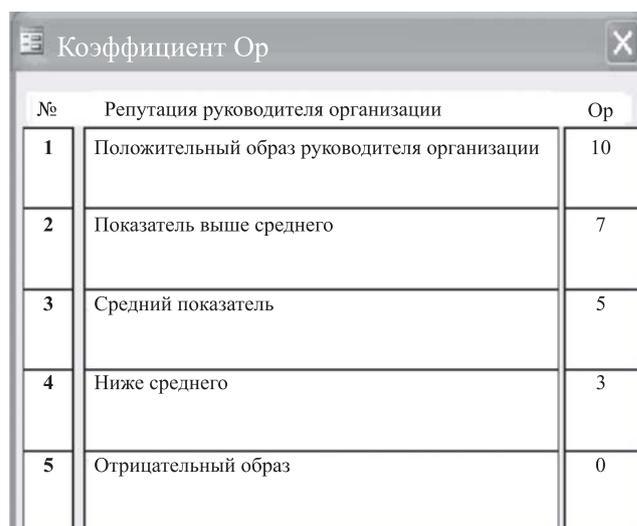


Рис. 5. Диалоговое окно «Критерий оценки репутации руководителя организации»

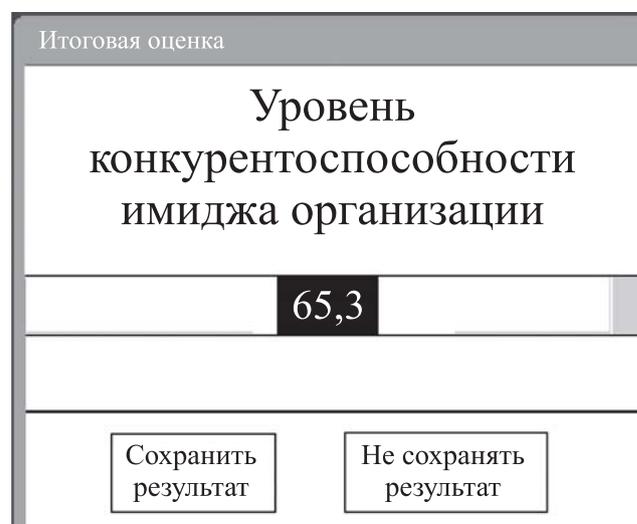


Рис. 6. Диалоговое окно «Итоговая оценка»

В форме «Итоговая оценка» содержатся две кнопки: «Сохранить результат» и «Не сохранять результат». Если нажать на кнопку «Не сохранять результат», то система не создаст записи в итоговой таблице. Если нажать на кнопку «Сохранить результат», то система выдаст сообщение о создании запроса на добавление данных в итоговую таблицу и откроется форма «Введите значение параметра — Название организации» (рис. 7).

Рис. 7. Диалоговое окно «Введите значение параметра — Название организации»

Рис. 8. Диалоговое окно «Введите значение параметра — Дата»

Рис. 9. Диалоговое окно «Опрос завершён»

В форме «Введите значение параметра — Название организации» необходимо указать название исследуемого объекта и нажать на кнопку «ОК». В результате откроется форма «Введите значение параметра — Дата» (рис. 8).

В форме «Введите значение параметра — Дата» необходимо указать дату проведения опроса для последующей статистической отчётности и нажать на кнопку «ОК». В результате система создаст новую запись в итоговой таблице по определению уровня конкурентоспособности инженерных решений предприятия на основе его имиджа. Любое нажатие кнопок откроет следующую форму «Опрос завершён» с соответствующей информацией (рис. 9).

Форма «Опрос завершён» информирует о том, что проведён опрос по семи критериям конкурентоспособности имиджа организации.

Кнопка «Показать результат» открывает таблицу с результатом проведённого опроса по конкурентоспособности имиджа организации (рис. 10).

После просмотра результатов необходимо закрыть форму, нажав на «крестик» в правом верхнем углу окна. После этого система вновь откроет диалоговое окно «Опрос завершён» (см. рис. 9).

Кнопка «На начало программы» позволяет перейти на начальную форму системы «Окно заставки программы "Имидж"» (см. рис. 1). В результате можно провести оценку конкурентоспособности инженерных решений предприятия на основе его имиджа для следующего объекта.

Кнопка «Выход из системы» позволяет завершить работу по оценке конкурентоспособности исследуемых объектов и полностью выйти из приложения Microsoft Access, закрыв программу «Имидж».

Разработанная система АМКОИ позволяет расширять инструментарий данного программного продукта, совершенствовать про-

Название	Оценка	Дата оценки
Юрмаш	70,7	22.02.2017
Ферросплавы	54,1	22.02.2017
Технониколь	54,3	22.02.2017
Юргателеком	46,5	22.02.2017
Сириус	65,3	22.02.2017

Рис. 10. Диалоговое окно «Конкурентоспособность имиджа организации»

цедуры исследований по мере углубления разрабатываемой методической и алгоритмической базы прогнозирования эффективности инженерных решений предприятия.

Библиографические ссылки

1. Tashchiyan G.O., Suzdalova M.A., Grichin S.V. et al. System of Evaluation of Engineering Solutions Competitiveness of a Company Based on its Image // IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 142. Art. numb. 012103.

2. Тащиян Г.О. Автоматизированный мониторинг конкурентоспособности наукоёмкой машиностроительной продукции // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 8. С. 38—40.

3. Tashchiyan G.O., Sushko A.V., Grichin S.V. Microsoft Business Solutions-Axapta as a basis for automated monitoring of high technology products competitiveness // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 91. Art. numb. 012065.

УДК 621.396.6.019.3

М.А. Шалумов, канд. техн. наук, **А.С. Шалумов**, д-р техн. наук, проф.
(Российская академия народного хозяйства и государственной службы
при Президенте РФ (Владимирский филиал))

ALS140965@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СХЕМАХ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Проведён анализ требований к содержанию и процессу проведения оценки электрических режимов полупроводниковых приборов, а также существующих методов оценки электрических режимов полупроводниковых приборов в схемах микроэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: радиотехническое устройство; моделирование; надёжность; экстремальные значения; электрический режим.

The analysis of the requirements for the content and the process of evaluation realization the electrical regimes of semiconductor devices, as well as the existing methods for evaluation the electrical regimes of semiconductor devices in circuits of microelectronic equipment were carried out.

Keywords: radio engineering device; modeling; reliability; extreme values; electric regime.

Оценка электрических режимов работы полупроводниковых приборов (ПП) является составной частью работ по проверке правильности применения электрорадиоизделий (ЭРИ) в радиотехнических устройствах (РТУ), проводимой разработчиками и заказчиками РТУ в профилактических целях на ранних стадиях создания РТУ для предотвращения отказов ПП и связанных с ними отказов РТУ в эксплуатации, а также работ по анализу причин отказов РТУ и ПП на ранних стадиях создания и эксплуатации РТУ в целях проверки гипотезы о том, что причиной отказа ПП является их неправильное применение.

Объём работ по проверке правильности применения ПП в РТУ [1] можно оценить, анализируя рис. 1, из которого следует, что наряду с оценкой электрических режимов работы ПП оцениваются и проверяются их перспективность (наличие перспективных аналогов с лучшими параметрами и характеристиками), соот-

ветствие условий эксплуатации ПП в РТУ по механическим и климатическим воздействиям требованиям технических условий (ТУ) на ПП, температурные режимы ПП, допустимость воздействующих на ПП технологических факторов в процессе их монтажа в РТУ и др.

Задача оценки электрических режимов работы ПП — одна из наиболее трудоёмких и ответственных, с которой по сложности решения можно сравнить только оценку температурных режимов работы ПП. В самом деле, в отличие от работ по оценке номенклатуры, условий эксплуатации для оценки электрических режимов работы ПП требуются анализ схемотехники РТУ, проведение сложных инструментальных измерений и расчётов электронных схем, оценка фактических и допустимых по научно-технической документации (НТД) на ПП режимов работы, определяемых в общем случае сложными параметрами — функционалами [2].

Вследствие того что электрические характеристики и параметры режима работы ПП зависят от температуры (корпуса ПП, окружающей среды), при оценке электрических режимов работы ПП требуется учитывать эти зависимости, а также имеющиеся результаты тепловых испытаний или расчётов функциональных узлов РТУ (их макетов, моделей). Со-

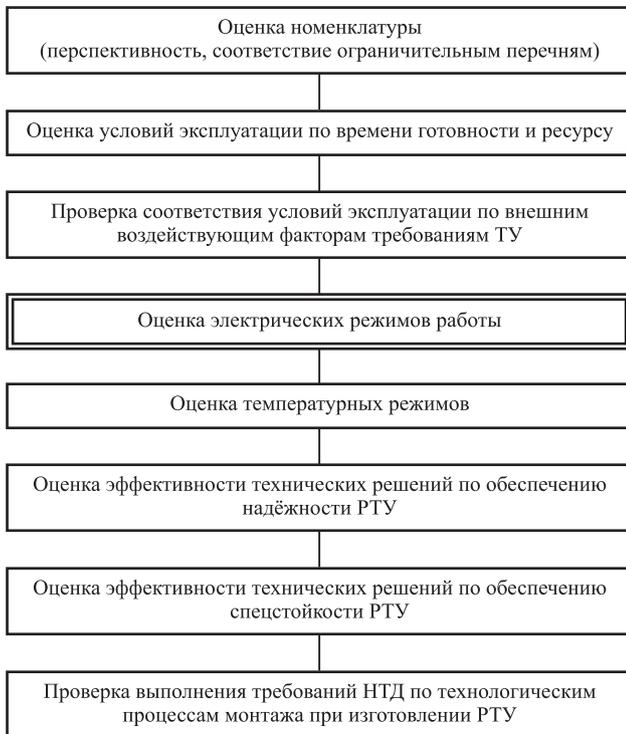


Рис. 1. Перечень работ по проверке правильности применения ПП в РТУ

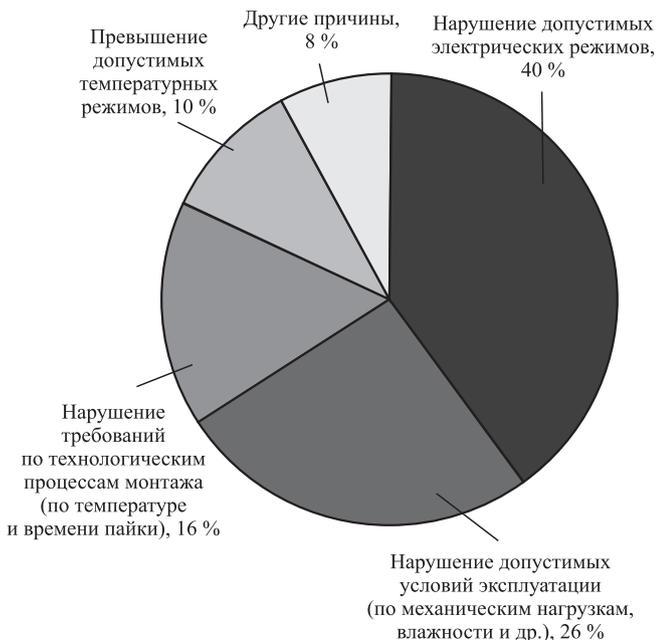


Рис. 2. Распределение причин отказов ПП в бортовом РТУ (без учёта отказов, связанных с дефектами ПП)

вершенствование методов и средств, используемых для оценки температурных режимов работы ПП, весьма важно для обеспечения надёжности ПП в РТУ, особенно микроэлектронной аппаратуры (МЭА), отличающейся большими плотностью монтажа ЭРИ и удельной мощностью рассеяния. В этом направлении в настоящее время ведутся интенсивные исследования, результаты которых отражены в ряде научных публикаций, например [3, 4].

Значимость работ по оценке электрических режимов ПП при проверке правильности их применения отражена известными статистическими данными о наиболее характерных причинах отказов ПП [1], согласно которым доля отказов, связанных с нарушениями электрических режимов работы (РР) ПП, составляет примерно 40...45 % от общего числа отказов ПП в эксплуатации (рис. 2).

Электрические режимы работы ПП в схемах РТУ оценивают в целях определения соответствия их требованиям НТД на ПП (отраслевых ТУ, ТУ и руководств по применению ПП), а результаты оценки отражаются разработчиком РТУ в картах рабочих режимов (КРР), являющихся обязательным документом, входящим в состав конструкторской документации на вновь разрабатываемую и модернизируемую аппаратуру. В КРР должны быть указаны наиболее «тяжёлые» электрические режимы работы ПП, определяемые при наиболее неблагоприятных значениях напряжений источников питания, минимальных и максимальных значениях температуры окружающей среды, неблагоприятных разбросах параметров и т. п.

При проведении оценки электрических режимов работы ПП требуется установить:

соответствие электрических режимов работы ПП требованиям НТД на них при любых возможных изменениях параметров ПП и других ЭРИ в схеме, питающих напряжений и при действии переходных процессов в схемах РТУ;

правильность применения ПП по функциональному назначению в соответствии с НТД на них;

выполнение указаний по выбору электрического режима или по применению ПП, приведённых в НТД на них (применение ограничительных резисторов, выравнивающих конденсаторов и т. п.);

наличие разрешений на применение ПП с отступлением от требований НТД на них при применении не по прямому функциональному назначению или в режиме, не оговоренном НТД.

К нарушениям относятся:

превышение предельно допустимых значений (или недопустимые значения) электри-

ческих параметров режима, установленных в НТД на ПП (при отсутствии разрешения на такое отступление от требований НТД);

применение ПП не по функциональному назначению или в режимах, в которых работоспособность ПП определяется параметрами, не регламентированными НТД на ПП;

невыполнение требований НТД на ПП по особенностям схмотехнического применения ПП.

Оценка электрических режимов ПП является также составной частью комплекса мероприятий, объединяемых программами обеспечения надёжности РТУ на этапе разработки. Этапы и состав выполняемых при этом работ приведены на рис. 3. Видно, что основная работа по оценке режимов работы ПП и документированию её результатов (выпуску карт рабочих режимов ПП) должна вестись на этапах разработки эскизного и технического проектов и их подэтапах, связанных с проектированием и испытаниями на макетах и опытных образцах электронных схем узлов РТУ.

Таким образом, исследование требований к содержанию и процессу проведения оценки электрических режимов ПП в схемах РТУ позволяет определить следующие её особенности.

Во-первых, оценка электрических режимов ПП и других ЭРИ проводится в основ-

ном на этапе технического проектирования, в ходе разработки и испытаний опытного образца РТУ, когда определены конструкции функциональных узлов и электрические схемы применения ПП.

Во-вторых, в процессе оценки должны быть определены наиболее «тяжёлые» фактические режимы работы ПП в схеме их применения с учётом наиболее неблагоприятных значений параметров ЭРИ, сигналов, источников питания, температуры и т. п.

В-третьих, после определения фактических режимов ПП в схемах РТУ должно быть установлено соответствие этих режимов допустимым по НТД на ПП.

Перечисленные особенности обуславливают трудности оценки электрических режимов ПП в схемах МЭА, которые связаны с необходимостью анализа электронных схем и конструкции функциональных узлов и микроблоков МЭА для уточнения схем применения ПП; определения и вариации в пределах технологического разброса наиболее существенных с точки зрения возникновения «тяжёлых» режимов ПП параметров ЭРИ и характерных для МЭА паразитных R-, L-, C-элементов, а также параметров сигналов и источников питания; определения допустимых по НТД на ПП режимов их работы, определяемых в общем случае сложными параметрами — функционалами.

Изучение тенденций развития принципов конструирования РТУ показывает, что с точки зрения проблемы обеспечения правильного применения ПП принципиальными являются повышение сложности современных РТУ и их микроминиатюризация.

Разработанные ранее и действующие до настоящего времени методы [2] ориентированы в основном на оценку электрических режимов ПП и других ЭРИ в аппаратуре 2-го и частично 3-го поколений. Поэтому в них упор сделан на инструментальные измерения электрических параметров режима дискретных (как правило, корпусированных) ЭРИ. Вместе с тем наряду с инструментальными измерениями широко используются, а в современных условиях быстро развиваются и выходят на первый план расчётные методы, в особенности основанные на использовании ЭВМ. Существуют также методы, сочетающие измерения и расчёт.

Рассмотрим возможности различных методов оценки электрических режимов ПП в МЭА. Классификация существующих методов приведена на рис. 4.

Наиболее универсальным и информативным методом измерения электрических параметров, характеризующих режимы ПП, является ос-



Рис. 3. Этапы работы по обеспечению надёжности ПП, выполняемой на различных стадиях разработки РТУ



Рис. 4. Классификация методов оценки электрических режимов работы ПП в схемах МЭА

циллографирование, позволяющее установить характер изменения по времени токов и напряжений на выводах ПП в процессе их работы в схемах РТУ. Использование специализированных измерительных приборов (импульсных вольтметров, анализаторов спектра и др.) позволяет уточнить отдельные параметры РР ПП, если точность их определения по осциллограммам недостаточна. Прогресс в области создания технических средств автоматики для контроля электрических параметров РТУ и их компонентов привёл к появлению и широкому использованию автоматизированных измерительных комплексов, в которых измерительные приборы работают под управлением встроенных микропроцессоров и ЭВМ.

Использование автоматизированных измерительных комплексов позволяет существенно снизить трудоёмкость работы, использовать жёсткие алгоритмы контроля, исключая возможность вмешательства субъективных факторов, документировать результаты контроля. Разновидностью автоматизированных измерительных комплексов являются автоматы контроля и коммутации (АКК), автоматизирующие проведение физических экспериментов на макетах функциональных узлов РТУ с использованием специальных физических моделей ЭРИ с регулируемыми параметрами. С помощью АКК реализуется так называемый метод рабочих областей, при котором определяются области допустимых изменений параметров ЭРИ (ПП, имеющих технологический разброс, с учётом ограничений на выходные

электрические параметры, в качестве которых могут рассматриваться электрические параметры режима работы ПП). Достоинствами инструментальных методов являются относительная простота и наглядность. В то же время, поскольку использование инструментальных методов предполагает проведение измерений на образце или макете электронной схемы (функционального узла) РТУ, возможности вариации параметров ЭРИ и сигналов в целях отыскания экстремальных РР ПП весьма ограничены. Другими принципиальными недостатками инструментальных методов являются ограниченные возможности измерительных приборов, а также зависимость результатов измерений (их объективности и точности) от способа подключения измерительного прибора к контролируемой

электрической цепи и влияние паразитных реактивностей (ёмкостей и индуктивностей) соединительных проводников, датчиков, контактных устройств на исследуемые электрические сигналы. В частности, при использовании осциллографа обязательным требованием является соблюдение строго определённого порядка подключения общего провода (земли), что вызывает большие, часто непреодолимые трудности не только обеспечения приемлемой погрешности измерений, но и предотвращения опасности повреждения исследуемой электронной схемы. По той же причине существенную проблему представляет измерение импульсных токов в изолированных цепях. В связи с этим существующие измерительные комплексы позволяют анализировать в основном только статические и низкочастотные РР ПП.

Современная аппаратура характеризуется использованием в ней в качестве элементов нулевого структурного уровня не только ЭРИ, но и микросборок. При этом конструкция микросборок (МСБ), представляющих собой функционально законченные изделия, часто рассчитана на возможность герметизации в составе узлов и блоков. МСБ выполняется по гибридно-пленочной технологии с использованием активных и пассивных элементов и бескорпусных полупроводниковых интегральных микросхем, размещаемых на керамических или ситаловых подложках.

Естественно, что анализ РР комплектующих ПП в МСБ так же, как и в микроблоках, методами прямых инструментальных измерений

встречает ещё большие трудности из-за труднодоступности объектов измерений и высокого риска повреждения. Кроме того, применение инструментальных методов анализа, выполняемого на одном экземпляре узла или блока РТУ, как это указывалось ранее, не позволяет получить информацию об экстремальных РР ПП, а также иметь достаточные возможности учёта влияния на РР ПП разбросов параметров других элементов схем и дестабилизирующих факторов, которые имеют место в случаях серийного производства и эксплуатации РТУ.

Применительно к современным РТУ и МСБ влияние этих факторов значительно усиливается. Действительно, для микроблоков и МСБ характерны высокое быстродействие (менее 1 мкс), высокие скорости переключения токов (dI/dt до 10^7 А/с). Вследствие этого РР ПП очень сильно зависят даже от незначительных изменений паразитных элементов монтажных соединений, которые, в свою очередь, зависят от очень большого числа практически не поддающихся контролю факторов (в том числе, например, от состава и толщины плёнки наносимого при изготовлении МСБ полимерного защитного покрытия). Не меньшее влияние оказывают разбросы коэффициентов усиления активных компонентов схем, таких как транзисторы (в пределах норм ТУ на них), и изменение качества электропитания.

В связи с отмеченными принципиальными ограничениями инструментальных методов определения РР ПП целесообразно рассмотреть возможности и перспективность расчётных методов решения данной задачи. Эти методы по способам их реализации и возможностям разделяются на расчётные ручные (расчёты по формулам вручную) и машинные (вычислительные эксперименты с моделями на ЭВМ).

Расчётные ручные методы используются в настоящее время главным образом для ориентировочных расчётов параметров РР ПП, которые рассматривают как исходные, требующие корректировки с помощью других методов. Ориентировочный характер результатов ручных расчётов связан с малой точностью ручных расчётов по упрощённым формулам. Действительно, процессы в достаточно сложных технических объектах, какими являются электронные схемы РТУ, описываются системами уравнений высокого порядка. Эти уравнения в общем случае нелинейны. Так, переходные процессы, по графикам которых определяются параметры РР ПП в электронных схемах, описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений, порядок которых приблизительно равен числу реак-

тивных элементов. Для схем средней степени сложности порядки систем уравнений оказываются равными 50...500. Аналитическое решение удаётся получить практически только в том случае, если порядок системы уравнений не превышает двух и уравнения линейны.

Отсутствие требования упрощений при расчётах на ЭВМ позволяет строить и использовать математические модели (ММ), точность которых вполне достаточна для расчёта параметров РР ПП, а наличие быстродействующей ЭВМ с достаточной ёмкостью оперативной памяти и соответствующего программного обеспечения даёт возможность всестороннего исследования ММ электронной схемы в приемлемое время. Для ММ электронных схем и комплектующих их ЭРИ характерна возможность изменения в широких пределах любых параметров, что облегчает проведение оценки экстремальных электрических РР ПП, позволяет сделать её более всесторонней и исчерпывающей, чем это возможно при инструментальных измерениях на физическом образце (макете электронной схемы). Вместе с тем, как было отмечено, определение значений параметров экстремальных РР ПП ещё не решает задачу оценки электрических РР ПП, для проведения которой необходимо ещё определить степень соответствия полученных значений требованиям НТД на ПП.

Для снижения трудоёмкости решения этой задачи в настоящее время разработаны и используются системы автоматизированного выпуска (САВ) КРР. Полученные результаты исследований использованы в автоматизированной системе обеспечения надёжности и качества аппаратуры (АСОНИКА) [4, 5], в которой существует база данных (БД) ЭРИ и материалов, используемых в РТУ, содержащая геометрические, теплофизические, физико-механические, электрические и надёжностные параметры. Эта БД ЭРИ и материалов помимо прочих параметров содержит допустимые по НТД электрические параметры ЭРИ. Данные из БД ЭРИ и данные, полученные в результате расчётов, используются для формирования карт рабочих режимов в АСОНИКА.

Комплект КРР в окончательном виде представляется разработчиком аппаратуры на стадии разработки рабочей документации (по результатам испытаний опытного образца). Возможно составление КРР на более ранних стадиях разработки аппаратуры путём проведения расчётов по схемам или по результатам инструментальных измерений на макетах с последующей их корректировкой (по результатам измерений в опытном образце).

Библиографические ссылки

1. **Лаврентьев Б.Ф.** Схемотехника электронных средств. М.: Изд. центр «Академия», 2010. 308 с.
2. **Китаев Ю.В.** Основы цифровой техники. СПб., СПбГУ ИТМО, 2007. 87 с.
3. **Тумковский С.Р.** Идентификация параметров математических моделей элементов РЭС: дис.... д-ра техн. наук. М., 2006. 251 с.
4. **Автоматизированная** система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлек-

тронных средствах с учетом внешних воздействий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, С.У. Увайсов, М.А. Шалумов и др.; под ред. А.С. Шалумова. М.: Радиотехника, 2013. 424 с.

5. **Автоматизированная** система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин и др.; под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат, 2007. 368 с.

УДК 628.937(203)

А.А. Ашрятов, д-р техн. наук, проф., **С.А. Вишневский**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),
С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.
(Московский технологический университет)

mikaeva@npo.lit.ru

**МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СВЕТОВЫХ ПРИБОРОВ С ИЗМЕНЯЕМЫМ СПЕКТРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Совсем недавно основной задачей освещения являлось создание необходимых условий для беспрепятственной ориентации человека в пространстве. В настоящее время освещение должно не только создавать заданные уровни освещённости, но и являться частью интерьера. Современные технологии предоставляют возможность создавать уникальные по своему дизайну и характеристикам световые приборы, способные изменять спектр излучения в режиме реального времени и тем самым за считанные секунды преобразовывать цветоцветовую среду помещения до неузнаваемости. Однако новизна затронутой темы влечёт за собой отсутствие информации, опыта и программных средств, необходимых для выполнения расчёта колориметрических характеристик световых приборов с изменяемым спектром излучения, что значительно затрудняет развитие световых приборов данного типа.

Ключевые слова: источник света; световой прибор; светильник; регулируемый спектр излучения; алгоритм; индекс цветопередачи; цветовая температура; освещение музеев; динамическое освещение.

More recently, the main task of lighting was to create the necessary conditions for a person unimpeded orientation in space. At present, lighting should not only create specified levels of illumination, but also be part of the interior. Modern technologies provide the ability to create light devices unique in their design and characteristics. These devices can change the spectrum of radiation in real time and thus transform within seconds the light-colored environment of the room beyond recognition. However, the novelty of the touched upon theme involves the lack of information, experience and software needed to perform the calculation of the colorimetric characteristics of light devices with a variable spectrum of radiation, that greatly complicates the development of light devices of this type.

Keywords: light source; light device; lamp; adjustable radiation spectrum; algorithm; color rendering index; colorful temperature; illumination of museums; dynamic lighting.

Введение. Современное освещение должно не только создавать необходимый уровень освещённости с заданной цветовой температурой, но и быть частью интерьера. Располагая светильники определённым образом, можно обеспечить необходимую в данный момент гармонию помещения и тем самым либо создать атмосферу, благоприятную для работы, либо, наоборот, получить мягкое освещение,

позволяющее расслабиться в свободное от работы время.

Появление мощных светодиодов, излучающих свет в узких диапазонах длин волн видимого спектра излучения, значительно расширило возможности световых приборов (СП). Используя группы светодиодов, излучающие свет с различными длинами волн, и специальный многоканальный драйвер питания,

позволяющий регулировать ток питания каждой группы независимо от остальных, можно получить СП, способный изменять спектр излучения, а следовательно, цветовую температуру и индекс цветопередачи [1].

Световые приборы с изменяемым спектром излучения пригодны для освещения как рабочих помещений и помещений для отдыха [2], так и музеев и выставочных павильонов. В одном случае можно настроить СП таким образом, чтобы он имитировал естественный, приятный для человека свет [3, 4], в другом — так, чтобы освещаемые выставочные экспонаты предстали перед зрителем в наилучшем для восприятия виде [5].

Возможность создания СП с изменяемым спектром излучения появилась совсем недавно, поэтому необходимый опыт, а также программные средства, требующиеся для выполнения расчётов при проектировании таких СП, отсутствуют. Описанная в статье методика позволяет выполнить расчёт колориметрических параметров СП с изменяемым спектром излучения.

Сложности проектирования СП с изменяемым спектром излучения. Принцип регулирования спектра излучения СП заключается в его формировании из отдельных составляющих, излучаемых отдельными группами светодиодов, и последующем регулировании токов питания этих групп светодиодов, а следовательно, и интенсивностей излучения отдельных составляющих спектра.

Очевидно, что свет, излучаемый СП с изменяемым спектром излучения (см. рис. 2), является результатом сложения света, излучаемого отдельными источниками света (ИС), расположенными в корпусе СП (рис. 1).

Изменяя токи питания отдельных групп светодиодов, спектры излучения которых изображены на рис. 2, можно изменять излучаемый ими световой поток, а следовательно, и суммарный спектр излучения СП, спектр которого приведён на

рис. 1. Таким образом, при проектировании СП с изменяемым спектром излучения прежде всего необходимо определить, какие длины волн должны присутствовать в спектре излучения разрабатываемого СП, и подобрать

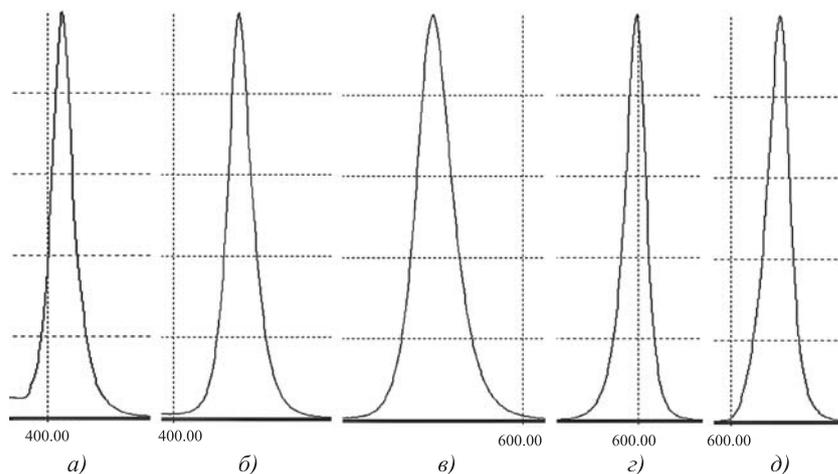


Рис. 1. Спектры излучения светодиодов, излучающих свет с длинами волн, соответствующими фиолетовому (а), синему (б), зеленому (в), желтому (з) и красному (д) цветам, нм

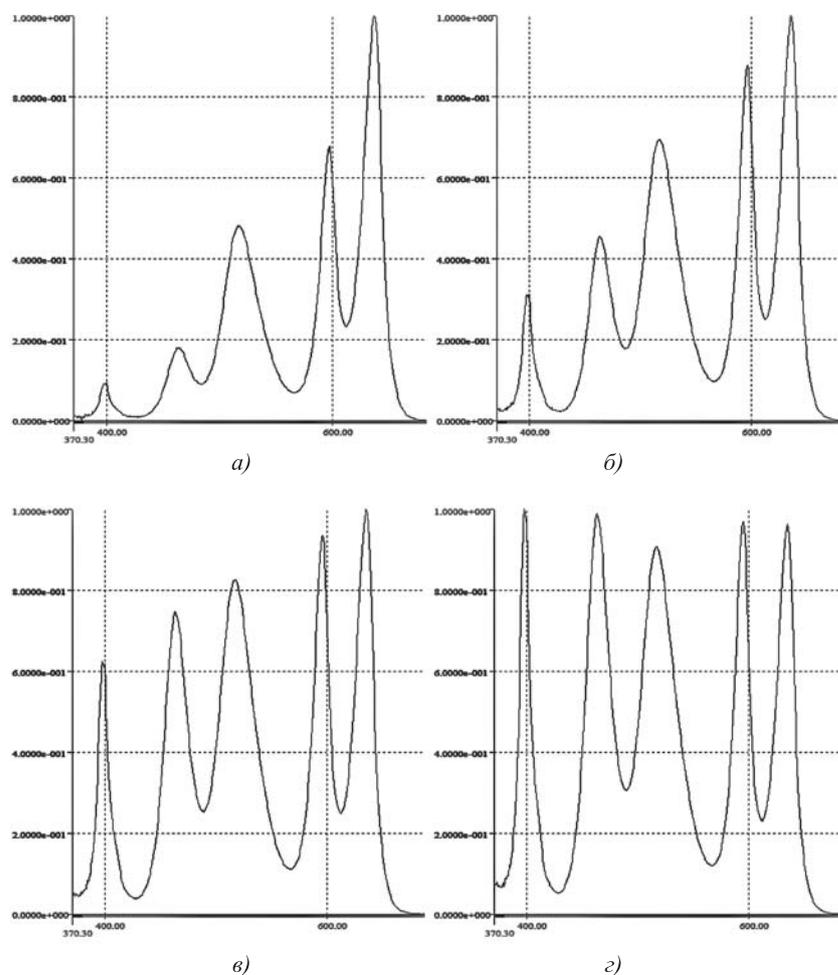


Рис. 2. Спектры излучения групп светодиодов, излучающих свет с цветовыми температурами 3000 К (а), 4000 К (б), 5000 К (в) и 6000 К (з)

ИС, которые будут излучать свет с требуемыми длинами волн, что, как правило, не представляет особой трудности. Однако выполнить расчёт колориметрических характеристик разрабатываемого светильника, а именно, выделить диапазон цветовых температур, который сможет воспроизводить разрабатываемый СП, построить кривую зависимости индекса цветопередачи от цветовой температуры, а также подсчитать требуемое число светодиодов, излучающих свет с определёнными длинами волн, является достаточно сложной задачей, что обусловливается отсутствием соответствующих программных средств.

Методика расчёта колориметрических характеристик СП с изменяемым спектром излучения. При расчёте традиционных СП требуемое число ИС определяется в зависимости от того, какой суммарный световой поток должен излучать СП, а также от того, какой световой поток излучает один ИС. Рассчитать число ИС для СП с изменяемым спектром излучения, имея лишь описанные выше данные, не получится, так как при разных режимах работы СП разные группы ИС будут излучать различные световые потоки. Таким образом, для расчёта необходимого числа ИС для каждой группы необходимо определить, какой максимальный световой поток должна давать та или иная группа ИС с учётом всех режимов работы СП.

Кроме того, прежде чем приступить к расчёту числа ИС, необходимо убедиться, что используя выбранные типы ИС, можно получить свет с заданными характеристиками. Для этого следует, виртуально изменяя уровни интенсивности излучения отдельных групп ИС, фиксировать значения цветовой температуры и максимальное значение индекса цветопередачи. Затем по полученным данным надо построить кривую зависимости максимального значения индекса цветопередачи от цветовой температуры излучаемого СП света (рис. 3). Используя полученную кривую, следует убедиться в том, что СП способен воспроизвести свет с заданными характеристиками, в противном случае необходимо изменить тип отдельных групп ИС либо добавить дополнительные группы ИС другого типа и провести расчёты заново.

Убедившись, что используя выбранные группы ИС, возможно получить свет с заданными характеристиками, можно приступить к определению числа ИС в каждой группе. Для этого, виртуально изменяя интенсивности излучения отдельных групп ИС, поддерживая

значения индекса цветопередачи и цветовой температуры в соответствии с ранее построенной кривой зависимости индекса цветопередачи от цветовой температуры, «проходят» по всему участку кривой, удовлетворяющему требованиям к разрабатываемому светильнику, фиксируя при этом световой поток, излучаемый каждой группой ИС. В результате для каждой группы ИС строят свою кривую зависимости мощности излучения от цветовой температуры при максимальном значении индекса цветопередачи (рис. 4). По полученным кривым определяют максимальный световой поток, излучаемый каждой группой ИС. Исходя из полученных значений светового потока выполняют расчёт числа ИС в каждой группе.

Алгоритм расчёта колориметрических характеристик СП с изменяемым спектром излучения. Исходя из описанной методики можно сформировать алгоритм, который послужит основой для написания программного продукта, позволяющего выполнить описанные выше расчёты.

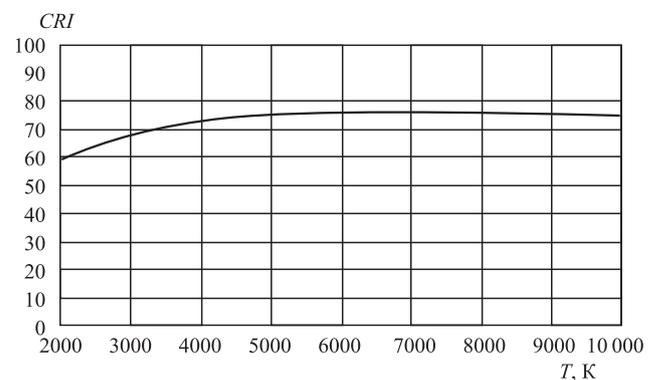


Рис. 3. Зависимость максимального значения индекса цветопередачи CRI от цветовой температуры T

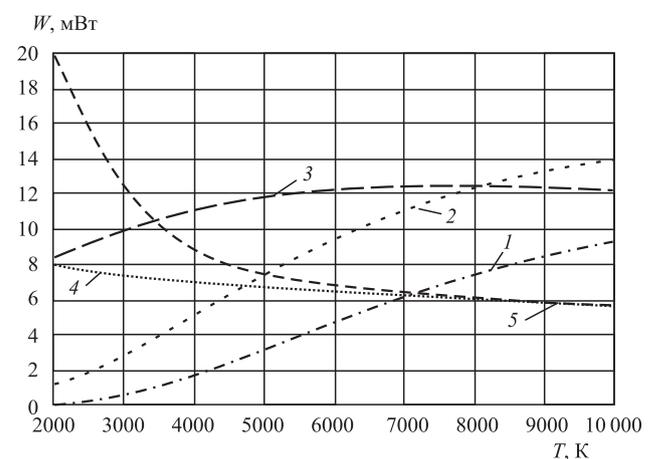


Рис. 4. Зависимости мощности излучения W от цветовой температуры T для разных составляющих цветового спектра:

1 — фиолетовый цвет; 2 — синий; 3 — зеленый; 4 — желтый; 5 — красный

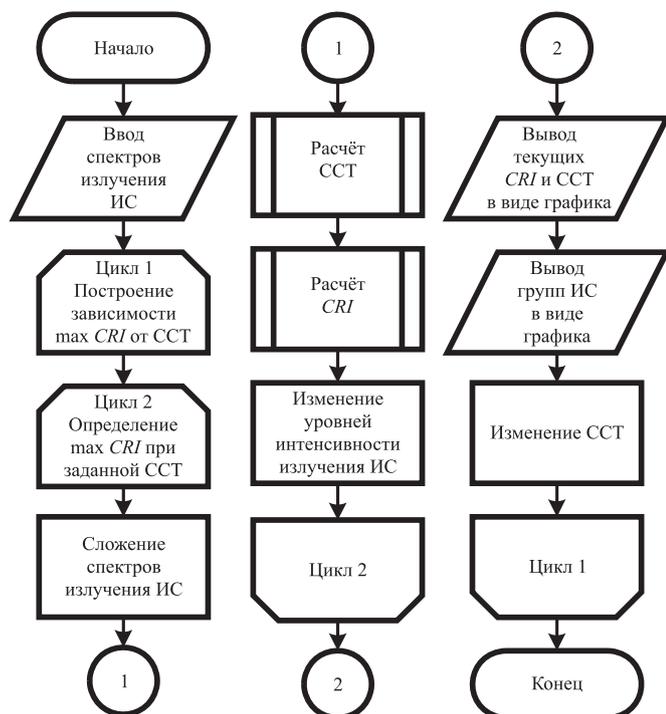


Рис. 5. Алгоритм построения кривых, отображающих взаимосвязь светового потока, цветовой температуры и максимального индекса цветопередачи для каждой группы светодиодов

Разработанный алгоритм можно представить в следующем виде (рис. 5):

1. Загрузка в программу заранее измеренных при максимальном токе питания спектров излучения каждого типа ИС.

2. Построение кривой зависимости максимального значения индекса цветопередачи CRI от цветовой температуры (CCT). Для этого необходимо определить максимальное значение CRI при различных значениях CCT , для чего нужно циклически изменять уровни интенсивности излучения ИС разных групп и контролировать значения CCT и CRI .

3. Построение кривых зависимости интенсивностей излучения отдельных групп ИС от цветовой температуры. Для этого необходимо, циклически изменяя интенсивности излучения отдельных групп ИС, поддерживать значения CRI и CCT в пределах ранее построенной кривой зависимости CRI от CCT , «пройти» по всему участку кривой, удовлетворяющему требованиям к разрабатываемому СП, при этом фиксировать световой поток, излучаемый каждой группой ИС.

4. Расчёт требуемого числа ИС каждого типа, исходя из ранее построенных кривых и учитывая мощность и световой поток, излучаемый каждым типом используемых ИС.

Заключение. Недавно появившиеся на рынке светодиодные источники света, обладающие большой яркостью и способные излучать свет в узких диапазонах длин волн, позволяют создавать уникальные по своему дизайну и характеристикам световые приборы. Однако для создания СП нового поколения, способных изменять не только интенсивность излучаемого светового потока, но и спектр излучаемого света, требуются соответствующие программные средства. Предложенные методика и алгоритм расчёта СП могут послужить основой для разработки программных продуктов, необходимых для расчёта колориметрических параметров СП с изменяемым спектром излучения.

Использование СП с изменяемым спектром излучения позволит изменить стандартные представления об освещении. Применяя подобные СП для освещения картинных галерей, музеев, выставочных павильонов и т. п., можно добиться гармонии света с интерьером помещения, а также представить выставочные экспонаты зрителю в наилучшем для восприятия виде. Регулирование цветовой температуры излучаемого светильниками света будет способствовать поддержанию циркадных ритмов в организме человека. Использование таких светильников в зонах отдыха, гостинных, комнатах для переговоров и других подобных помещениях позволит изменять их светоцветовую среду, что, в свою очередь, позволит создать благоприятную атмосферу как для отдыха, так и для работы.

Библиографические ссылки

1. Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е. Полихромные спектрально-перестраиваемые осветительные приборы со светодиодами: опыт разработки и применения // Светотехника. 2013. № 5–6. С. 34–39.
2. Ван Боммель В. Качество освещения и энергоэффективность: критический обзор // Светотехника. 2011. № 1. С. 6–11.
3. Внукова О. Освещение офисных пространств с учетом суточных биоритмов человека // Полупроводниковая светотехника. 2014. № 5. С. 24–25.
4. Иванов З. Применение биодинамических систем освещения в осветительных установках // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: Сб. науч. тр. X Междунар. науч.-техн. конф., Саранск, 13–14 декабря 2012 г. Саранск, СВМО, 2012. С. 115–119.
5. Шанда Я. Что такое точность воспроизведения цвета в музейном освещении // Светотехника. 2014. № 5. С. 23–27.



УДК 004.023; 004.891.3

О.И. Моногаров

(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

Olegmngarv@rambler.ru

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МЕТОДА
СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЭКСТРЕМУМОВ**

Рассмотрена проблема селекции сигналов частичных разрядов (ЧР) при испытании кабельной изоляции, обусловленная ошибками наложения импульсов. Проанализированы существующие способы снижения данного негативного воздействия, выявлены их достоинства и недостатки. Для решения проблемы разработан интеллектуальный метод селекции сигналов ЧР на основе анализа последовательности экстремумов, который имитирует способность человеческого мозга различать наложение импульсов и позволяет извлекать из сигнала ранее недоступную информацию, что значительно повышает достоверность диагностики.

Ключевые слова: частичные разряды; кабель; изоляция; наложение импульсов; селекция; экстремумы.

The problem of partial discharge (PD) signal selection during cable insulation testing, caused by errors of impulse overlapping, is considered. The existing ways of reducing this negative impact are analyzed; their advantages and disadvantages are detected. For problem decision, an intellectual method of PD signal selection based on the extremums sequence analysis is developed, which simulates the ability of the human brain to distinguish impulse overlapping and allows extracting previously inaccessible information from the signal, which significantly increases the reliability of diagnosis.

Keywords: partial discharges; cable; insulation; impulse overlapping; selection; extremums.

Определение дефектов в электрической изоляции методом частичных разрядов является одним из наиболее эффективных способов дефектоскопии. Частичный разряд согласно ГОСТ Р 55191—2012 [1] — это «электрический разряд, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами». Метод частичных разрядов достаточно распространён, используется для диагностики различных изоляционных конструкций и применяется при контроле качества изготовления кабельной изоляции.

Основными проблемами измерения уровня ЧР являются присутствие в зарегистрированном сигнале большого уровня помех и наложение одного сигнала на другой. При испытании кабельной изоляции в заводских условиях, как правило, удаётся устранить большинство помех аппаратными методами. К ним относятся:

- проведение измерений в камере Фарадея;
- применение отдельного заземляющего устройства для измерительной схемы;
- включение в питающую цепь индуктивных элементов;
- погружение концов испытуемого кабеля в кабельные стаканы, наполненные маслом.

Однако проблема наложения импульсов сигналов ЧР остаётся нерешённой. В стандарте [1], являющимся российским переводом известного международного нормативного документа IEC 60270, указано, что ошибка измерения возникает, когда интервал времени между входными импульсами тока меньше, чем время реакции на одиночный импульс. Ошибка от наложения импульсов может добавляться или вычитаться в зависимости от частоты их повторения. Такие ошибки могут достигать 100 % и более в зависимости от частоты следования импульсов и характеристик измерительной системы. Проблема наложения импульсов также упоминается в работах [2] и [3].

В настоящее время для решения поставленной проблемы используются следующие методы:

- применение конечного импеданса, что позволяет исключить отражение волн от противоположного конца кабеля;
- применение подавителя отражений;
- увеличение времени разрешения импульса посредством сужения ширины полосы пропускания измерительной схемы;
- анализ вейвлет-спектра осциллограмм импульсов.

Однако предложенный инструментарий для устранения ошибок наложения является недостаточным. Первые два метода направлены на подавление отражённых импульсов от противоположного конца кабеля, но они не могут помочь при наложении оригинальных импульсов ЧР. Третий метод также не является оптимальным решением, так как с увеличением времени разрешения теряется информация об амплитуде сигнала, что может привести к неверным выводам о величине кажущегося ЧР. Четвёртый метод рассмотрен В.А. Русовым в работе [3], однако о практическом его применении неизвестно. Это вызвано тем, что веивлет-спектр обладает большим объёмом избыточной информации о сигнале, и его анализ для определения наложения импульсов потребует создания довольно громоздкого и запутанного алгоритма.

Разработанный автором метод позволяет устранить указанные недостатки. В основе метода лежит анализ последовательности экстремумов импульсов, имитирующий способность человеческого мозга различать наложения сигналов, качественная форма которых известна априори. В работе [3] она описывается следующим образом: «Мы автоматически приходим к выводу, что непосредственно к частоте импульса частичного разряда в зоне дефекта имеет отношение только его передний фронт, который в наибольшей мере соответствует частотным свойствам разряда. Всё остальное в сигнале относится к электромагнитным свойствам среды вокруг зоны дефекта». Справедливость данного представления о форме импульсов ЧР подтверждает и Г.С. Кучинский в работе [4] при описании процессов их регистрации: «В дальнейшем напряжение на объекте восстанавливается за счёт подтекания заряда от источника напряжения и других ёмкостей схемы, к которой подключён испытуемый объект. Это приводит к возникновению высокочастотных колебаний в схеме, регистрация которых специальными измерительными устройствами позволяет исследовать характеристики ЧР в изоляции». На основании изложенного можно сделать вывод о том, что регистрируемый импульс ЧР имеет крутой передний фронт, который в наибольшей степени связан с разрядными процессами внутри дефекта, и затухающую колебательную составляющую, форма которой обусловлена электромагнитными свойствами измерительной схемы.

При анализе мыслительной деятельности человека по различению наложений описанных сигналов было обнаружено, что в первую очередь человек обращает внимание на несоответствие в

значениях последовательности экстремумов, при этом ему достаточно трудно, даже приблизительно, указать отсчёт сигнала, в котором возникает наложение. В связи с этим метод селекции сигналов ЧР строится на последовательном сравнении ожидаемых и реальных значений экстремумов сигнала. В случае обнаружения несоответствия проводятся экстраполяция (начиная с некоторого доверенного значения экстремума) и вычитание первого импульса. Оставшуюся часть повторно анализируют таким же образом.

Работу метода селекции сигналов ЧР на основе анализа последовательности экстремумов можно разбить на несколько этапов:

I. Поиск экстремумов в выделенном сигнале.

II. Проверка первых двух экстремумов.

III. Построение аппроксимирующей функции и экстраполяция в точке следующего экстремума.

IV. Регистрация наложения импульсов при превышении допустимого порога ошибки.

V. Экстраполяция первого импульса на всю область сигнала с последующим вычитанием.

Поясним работу метода на примере. Рассмотрим осциллограмму сигнала, представленную на рис. 1.

На ней зарегистрированный импульс имеет неправильную последовательность экстремумов. Оценивая её, человек мог бы заключить, что до четвертого экстремума включительно форма сигнала ещё напоминает затухающую осциллирующую функцию, а на пятом — уже не соответствует ожидаемому представлению. Сопоставим наши ожидания с работой метода поэтапно.

I. *Поиск экстремумов в выделенном сигнале.* Выделим сигнал из общей осциллограммы. Для этого преобразуем её методом скользящей средней и найдём номера отсчётов, ограничивающие область со значениями выше определённого порога, оптимальным значением которого является величина, двукратно пре-

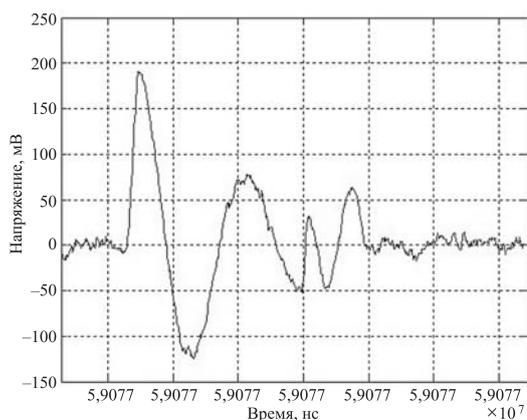


Рис. 1. Осциллограмма анализируемого сигнала

вышающая среднее арифметическое значение шумовой составляющей. Заметим, что при обработке сигнала используются только абсолютные величины.

В качестве экстремумов сигнала используются аппроксимационные экстремумы. Для этого в выделенной области с некоторым итерационно увеличивающимся шагом по методу наименьших квадратов строятся аппроксимирующие многочлены второй степени. При образовании изгиба такой функции определяется отсчёт, на котором он произошёл, после чего по нему определяется значение сигнала. На новой итерации построение аппроксимации начинается уже не с начала сигнала, а с предыдущего экстремума. Результат работы метода на данном этапе представлен на рис. 2.

Как видно из рисунка, описанные процедуры позволяют довольно точно найти точки экстремума в зашумлённом сигнале. Перейдём к следующему этапу.

II. Проверка первых двух экстремумов. Для перехода к дальнейшему анализу необходимо отсутствие наложений в определённой начальной области сигнала, в противном случае ни человек, ни компьютер просто не смогут составить представление о его поведении в будущем. Чтобы иметь возможность экстраполировать сигнал, величина этой области должна содержать как минимум два начальных экстремума, удовлетворяющих следующим требованиям:

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(Y_1) &\neq \operatorname{sgn}(Y_2); \\ |Y_1| &> |Y_2|; \\ |P_1''(Y_1)| &> |P_2''(Y_2)|, \end{aligned}$$

где Y_1, Y_2 — y -координаты первого и второго экстремумов; P_1, P_2 — функции аппроксимирующих многочленов.

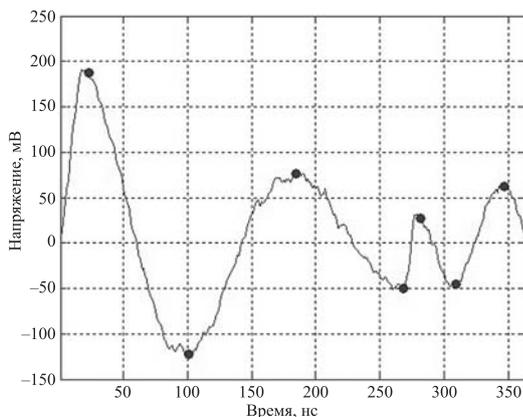


Рис. 2. Выделенный сигнал с точками экстремума

III. Построение аппроксимирующей функции и экстраполяция в точке следующего экстремума. На данном этапе производится конструирование аппроксимирующей, а впоследствии и экстраполирующей функции для локального участка сигнала, ограниченного соседними экстремумами. Вопрос экстраполяции здесь особенно важен, так как он не позволяет использовать обычные степенные полиномы. Эти функции могут отлично аппроксимировать сигнал в выделенной области, но поскольку они не содержат в себе колебательной составляющей, то и не могут адекватно проводить экстраполяцию затухающей осциллирующей функции. Для решения поставленной задачи можно применить функцию следующего вида:

$$y = k_1 \cos(k_2 x) \exp(k_3 x).$$

Теперь необходимо определить коэффициенты k_1, k_2 и k_3 . Использование в этом случае метода наименьших квадратов является нерациональным, так как коэффициент k_2 нельзя вынести из функции косинуса, что приводит к необходимости решать систему нелинейных уравнений. Решение её производится итерационными методами и требует больших вычислительных затрат, которые будучи умноженными на количество анализируемых импульсов, приведут к значительному увеличению времени анализа данных измерения. Поэтому искомые коэффициенты определим с помощью найденных точек экстремума.

Пусть в выделенной локальной области сигнала первый отсчёт будет нулевым, тогда функции косинуса и экспоненты дадут в этой точке единицу, а коэффициент k_1 будет равен амплитуде первого экстремума.

Коэффициент k_2 равен угловой частоте колебательной составляющей. Выразим его через полупериод

$$k_2 = \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = \frac{\pi}{T_{0,5}},$$

где ω — угловая частота; f — циклическая частота; T — период колебаний; $T_{0,5}$ — полупериод колебаний.

Значение полупериода колебаний можно получить, найдя разность по количеству отсчётов между соседними экстремумами, образующими локальную область.

Далее определим коэффициент k_3 . Известно, что вклад колебательной составляющей в точках экстремума равен единице, поэтому её можно не учитывать, а исследовать

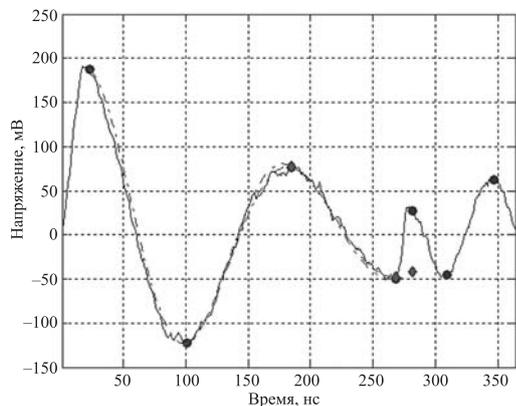


Рис. 3. Графики исходного сигнала и аппроксимирующих функций в локальных областях

только экспоненциальную составляющую. Решив приведённое ниже уравнение, найдём k_3 :

$$k_3 = \frac{1}{X_2} \ln \left(\frac{Y_2}{k_1} \right),$$

где X_2 — x -координата второго экстремума.

После того, как все коэффициенты будут найдены, строим в локальной области аппроксимирующую функцию и экстраполируем её в следующую точку экстремума, в результате чего получаем ожидаемое значение сигнала. Данная операция повторяется для каждой последующей пары экстремумов. Результат работы этого этапа представлен на рис. 3.

Из рисунка видно, насколько близки предполагаемые и реальные значения сигнала до четвёртого экстремума включительно, при этом в пятой точке обнаруживается существенное расхождение, которое говорит о наложении стороннего импульса где-то между четвёртым и пятым экстремумами.

IV. Регистрация наложения импульса при превышении допустимого порога ошибки. Для оценки уровня допустимой ошибки между

реальными и предполагаемыми значениями сигнала используется наибольшая величина из уровня шума и ошибки аппроксимации. Если этот порог превышен, то регистрируется наложение стороннего импульса. Затем снимают необходимые параметры первого импульса, из которых выделяют только его амплитуду и крутизну переднего фронта, как основные характеристики формы ЧР.

V. Экстраполяция первого импульса на всю область сигнала с последующим вычитанием. Для выполнения этой процедуры выделяем локальную область, начиная с экстремума под номером $(i - 2)$ до конца осциллограммы, где i — номер экстремума, на котором было выявлено несоответствие ожидаемого и реального значений сигнала. Затем достраиваем в ней аппроксимирующую функцию и вычитаем из основного сигнала. Результат данной операции представлен на рис. 4.

Получившийся на рис. 4, б импульс может быть обработан таким же образом, как и оригинальный сигнал, однако при его выделении необходимо уже учитывать ошибку аппроксимации.

Как видно из полученных результатов, оценки в обнаружении областей наложения сторонних импульсов человека и разработанного метода селекции сигналов ЧР на основе анализа последовательности экстремумов совпадают. Однако последний дополнительно позволяет вычистить из исходной осциллограммы продолженный первый импульс и получить представление о форме оставшейся части сигнала с возможностью повторного анализа. Таким образом, разработанный метод может не только полностью заменить аналитическую работу человека в данном вопросе, но и предоставить для анализа большой объём скрытой информации, недоступной изначально.

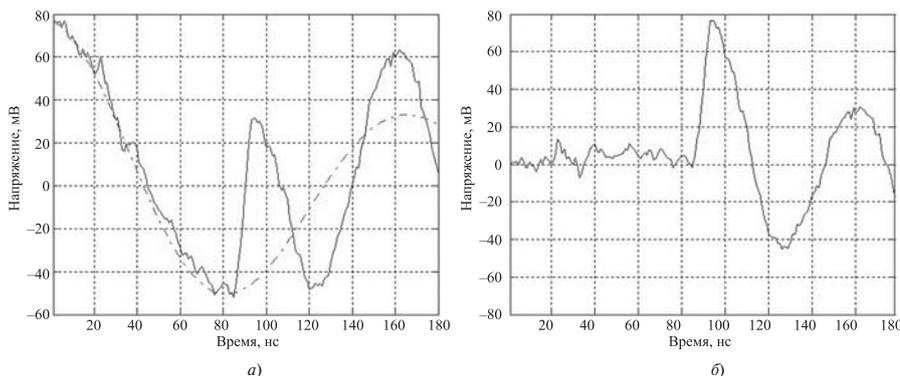


Рис. 4. Локальные области исходного сигнала:

а — с экстраполяцией аппроксимирующей функции; *б* — с вычитанием аппроксимирующей функции из основного сигнала

Библиографические ссылки

1. ГОСТ Р 55191—2012. Методы испытания высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. М.: Стандартинформ, 2014. 47 с.
2. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.
3. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Екатеринбург: ОАО «ИПП Уральский рабочий», 2011. 369 с.
4. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.

УДК 621.396.96: 551.508.855

С.А. Исаев, д-р техн. наук, проф.

(ЗАО НПП «Топаз», г. Москва),

А.Н. Детков, д-р техн. наук, проф.

(ОАО «Бортовые аэронавигационные системы», г. Москва),

А.А. Безуглов

(Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова, г. Ахтубинск)

mail@topazlab.ru, info@ians.aero

ЦИФРО-НАТУРНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ БЛИЖНЕЙ АЭРОДРОМНОЙ ЗОНЫ

На основе цифро-натурного метода предложен новый подход к автоматизации испытаний метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны, позволяющий сократить количество натуральных экспериментов, мест их проведения, а также повысить достоверность оценок и оправдываемость характеристик таких комплексов.

Ключевые слова: цифро-натурный метод; метеорологические радиолокационные комплексы; натурные эксперименты; моделирование.

A new approach to automation the testing of meteorological radar complexes of the near aerodrome zone is proposed on the basis of the digital-natural method. This approach allows to reduce the number of full-scale experiments and their locations, and to increase the reliability of estimates and the trustworthiness of such complexes characteristics.

Keywords: digital-natural method; meteorological radar complexes; natural experiments; modeling.

Достоверность, сроки и стоимость оценок характеристик радиолокационных систем определяются в первую очередь путём проведения испытаний. Все методы испытаний условно можно разделить на теоретические и натурные [1]. Для определения вероятностных характеристик сложных технических систем [2], к которым относятся метеорологические радиолокационные комплексы ближней аэродромной зоны (МРЛК) [3], обычно применяются комбинированные методы, основу которых применительно к МРЛК составляют натурные и модельные эксперименты [4].

Условия проведения экспериментов, представляющих i -ю комбинацию факторов, можно описать вектором

$$\mathbf{A}^{(i)} = [\alpha_1^{(i)} \quad \alpha_2^{(i)} \quad \dots \quad \alpha_S^{(i)}]^T,$$

где S — число влияющих факторов; T — операция транспонирования.

В ходе натуральных (модельных) экспериментов в i -х условиях на вход МРЛК воздействует p -мерный вектор входных сигналов, т. е. влияющие факторы оказывают воздействие на МРЛК через входные сигналы

$$\mathbf{X}^{(i)}(t) = \mathbf{X}(t, \mathbf{A}^{(i)}),$$

где $\mathbf{X}^{(i)}(t) = [x_1^{(i)}(t) \quad x_2^{(i)}(t) \quad \dots \quad x_p^{(i)}(t)]^T$.

В результате воздействия вектора входных сигналов на выходе МРЛК формируется матрица выходных сигналов $\mathbf{Y}^{(i)}$ размером $n \times b \times l$:

$$\mathbf{Y}^{(i)}(t) = \mathbf{F}_Y[\mathbf{X}(t, \mathbf{A}^{(i)})], \quad (1)$$

где n — число каналов дальности; b — число доплеровских каналов в каждом канале дальности; l — число угломестных каналов при секторном обзоре.

При выполнении j -го эксперимента в i -х условиях каждой реализации матрицы выходных сигналов $\mathbf{Y}^{(i)}(t_k)$ соответствует конкретная реализация значений радиолокационной отражаемости, радиальной скорости, ширины спектральной плотности радиальных скоростей и т. д.:

$$\mathbf{z}_j^{(i)}(t_k) = f_Z[\mathbf{Y}^{(i)}(t_k), j], \quad (2)$$

где t_k — дискретное время с интервалом дискретизации, равным периоду повторения импульсов.

Из-за случайного характера входных сигналов наблюдения $\mathbf{z}_j^{(i)}(t_k)$, полученные в натурном или модельном экспериментах, представляют собой выборки некоторых генеральных совокупностей, имеющих законы распределения $W_j^{(i)}(\mathbf{z})$. В соответствии с заданными критериями показатели характеристик МРЛК, подлежащие оценке, — это параметры законов распределения генеральных совокупностей, которым принадлежат выбор-

ки (наблюдения), получаемые в ходе натуральных или модельных экспериментов. Такими параметрами являются начальные моменты первого порядка — математические ожидания m_{z_j} , центральные моменты второго порядка — $\sigma_{z_j}^2$ (среднеквадратичные отклонения σ_{z_j}), а также оценки спектральной плотности доплеровских скоростей G_{z_j} исходных реализаций.

Задача испытаний МРЛК заключается в оценке параметров законов распределения характеристик МРЛК на основании выборок из соответствующих генеральных совокупностей. Из-за неоднородности оцениваемых характеристик и априорного незнания корреляционной зависимости между ними отсутствует возможность получения выигрыша в точности оценки за счёт совместной обработки наблюдений различных характеристик. Поэтому оценим параметры плотности распределения одной обобщённой характеристики.

Если применяется выборка, взятая из нормальной генеральной совокупности, то достаточно оценить математическое ожидание и дисперсию. Если выборка взята из распределения, отличного от нормального, то необходимо оценить ещё две величины — асимметрию и эксцесс. Однако оценка этих величин, основанная на вычислении третьего и четвёртого моментов, сопряжена с большими ошибками. Поэтому на практике обычно ограничиваются оценками математического ожидания и дисперсии, т. е. законы распределения характеристик МРЛК, если это не противоречит физической сущности явлений, можно аппроксимировать гауссовским законом [5].

Наблюдения радиолокационных сигналов, получаемых в ходе натуральных (модельных) экспериментов, можно представить в виде дискретного процесса, описываемого уравнением

$$\mathbf{z}_j^{(i)}(t_k) = \mathbf{m}_{z_j}^{(i)}(t_k) + \boldsymbol{\varepsilon}_{z_j}^{(i)}(t_k),$$

где $\mathbf{m}_{z_j}^{(i)}$ — вектор математических ожиданий; $\boldsymbol{\varepsilon}_{z_j}^{(i)}(t_k)$ — векторный случайный процесс с характеристиками $\mathbf{M}\{\boldsymbol{\varepsilon}_{z_j}^{(i)}(t_k)\} = 0$, $\mathbf{M}\{\boldsymbol{\varepsilon}_{z_j}^{(i)}(t_q)\boldsymbol{\varepsilon}_{z_j}^{(i)}(t_r)\} = \mathbf{D}_z^{(i)}\delta_{qr}$; $\mathbf{D}_z^{(i)}$ — матрица дисперсий плотности распределения характеристик МРЛК; $\mathbf{M}\{\}$ — операция усреднения по множеству реализаций; δ_{qr} — символ Кронекера.

Динамика изменения параметров распределения радиолокационной отражаемости от i -х условий можно описать выражениями:

$$\mathbf{m}_{z_j}^{(i+1)} = \Phi_m(i+1, i, \mathbf{m}_{z_j}^{(i)});$$

$$\mathbf{D}_z^{(i+1)} = \Phi_D(i+1, i, \mathbf{D}_z^{(i)}),$$

где $\Phi_m(\cdot)$ и $\Phi_D(\cdot)$ — функции своих аргументов, позволяющие определить параметры распределения характеристик МРЛК в $(i+1)$ -х условиях, если известны их значения в i -х условиях.

Целевая задача испытаний МРЛК — нахождение оптимальных по заданному критерию оценок $\hat{\mathbf{m}}_{z_j}^{(i)}$ и $\hat{\mathbf{D}}_{z_j}^{(i)}$, а также оценок спектральной плотности радиальных скоростей исходных реализаций — $\hat{\mathbf{G}}_{z_j}^{(i)}$ в условиях $i \in I$ на основании наблюдений, полученных в натуральных и модельных экспериментах.

Основной научной проблемой испытаний является обеспечение достаточной адекватности натуральных и в первую очередь модельных экспериментов (вследствие их низкой достоверности) реальным условиям применения МРЛК.

При наличии адекватных моделей в основу испытаний можно положить комбинированный принцип их организации. Программа испытаний МРЛК должна составляться как единое целое и включать в себя пункты, подлежащие проверке путём моделирования и при проведении натуральных экспериментов. Причём центр тяжести оценки МРЛК необходимо перенести на моделирование, которое должно стать надёжным барьером, чтобы не допустить на натурные испытания недоведённую технику. В результате только число незачётных натуральных экспериментов снизится на 20...30 % и сократятся сроки проведения испытаний.

Однако в настоящее время ни одна модель не даёт возможности получить с требуемой достоверностью необходимую информацию для оценки ГТХ и параметров МРЛК, которая позволила бы судить о качестве системы, проанализировать её работу в каждой конкретной ситуации. Эта задача не будет выполняться до тех пор, пока не появятся в достаточной степени универсальные, отработанные и выверенные модели метеорологических явлений (МЯ).

Таким образом, для внедрения моделирования необходимо создание моделей с высокой степенью достоверности, опираясь на которые можно было бы давать оценку МРЛК в целом. В первую очередь необходимо создать адекватные модели МЯ, так как в дальнейшем в системе будут производиться чисто математические операции в рамках математического обеспечения МРЛК. Такой подход позволит уже перед началом натуральных испытаний иметь практически всю необходимую информацию о работе МРЛК, а каждый натуральный эксперимент будет

проводиться только в целях уточнения уже имеющихся данных. Оптимальное сочетание моделирования и натурального эксперимента позволяет перейти к принципиально новым видам испытаний, а именно цифро-натурным [4, 5].

Цифро-натурный метод испытаний МРЛК обеспечивает максимальную эффективность процесса испытаний за счёт:

трансформирования методик проведения лётного эксперимента с учётом совершенствования вычислительной техники, применяемой при испытаниях;

ориентации на построение моделей МЯ и их привлечение к оценке классификации МЯ испытываемого МРЛК;

решения задач испытаний в интересах системы более высокого ранга;

максимального использования априорной информации, полученной на всех предыдущих этапах жизненного цикла МРЛК (модели МЯ, модели сигналов, априорные оценки характеристик МРЛК);

выполнения минимально возможного количества натуральных экспериментов в целях оценки функционирования МРЛК в целом, получения единичных высокоинформативных наблюдений и записи голограмм сигналов и данных МРЛК в различных условиях, применения математического и полунатурного моделирования для получения достаточного количества наблюдений, необходимого для оценки характеристик МРЛК с заданной точностью;

максимальной автоматизации труда инженеров-испытателей в целях сокращения временных затрат при подготовке и выполнении натурального эксперимента, сборе и обработке метеорологической информации, моделировании и анализе результатов.

В соответствии с разработанным цифро-натурным методом испытаний [5] процесс оценки характеристик МРЛК включает в себя следующие операции.

1. *Методическая подготовка.* В процессе методической подготовки разрабатывается (уточняется) критерий оценки характеристик МРЛК, определяются факторное пространство и условия проведения экспериментов, анализируются особенности функционирования МРЛК в различных условиях, уточняется перечень сигналов, подлежащих регистрации, а также определяются условия, в которых характеристики входных сигналов остаются неизменными. В этом процессе используется априорная информация, полученная на всех предыдущих этапах создания МРЛК, и учитывается опыт испытаний МРЛС других типов.

2. *Преднатурное моделирование.* На этом этапе определяются ожидаемые значения оцениваемых характеристик в различных условиях. В ходе преднатурного моделирования применяются модели МЯ и модели сигналов, разработанные на этапах формирования научно-технического задания, эскизного и технического проектирования и уточнённые на этапе наземной отработки МРЛК. Под моделью МЯ понимается совокупность моделей её элементов (блоков, модулей, алгоритмов).

3. *Факторный анализ.* Здесь оценивается степень влияния различных факторов на значения оцениваемых характеристик. Исходя из степени влияния этих факторов, определяются минимально необходимый набор влияющих факторов и функциональная зависимость оцениваемых характеристик от уровней этих факторов. С учётом этих факторов формируется план выполнения испытательных экспериментов, определяющий условия, при которых осуществляются натурные эксперименты $i \in I_n$ и проводится сбор статистических данных, а также условия, при которых оценки характеристик определяются методом интерполяции $i \notin I_n$. На основе плана испытаний составляется задание на натуральный эксперимент.

4. *Натурные эксперименты.* Основным назначением этих экспериментов являются оценка функционирования МРЛК в целом в реальных условиях её применения ($i \in I_n$, где I_n — область условий, в которых проводятся натурные эксперименты), получение необходимого объёма наблюдений при оценке характеристик, требующих сбора статистических данных, а также запись голограмм сигналов и данных.

5. *Первичная обработка информации, полученной в натурном эксперименте.* Эта операция включает в себя:

ввод зарегистрированной информации в накопители автоматизированного рабочего места оператора МРЛК;

оценку качества информационных файлов и устранение сбоев информации;

экспресс-анализ, на основании которого принимается решение о зачётности натуральных экспериментов;

импульсно-доплеровскую обработку, быстрое преобразование Фурье, медианную фильтрацию, суммирование мощности, измерение радиальной скорости;

оценку характеристик и режимов, не требующих сбора статистики и вторичной обработки;

подготовку данных для вторичной обработки и посленатурного моделирования.

6. *Вторичная обработка информации.* Операция включает в себя функциональные преобразования данных, зарегистрированных в ходе натуральных экспериментов, в частности, измерение отражаемости и параметров турбулентности, оценку скорости ветра и статистических характеристик входных сигналов. Оцениваются плотности вероятности и их параметры, корреляционные моменты, корреляционные функции и спектральные плотности флуктуационной и систематической составляющих сигналов выборок [6].

Дисперсии оценок определяются следующим образом:

дисперсия погрешности определения суммарной мощности P_{Σ} отражённого сигнала в элементе разрешения n -го канала дальности —

$$\hat{D}_{zn} = \mathbf{M}\{\hat{\varepsilon}_{zn}^2\} = 18,75 \frac{\mathbf{M}\{(P_{\Sigma} - \mathbf{M}\{P_{\Sigma}\})^2\}}{\mathbf{M}^2\{P_{\Sigma}\}} =$$

$$= 18,75 \frac{\mathbf{M}\left\{\left(\sum_{m=1}^M p_{nm} - \mathbf{M}\left\{\sum_{m=1}^M p_{nm}\right\}\right)^2\right\}}{\mathbf{M}^2\left\{\sum_{m=1}^M p_{nm}\right\}},$$

где p_{nm} — отсчёты выборочного энергетического спектра; M — количество доплеровских фильтров, в которых превышен порог обнаружения.

С учётом использования в МРЛК медианной фильтрации и аппроксимации отсчётов p_{nm} экспоненциальным распределением, \hat{D}_{zn} имеет вид

$$\hat{D}_{zn} \cong 18,75 \frac{\sum_{m=0}^{K-1} \frac{1}{(K-m)^2}}{\mathbf{M}\left(\sum_{m=0}^{K-1} \frac{1}{K-m}\right)^2},$$

где K — количество отсчётов апертуры медианного фильтра;

дисперсия погрешности определения суммарной мощности P_{Σ} отражённого сигнала в элементе разрешения n -го канала дальности с учётом ослабления на трассе распространения —

$$\hat{D}_{zn}^{(\gamma)} \cong \frac{4,33}{1 - 0,218D^2\gamma^2(Z)} \frac{\sum_{m=0}^{K-1} \frac{1}{(K-m)^2}}{\mathbf{M}\left(\sum_{m=0}^{K-1} \frac{1}{K-m}\right)^2},$$

где $\gamma(Z)$ — удельное ослабление в текущем канале дальности, дБ/км; δD — разрешающая способность МРЛК по наклонной дальности;

дисперсия погрешности определения радиальной скорости —

$$\sigma_V^2 \cong 0,29\delta_V\Delta_V,$$

где δ_V — ширина полосы пропускания доплеровского фильтра на уровне 3 дБ; Δ_V — ширина спектральной плотности радиальной скорости на уровне 3 дБ;

дисперсия погрешности определения ширины спектральной плотности радиальной скорости —

$$\sigma_{\Delta_V}^2 \cong 0,14\delta_V\Delta_V.$$

7. *Третичная обработка информации.* Операция включает в себя построение профилей и сечений, классификацию опасных метеорологических явлений на основе контурирования и сегментации, расчёт изолиний и контуров, индикацию метеоданных.

8. *Формирование моделей входных сигналов.* Способ формирования зависит от вида применяемого моделирования. Математические модели радиолокационных сигналов, отражённых от различных метеорологических целей, формируются при цифровом (математическом) моделировании на полунатурном стенде МРЛК, который применяется для оценки характеристик МРЛК. В этом случае в качестве статистических характеристик сигналов используются оценки соответствующих характеристик реальных сигналов от МЯ. Статистические характеристики таких сигналов определяются на основании анализа выходных сигналов МРЛК.

9. *Посленатурное моделирование.* Проводится на стенде полунатурного моделирования МРЛК в целях идентификации характеристик МЯ, полученных МРЛК в ходе натуральных экспериментов и моделирования. На входе МРЛК формируются входные сигналы и данные, полученные в ходе моделирования. В случае идентичности моделей МЯ выходные сигналы, записанные в ходе натурального эксперимента и полученные при моделировании, совпадают. При несовпадении сигналов выполняется корректировка модели МЯ, после чего проводится повторное моделирование с теми же входными воздействиями. Эта процедура повторяется до совпадения выходных сигналов и наблюдений оцениваемой характеристики, полученных в натурном эксперименте и посленатурном моделировании.

10. *Статистическое (имитационное) моделирование.* Предназначено для набора необходимого количества реализаций, обеспечивающего получение оценок параметров плотности распределения $\hat{m}_{zj}^{(i)}(q)$, $\hat{\sigma}_{zj}^{(i)}(q)$ q -й характеристики в j -м эксперименте в i -х условиях ($i \in I_n$). При статистическом моделировании на вход МРЛК подаются модели входных сигналов. В качестве истинного значения параметров $X(t)$ используется измеренная информация, а статистические характеристики моделей погрешностей $\Delta X(t)$, $E_x(t)$ равны оценкам соответствующих характеристик реальных сигналов.

11. *Оценка параметров плотности распределения характеристик МРЛК.* При синтезе алгоритмов оценки применяется гауссовская аппроксимация законов распределения характеристик МРЛК. В соответствии с синтезированными алгоритмами нахождение оптимальных оценок $\hat{m}_{zj}^{(i)}(q)$, $\hat{\sigma}_{zj}^{(i)}(q)$ по критерию максимума функции правдоподобия осуществляется по принципу уточнения оценки на $(q - 1)$ -м шаге по результатам q -го моделирования. Достоинством последовательного оценивания является возможность своевременного прекращения модельных экспериментов при достижении заданной точности оценок параметров плотности распределения характеристик МРЛК.

12. *Интерполяция оценок параметров плотности распределения характеристик МРЛК.* Необходимость интерполяции обусловлена тем, что натурные эксперименты и статистическое моделирование проводятся лишь в ограниченных условиях $i \in I_n$. Синтезированный алгоритм интерполяции позволяет определить оценки параметров распределения $\hat{m}_{zj}^{(i)}(q)$, $\hat{\sigma}_{zj}^{(i)}(q)$ во всех точках $i \in I$. При этом точность оценок в точках $i \in I_n$ возрастает. Точность интерполированных оценок возрастает с увеличением точности оценки функциональной зависимости оцениваемых параметров от изменения условий применения МРЛК.

13. *Оценка достоверности результатов моделирования.* Оценка достоверности производится в два этапа. На первом этапе по критерию исключения резко выделяющихся наблюдений с помощью правила Томпсона оценивается достоверность отдельно для каждого условия $i \in I_n$. На втором этапе оценивается достоверность моделирования совместно для всех условий $i \in I_n$ по критерию Колмогорова—Смирнова. Применение двух этапов оценки обусловлено малым числом условий

(местоположений) проведения натурных экспериментов (по одному натурному эксперименту в каждом местоположении МРЛК) $i \in I_n$, обеспечивая при этом высокую надёжность оценок характеристик МРЛК.

14. *Определение соответствия полученных оценок характеристик МРЛС требованиям ТТЗ и оценка частного показателя эффективности.* Характеристики, имеющие стохастический характер, задаются в ТТЗ, как правило, в виде математического ожидания, среднеквадратичного отклонения, квантилей различного порядка. При определении соответствия требованиям ТТЗ находятся интервальные оценки этих параметров либо допустимые интервалы, которые и сравниваются с требованиями ТТЗ. В случае несоответствия характеристик требованиям ТТЗ производится отладка аппаратуры или программного обеспечения МРЛК. По завершении программы испытаний определяется интервальная оценка частного показателя эффективности МРЛК, который позволяет получить объективную сравнительную оценку испытываемого МРЛК по отношению к другим МРЛК аналогичного назначения.

Таким образом, разработанная технологическая структура испытаний метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны цифро-натурным методом позволяет автоматизировать процесс испытаний, повысить достоверность оценки характеристик, сократить на 20...30 % сроки и стоимость разработки и испытаний МРЛС.

Библиографические ссылки

1. **Леонов И.И., Леонов С.А., Нагулино Ф.В.** и др. Испытания РЛС (оценка характеристик) / Под ред. А.И. Леонова. М.: Радио и связь, 1990.
2. **Шибанов Г.П., Артёмов Е.А., Метешкин А.А.** и др. контроль функционирования больших систем / Под ред. Г.П. Шибанова. М.: Машиностроение, 1977.
3. **Безуглов А.А., Галаева К.И., Детков А.Н.** Метеорологический радиолокационный комплекс обеспечения безопасности полётов авиации в различных климатических зонах // Полёт. 2017. № 4. С. 46—50.
4. **Исаев С.А., Кондратенков Г.С.** Цифро-натурные и лётно-модельные методы испытаний КБО // Радиотехника. 1996. № 9. С. 124—128.
5. **Исаев С.А., Клишин Ю.П.** Цифро-натурный метод оценки характеристик радиоэлектронных систем // Радиотехника. 2001. № 8. С. 61—64.
6. **Бендат Дж., Пирсол А.** Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. М.: Мир, 1989.

УДК 681.513

В.Д. Шашурин, д-р техн. наук, проф., **М.С. Селезнева**, **К.А. Неусыпин**, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

m.s.selezneva.mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АКЦЕПТОРА ДЕЙСТВИЯ НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО СИСТЕМНОГО СИНТЕЗА

Исследован акцептор действия навигационного комплекса с интеллектуальной компонентой летательного аппарата. Разработана технология формирования моделей и алгоритмического обеспечения акцептора действия, основанная на концепции динамического системного синтеза. Построение моделей погрешностей навигационных систем осуществляется в полёте с помощью алгоритма самоорганизации.

Ключевые слова: летательный аппарат; навигационный комплекс; акцептор действия; технология формирования алгоритмического обеспечения; самоорганизация.

The navigation complex action acceptor with the intellectual component of the aircraft is studied. The technology of model formation and algorithmic support of the action acceptor is developed, based on the concept of dynamic system synthesis. The construction of error models of navigation systems is carried out in flight using the self-organization algorithm.

Keywords: aircraft; navigation complex; action acceptor; technology of algorithmic support formation; self-organization.

Введение. Определение навигационных параметров летательных аппаратов (ЛА) осуществляется с помощью навигационных комплексов (НК) [1, 2]. Для получения навигационных определений перспективных ЛА применяются НК с интеллектуальной компонентой [3—6]. В соответствии с теорией функциональных систем П.К. Анохина [2, 7, 8] в качестве интеллектуальных компонент используется акцептор действия [3—5]. Реализация акцептора действия предполагает формирование алгоритмического обеспечения в рамках какой-либо концепции, например концепции системного синтеза [9—11] или динамического системного синтеза [12]. Процесс формирования алгоритмического обеспечения акцептора действия представляет собой сложную задачу, которая предполагает определение последовательности использования алгоритмов, их взаимосвязку, согласованность и трансформацию в условиях интенсивного маневрирования ЛА.

Навигационные комплексы с интеллектуальной компонентой. В терминах теории функциональных систем П.К. Анохина механизм прогнозирования и сравнения прогноза с практическим результатом работы системы называется акцептором действия [2].

НК состоит из различных навигационных систем и алгоритмического обеспечения [7]. Базовой системой НК является инерциальная

навигационная система (ИНС). Результаты обработки информации позволяют определить наилучший состав НК. НК с коррекцией ИНС в структуре представлен на рис. 1.

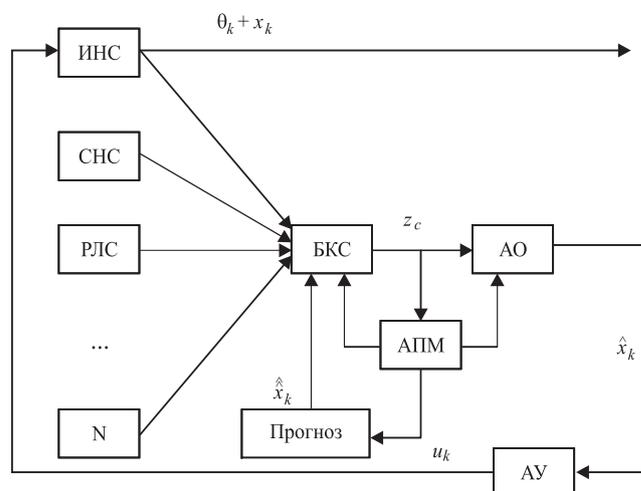


Рис. 1. Структура измерительного комплекса с коррекцией в структуре ИНС:

ИНС — инерциальная навигационная система; СНС — спутниковая навигационная система; РЛС — радиолокационная система; БКС — блок комплексирования и сравнения; АО — алгоритм оценивания; АПМ — алгоритм построения модели; Прогноз — алгоритм прогноза; АУ — алгоритм управления; θ_k — истинная навигационная информация; x_k — вектор погрешностей ИНС; z_k — вектор измерений; \hat{x}_k — вектор оценки погрешностей ИНС; \hat{x}_k — вектор прогноза погрешностей ИНС; u_k — вектор управления

Для получения наиболее достоверной информации в блоке комплексирования и сравнения (БКС) использованы критерии степени наблюдаемости и управляемости [13—15].

При формировании критерия степени наблюдаемости использованы уравнения погрешностей ИНС [7]:

$$\mathbf{x}_k = \Phi \mathbf{x}_{k-1} + G \mathbf{w}_{k-1}, \quad (1)$$

где \mathbf{x}_k — вектор состояния; $\Phi (n \times m)$ — матрица системы; $G (n \times 1)$ — матрица входного шума; \mathbf{w}_{k-1} — вектор входного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием.

Часть вектора состояния измеряется

$$\mathbf{z}_k = H \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (2)$$

где \mathbf{z}_k — m -вектор измерений; $H (m \times n)$ — матрица измерений; \mathbf{v}_k — m -вектор измерительного шума, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием, причём v и w некоррелированы между собой, $M[v_j w_k^T] = 0$.

Критерий степени наблюдаемости имеет вид [16]

$$\lambda^i = \frac{M[(x^i)^2]r}{M[(y^i)^2]r^{*i}}, \quad (3)$$

где $M[(x^i)^2]$ — дисперсия произвольной i -й компоненты вектора состояния; $M[(y^i)^2]$ — дисперсия непосредственно измеряемого вектора состояния; $y^i = a_1 z_1 + a_2 z_2 + \dots + a_n z_n$ — уравнения приведённых измерений в скалярном виде; a_i — i -й элемент строки матрицы S^{-1} ; S — матрица наблюдаемости; z_1, z_2, \dots, z_n — измерения в разное время; $r = M[v^2]$ — дисперсия исходного измерительного шума v .

Дисперсия приведённого к i -й компоненте измерительного шума определяется коэффициентами a_1, a_2, \dots, a_n , т. е.

$$r^{*i} = M[v^{*i}] = [a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2]r. \quad (4)$$

При изменении режима функционирования ЛА в НК анализируются степени наблюдаемости переменных состояний и осуществляется автоматический выбор наилучшей структуры комплекса. Для прогнозирования погрешностей измерительных систем в АПМ необходимо сформировать математическую модель. Известно много способов построения прогнозирующих моделей [3, 16, 17]. Например, при коррекции навигационных систем

ЛА в случае потери информационного контакта с дополнительными измерительными системами (ГЛОНАСС и др.) для построения прогнозирующей модели применяют алгоритм самоорганизации [17].

Помимо критерия степени наблюдаемости переменных состояния в ансамбль включён численный критерий степени управляемости [3], который позволяет строить модели с повышенными характеристиками управляемости погрешностей ИНС. Такие модели обеспечивают более высокое качество коррекции в структуре ИНС. Численный критерий степени управляемости имеет вид

$$\gamma = \frac{h_i}{h_{\max}}, \quad (5)$$

где h_i — модуль суммы элементов, которые находятся в i -й строке канонической матрицы управляемости; h_{\max} — максимальное значение h_i .

При синтезе критерия степени управляемости предполагалось представление системы в каноническом виде [14]:

$$\dot{\mathbf{x}}_c^k(t) = A^k \mathbf{x}_c^k(t) + H^k \mathbf{u}_c^k(t), \quad (6)$$

где $A^k = -V^{-1}A^T V$; $H^k = -V^{-1}H^T$; $V = [v_1, \dots, v_n]$; V — матрица канонического преобразования; v_i — собственные векторы исследуемой системы.

Степень управляемости характеризуют модули элементов строк матрицы H_k , которая названа канонической матрицей управляемости. Представленный критерий позволяет проводить сравнительный анализ управляемости и определять, в какой степени управляемы компоненты вектора состояния относительно друг друга. Большей степенью управляемости обладают компоненты вектора состояния, у которых модули элементов строк канонической матрицы управляемости больше модулей соответствующих элементов других строк этой матрицы.

Максимальной степенью управляемости обладает компонента вектора состояния с наибольшей суммой модулей элементов соответствующей строки канонической матрицы управления h_{\max} . Степени управляемости других компонент вектора состояния определяются путём сравнения сумм модулей элементов строк канонической матрицы, соответствующих исследуемым компонентам вектора состояния с максимальным значением суммы модулей элементов канонической матрицы.

При функционировании ЛА на длительных временных интервалах для предотвращения нарастания погрешностей ИНС применяется коррекция в структуре ИНС с помощью линейного редуцированного регулятора [2].

В БКС определяются степени наблюдаемости и степени управляемости, формируются измерения для алгоритмов оценивания и построения прогнозирующих моделей, а также проводится сравнение текущей апостериорной информации с результатами прогноза.

Полученная на основе проведённых измерений математическая модель используется в алгоритме оценивания для определения погрешностей ИНС, а в алгоритме управления — для коррекции погрешностей в структуре ИНС. Также с помощью математической модели осуществляется прогноз состояния системы на некотором интервале времени, который выбирается в соответствии с режимом функционирования ЛА.

С помощью критериев степени управляемости и наблюдаемости выбираются измерительные системы, которые позволяют строить модели с максимальными степенями наблюдаемости и управляемости.

В блоке алгоритма управления (АУ) осуществляется реализация алгоритма управления, и на выходе получаем вектор управления u_k .

Динамический системный синтез НК. Рассмотрены концепция динамического системного синтеза [12] и её применение в задаче разработки структуры высокоточного НК и алгоритмического обеспечения. В процессе функционирования НК с интеллектуальной компонентой формируется переменная архитектура комплекса на основе анализа переменных состояния и математических моделей погрешностей ИНС, которые строятся в полёте. Доминирующие параметры моделей выбирают с помощью ансамбля критериев селекции: критерия степени наблюдаемости и критерия степени управляемости. В алгоритмическом обеспечении НК используются самоорганизующиеся модели с максимально возможными степенями наблюдаемости и управляемости переменных состояния.

Применение системного синтеза в НК ЛА позволяет упростить реализацию алгоритмического обеспечения и повысить точность навигационных определений. Системный синтез использован для определения структуры НК и состава вектора состояния математических моделей, применяемых в алгоритмическом обеспечении. Системный синтез используется при

проектировании НК, а динамический системный синтез позволяет определять наилучшую архитектуру НК и формировать алгоритмическое обеспечение НК в процессе полёта ЛА.

Разработка высокоэффективного программно-алгоритмического обеспечения НК требует применения новых информационных технологий и подходов, например, концепции системного синтеза [9, 18].

Окружающая среда, в которой функционирует НК ЛА, теоретически описывается большим количеством параметров. Часть этих параметров является определяющими (ключевыми, доминирующими) и именно эти параметры используются в алгоритмическом обеспечении НК. Существуют проекции на подпространство меньшего количества переменных, с достаточной степенью адекватности отражающих ситуацию в исходном пространстве переменных. Из этих наиболее информативных переменных состояния формируются русла. Относительно русел разрабатываются алгоритмы НК ЛА. С помощью ансамбля критериев селекции определяется размерность русла, т. е. выделяются переменные состояния, достаточно хорошо отражающие исследуемый процесс. В практических приложениях размерность русла, как правило, невелика.

На этапе проектирования НК с помощью ансамбля критериев селекции и априорной информации об исследуемых процессах отбираются ключевые параметры и определяются архитектура НК, а также модели алгоритмического обеспечения. Однако в процессе функционирования НК ЛА внешние возмущения и собственное состояние НК могут существенно изменяться. Поэтому ключевые параметры уже неадекватно отражают реальные процессы. При интенсивном маневрировании ЛА появляются параметры, которые ранее не являлись определяющими, а теперь именно они характеризуют состояние НК, другие же ключевые параметры становятся несущественными и выпадают из русла.

Алгоритмы построения модели. Для построения моделей алгоритмического обеспечения НК ЛА используются эволюционные алгоритмы, например, алгоритмы самоорганизации [4, 10, 11].

Использование в алгоритме для селекции моделей критериев степени наблюдаемости и идентифицируемости позволяет получить модели с улучшенными качественными характеристиками. Алгоритм самоорганизации позволяет автоматически выделять наиболее

значимые переменные состояния, которые используются в формируемой модели.

В НК БКС предназначен для определения степеней наблюдаемости [5, 12] и управляемости [15, 19], формирования измерений, которые используются в алгоритмах оценивания и управления, а также в блоке алгоритма построения модели (АПМ) для построения прогнозирующих моделей.

С помощью математической модели осуществляется прогноз погрешностей ИНС на некотором интервале времени, который выбирается в соответствии с режимом функционирования ЛА.

Выделенные в БКС измерительные сигналы поступают в блок оценивания (БО), где с помощью алгоритма оценивания происходит подавление измерительного шума и восстановление всего вектора погрешностей ИНС.

Сигнал, пропорциональный оценке вектора состояния \hat{x}_k с ошибкой оценивания \tilde{x}_k , вычитается из выходного сигнала ИНС, при этом повышается точность навигационных определений ЛА.

Так как в ансамбль критериев селекции БКС включены критерии степени наблюдаемости и управляемости, в алгоритмическом обеспечении НК используются только хорошо наблюдаемые и управляемые переменные состояния.

При изменении режима функционирования НК ЛА анализируются степени наблюдаемости и управляемости переменных состояния, подвергаются анализу в БКС и осуществляется автоматический выбор наилучшей структуры НК.

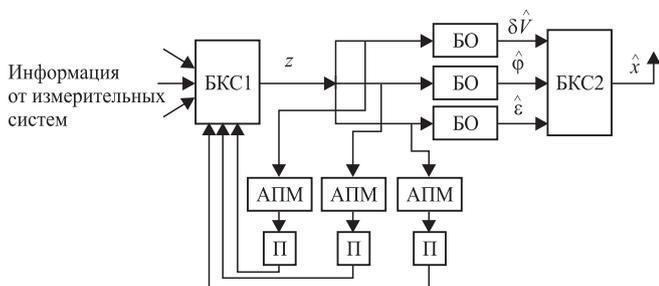


Рис. 2. Акцептор действия навигационного комплекса: БКС — блок комплексирования и сравнения; АПМ — алгоритм построения моделей; П — алгоритм прогноза; БО — блок оценивания; z — измерения; $\delta\hat{V}$ — оценка ошибок в определении скорости; $\hat{\phi}$ — оценка ошибок в определении углов отклонения ГСП; $\hat{\varepsilon}$ — оценка ошибок в определении скорости дрейфа; \hat{x} — оценка ошибок вектора состояния

Полученную в АПМ математическую модель используют в алгоритме оценивания для определения состояния исследуемой системы, а также в ансамбле критериев селекции БКС.

В БКС1 происходят определение степеней наблюдаемости и формирование измерений для алгоритма построения моделей и алгоритма оценивания. Таким образом, при построении моделей используются только хорошо наблюдаемые переменные состояния. Также в БКС1 осуществляется сравнение результатов прогноза с текущими измерениями.

В БКС2 содержится ансамбль критериев, на основании которого происходит формирование русла, с помощью которого удаётся достичь максимальной точности.

Если на первом этапе функционирования НК некоторые компоненты вектора состояния были слабонаблюдаемыми и не подвергались оцениванию [6], то с течением времени появляется возможность использовать более подробную модель исследуемого процесса, и степень наблюдаемости этих компонент может увеличиться. В этом случае слабонаблюдаемые в прошлом компоненты, например δx , которая представляет собой ошибки в определении местоположения ЛА (ставшие хорошо наблюдаемыми), включаются в состав русла, т. е. переходят в разряд оцениваемых компонент вектора состояния. По мере накопления полезной информации, с помощью алгоритма самоорганизации строится более подробная модель исследуемого процесса.

Если использование более подробной модели приводит к тому, что степень наблюдаемости конкретного параметра увеличивается, то оцениваемый вектор состояния расширяется и в конечном счёте (в случае, когда все параметры комплекса становятся «хорошо» наблюдаемыми) осуществляется переход от редуцированного к обычному полному вектору состояния. В БО используются скалярные алгоритмы оценивания, поэтому в случае изменения размерности вектора состояния не требуется менять матрицы модели оцениваемого процесса и формулы для вычисления матриц усиления и ковариационных матриц ошибок оценивания.

Аналогично использован критерий степени управляемости переменных состояния.

Модели оцениваемого процесса — погрешностей ИНС строятся с помощью эволюционных алгоритмов для каждой переменной в скалярной форме. В рамках концепции динамического системного синтеза, в процессе

функционирования НК ЛА осуществляется выбор доминирующих переменных состояния, которые наилучшим образом определяют исследуемый процесс.

Таким образом, реализована концепция динамического системного синтеза в НК ЛА. Алгоритмическое обеспечение НК легко реализуемо в современных серийных бортовых цифровых вычислительных машинах (БЦВМ) ЛА. Критерии (3) и (5) используются в алгоритмах построения моделей для придания им улучшенных качественных характеристик: высоких степеней наблюдаемости и управляемости.

Синтез алгоритма самоорганизации. В практических приложениях использование в алгоритмическом обеспечении НК априорных математических моделей не представляется возможным.

Построение модели погрешностей ИНС для алгоритмического обеспечения НК осуществляется в рамках концепции динамического системного синтеза [12]. В соответствии с этой концепцией проводится построение моделей в процессе полёта ЛА, а также с помощью ансамбля критериев селекции постоянно определяется наилучший состав вектора состояния модели. Выделяются самые эффективные компоненты вектора состояния и для них вычисляется модель оптимальной сложности. Для упрощения процесса перехода с одной модели на другую реализация алгоритмического обеспечения НК осуществляется в скалярной форме [17, 18].

Модель погрешностей ИНС. Традиционная математическая модель погрешностей ИНС, которая используется в алгоритмическом обеспечении НК (в алгоритме оценивания, управления и др.), имеет вид

$$x_k = \Phi x_{k-1}; \quad (7)$$

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}, W_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W_k \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 - \beta T \end{bmatrix},$$

где δV — ошибки в определении скорости; φ — ошибки в определении углов отклонения ГСП; ε — ошибки в определении скорости дрейфа; W — дискретный аналог белого гауссова шума; R — радиус Земли; g — ускорение силы тяжести; β — средняя частота случайного изменения дрейфа гироскопа; T — период дискретизации.

Приведённая априорная модель имеет невысокую точность, поэтому целесообразно строить реальную модель в полёте. Реальная модель — это набор параметров и их связи, которые определяются в процессе полёта.

В процессе работы НК с интеллектуальной компонентой в блоке комплексирования определяется наилучший вектор измерений. Далее в блоке построения моделей с помощью ансамбля критериев селекции выбираются ключевые переменные состояния, из которых формируется русло строящейся модели. В ансамбль критериев селекции включены универсальные критерии, специальные критерии и точностные критерии, определяющие русло.

При функционировании НК проводится построение полной модели горизонтального канала погрешностей ИНС, редуцированной модели с меньшей размерностью русла или, вообще, русло сокращается до одной непосредственно измеряемой переменной состояния.

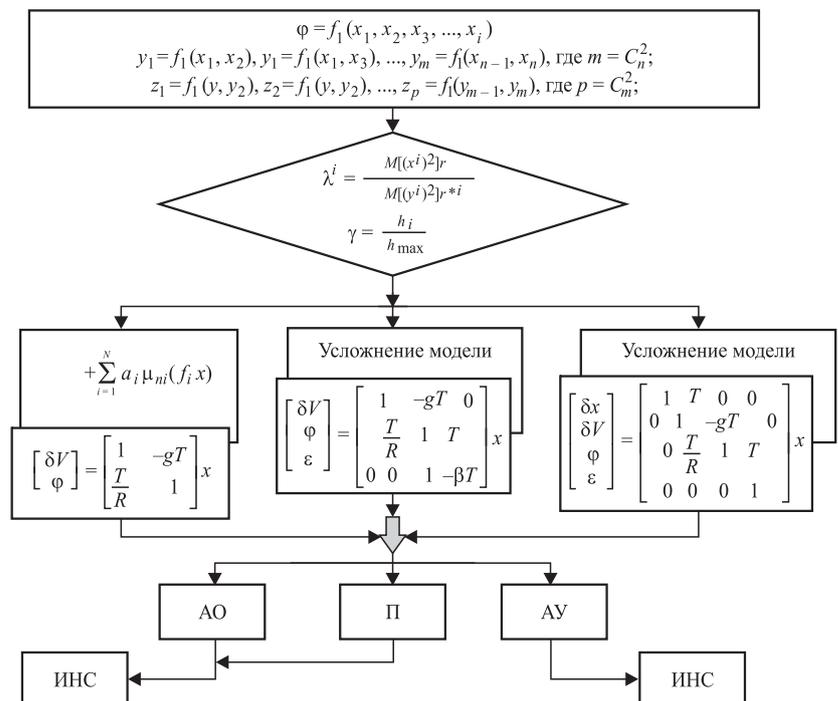


Рис. 3. Структурная схема алгоритмов обработки информации навигационного комплекса:

λ^i — критерий степени наблюдаемости; γ — критерий степени управляемости; АО — алгоритм оценивания; П — алгоритм прогноза; ИНС — инерциальная навигационная система; АУ — алгоритм управления

Редуцированная модель может иметь вид (7) с вектором и матрицей вида

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT \\ \frac{T}{R} & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Третья компонента вектора состояния — скорость дрейфа гиросtabilизированной платформы (ГСП) не включена в русло. Отсутствие информации о скорости дрейфа ГСП при формировании русла не приводит к снижению точности вычисления переменных состояния русла, так как точность определения скорости дрейфа ГСП является недостаточно высокой, что привело к исключению из русла. Использование этой переменной состояния при вычислении русла приведёт к снижению точности.

Представлены линейные модели погрешностей ИНС (7) и (9), которые усложняются в процессе функционирования алгоритма самоорганизации (рис. 3).

Выводы. Рассмотрен НК с интеллектуальной компонентой, применяемый на перспективных ЛА. Разработана интеллектуальная компонента в виде акцептора действия. При формировании акцептора действия использованы концепция динамического системного синтеза и алгоритм самоорганизации, позволяющий строить модели погрешностей ИНС различного уровня подробности.

Библиографические ссылки

1. Агеев В.М., Павлова Н.В. Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. М.: Машиностроение, 1990.
2. Анохин П.К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М.: Медицина, 1968.
3. Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 27—30.
4. Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Современные аспекты фундаментальных наук: тр. второго междунар. симпозиума. 2015. С. 196—199.

5. Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 10—14.

6. Selezneva M.S., Neusyypin K.A. Development of a measurement complex with intelligent component // Measurement Techniques. Vol. 59. № 9. December 2016. P. 916—922.

7. Неусыпин К.А., Логинова И.В. Вопросы теории и реализации интеллектуальных систем. М.: МПУ, 1999.

8. Неусыпин К.А. Концептуальный синтез интеллектуальных систем // Автоматизация и современные технологии. 2000. № 6. С. 23.

9. Пролетарский А.В. Концепция системного синтеза динамических объектов // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 8.

10. Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Система управления летательными аппаратами с использованием концепции системного синтеза // Технические науки — от теории к практике. 2016. № 54. С. 73—77.

11. Селезнева М.С. Разработка навигационного комплекса летательного аппарата на основе концепции системного синтеза // Технические науки — от теории к практике. 2017. № 2(62). С. 12—16.

12. Селезнева М.С., Кай Шэнь, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Динамический системный синтез алгоритмического обеспечения навигационного комплекса летательного аппарата // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2.

13. Неусыпин К.А. Исследование критериев управляемости и наблюдаемости навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 9.

14. Неусыпин К.А., Фам Суан Фанг. Численный критерий степени управляемости переменных состояний // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 7.

15. Кай Шэнь, Неусыпин К.А. Исследование критериев степени наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 11. С. 723—731.

16. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я. Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985.

17. Неусыпин К.А. Разработка модифицированных алгоритмов самоорганизации для коррекции навигационной информации // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 1. С. 37—39.

18. Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Разработка редуцированного алгоритма самоорганизации для коррекции навигационных систем // Научное обозрение. 2013. № 9. С. 333—447.

19. Neusyypin K.A., Proletarsky A.V., Kai Shen, et al. Aircraft self-organization algorithm with redundant trend // Journal of Nanjing University of Science and Technology. 2014. № 5. P. 602—607.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу:

«Пресса России» — индекс 27838.

УДК 681.518.52

П.А. Толкачёв, Б.И. Шахтарин

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

tolkachevpa@mail.ru

МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ШУМОВ В СИНТЕЗАТОРАХ ЧАСТОТЫ

Рассматривается модель расчёта средней плотности мощности шумов косвенных синтезаторов частот, оснащённых делителем с дробно-переменным коэффициентом деления и цифровой схемой компенсации в виде сигма-дельта-модулятора. Предлагаемая модель даёт возможность оценить шумовую составляющую работы синтезаторов частот различных видов. Результаты модели сравниваются с результатами моделирования синтезатора частоты в программе ADISimPLL.

Ключевые слова: косвенный синтезатор частоты; мощность шума; плотность мощности шума; шумовая характеристика.

A model for calculating the average power density for the noise of the indirect frequency synthesizers equipped with a divisor with a fractional-variable fission coefficient and a digital compensation circuit in the form of a sigma-delta modulator is considered. The proposed model makes it possible to evaluate the noise component of the frequency synthesizers operation of various types. The results of the model are compared with the results of modeling the frequency synthesizer in the ADISimPLL program.

Keywords: indirect frequency synthesizer; noise power; noise power density; noise characteristic.

Основным принципом расчёта шумов синтезаторов частот (СЧ) в настоящее время является аддитивность, при которой считается, что все шумы, генерируемые или добавляемые каждым структурным компонентом схемы, очень малы в сравнении с мощностью полезного сигнала, и в соответствии с правилом наложения их можно добавлять к соответствующим входным или выходным воздействиям. Однако, когда система имеет довольно сложную структуру или большое количество нелинейных элементов, применение данного метода затруднительно. Поэтому задача определения уровня помех сложных систем является весьма актуальной.

Работе такого сложного устройства, как СЧ смешанного синтеза, особенно с системой импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАПЧ) с цифровым делителем и дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД), посвящено большое количество работ и публикаций, описывающих принципы работы самого устройства, его отдельных узлов и их шумовых характеристик. В результате исследований шумовых характеристик был сделан вывод о том, что наиболее сложной для расчёта является помеха, вносимая работой ДДПКД [1]. Для борьбы с возникающими в результате работы данного блока шумами

возможно применение различных способов, наиболее перспективным из которых является использование в качестве устройства компенсации помехи сигма-дельта-модулятора (СДМ) [2]. Поэтому представляется интересным получить модель СЧ с ДДПКД и СДМ, позволяющую достоверно оценить фазовые шумы в работе устройства.

На рис. 1 представлена общая модель СЧ с ДДПКД и СДМ [3], из которой видно, что входным сигналом для ДДПКД является сигнал с выхода УГ, фазу которого обозначим $\Phi_{\text{ОГ}}(t)$, а выходным сигналом ДДПКД является сигнал с фазой $\Phi_{\text{ДДПКД}}(t)$, которая сравнивается с фазой ОГ в блоке ЧФД. При этом

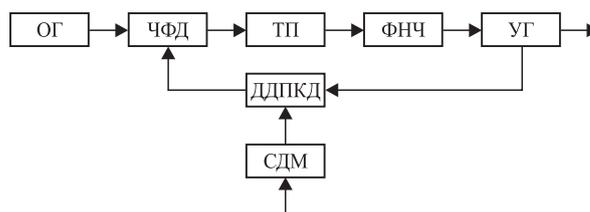


Рис. 1. Блок-схема синтезатора частот:

ОГ — опорный генератор; ЧФД — частотно-фазовый детектор; ТП — токовая подкачка; ФНЧ — фильтр нижних частот; УГ — управляемый генератор; ДДПКД — делитель с дробно-переменным коэффициентом деления; СДМ — сигма-дельта-модулятор

результатом сравнения двух дискретных цифровых сигналов $\Phi_{\text{ОГ}}(k)$ и $\Phi_{\text{ДДПКД}}(k)$ является импульс рассогласования длительностью Δt_k :

$$\Delta t_k = \frac{T}{2\pi} [\Phi_{\text{ОГ}}(k) - \Phi_{\text{ДДПКД}}(k)]. \quad (1)$$

Полностью исследовать нелинейное воздействие, которое вносит данный импульс в систему, довольно сложно, поэтому для исследования работы ДПКД аппроксимируем выходной сигнал ЧФД (реализован в виде трёхпозиционного фазового детектора на D-триггерах) как сумму импульсной последовательности дельта-импульсов определённой длительности:

$$E(t) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Delta t_k \delta(t - kT). \quad (2)$$

Исходя из принципа работы УГ как аналогового устройства в фазе его выходного сигнала можно выделить две составляющие: переменная фаза

$$\Phi_{\text{п}}(t) = \int 2\pi S_{\text{УГ}} V_{\text{in}}(t) dt, \quad (3)$$

где $S_{\text{УГ}}$ — крутизна УГ; $V_{\text{in}}(t)$ — сигнал, подаваемый на вход УГ;

и абсолютная фаза, состоящая из постоянной фазы (начальной фазы настройки генератора) и переменной фазы,

$$\Phi_{\text{УГ}}(t) = 2\pi f_{\text{НОМ}} t + \Phi_{\text{п}}(t). \quad (4)$$

Таким образом описывается поведение фазы сигнала на входе и выходе блока ДДПКД. Рассмотрим работу самого блока в дискретной (временной) области с условием, что импульсы ЧФД следуют с шириной Δt_k , флуктуация фазы $\Phi_{\text{п}}(t)$ и значение коэффициента деления ДДПКД на каждый отсчёт $N(k)$. Зная, что $\Phi_{\text{УГ}}(t)$ — это абсолютное значение фазы, деление будем выполнять на целое число $2\pi N(k)$ радиан. Исходя из выражения (4), $\Phi_{\text{УГ}}(t)$ — это линейно нарастающая величина с отклонениями фазы в пределах $\Phi_{\text{п}}(t)$.

На рис. 2 показано изменение коэффициента деления $N(k)$, происходящее по приходу фронта импульса. Выразим дискретное значение фазы на выходе УГ следующим образом:

$$\Phi_{\text{УГ}}(t_k + \Delta t_k) - \Phi_{\text{УГ}}(t_{k-1} + \Delta t_{k-1}) = 2\pi N(k-1). \quad (5)$$

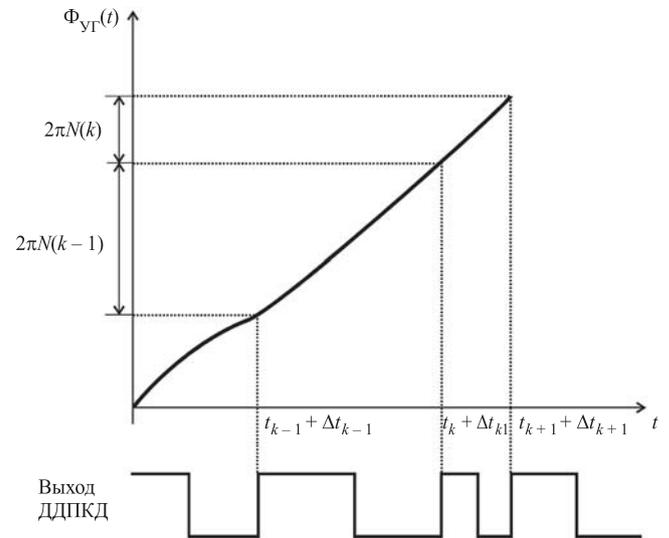


Рис. 2. Переключение коэффициента деления в соответствии с мгновенным значением фазы сигнала на выходе управляемого генератора

Следующее выражение получим из формулы (4) для $t_k + \Delta t_k$ и $t_{k-1} + \Delta t_{k-1}$:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{УГ}}(t_k + \Delta t_k) - \Phi_{\text{УГ}}(t_{k-1} + \Delta t_{k-1}) &= \\ &= 2\pi f_{\text{НОМ}}(t_k + \Delta t_k - t_{k-1} - \Delta t_{k-1}) + \\ &+ \Phi_{\text{п}}(t_k + \Delta t_k) - \Phi_{\text{п}}(t_{k-1} + \Delta t_{k-1}). \end{aligned}$$

Принимая во внимание, что $t_k - t_{k-1} = T$ и $f_{\text{НОМ}} T = N_{\text{НОМ}}$, запишем систему уравнений

$$\begin{cases} \Phi_{\text{УГ}}(t_k + \Delta t_k) - \Phi_{\text{УГ}}(t_{k-1} + \Delta t_{k-1}) = \\ = 2\pi N[k-1]; \\ \Phi_{\text{УГ}}(t_k + \Delta t_k) - \Phi_{\text{УГ}}(t_{k-1} + \Delta t_{k-1}) = \\ = 2\pi N_{\text{НОМ}} + 2\pi f_{\text{НОМ}}(\Delta t_k - \Delta t_{k-1}) + \\ + \Phi_{\text{п}}(t_k + \Delta t_k) - \Phi_{\text{п}}(t_{k-1} + \Delta t_{k-1}). \end{cases} \quad (6)$$

Решая данную систему уравнений, получим

$$\begin{aligned} &2\pi f_{\text{НОМ}}(\Delta t_k - \Delta t_{k-1}) = \\ &= 2\pi[N(k-1) - N_{\text{НОМ}}] - [\Phi_{\text{п}}(t_k + \Delta t_k) - \\ &- \Phi_{\text{п}}(t_{k-1} + \Delta t_{k-1})]. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) при переходе к числовому ряду для всех положительных отсчётов k позволит выразить интересующую величину флуктуации фазы Δt_k :

$$\begin{aligned} &\sum_{m=1}^k 2\pi f_{\text{НОМ}}(\Delta t_m - \Delta t_{m-1}) = \\ &= \sum_{m=1}^k \{2\pi[N(m-1) - N_{\text{НОМ}}] - \\ &- [\Phi_{\text{п}}(t_m + \Delta t_m) - \Phi_{\text{п}}(t_{m-1} + \Delta t_{m-1})]\}. \end{aligned}$$

Просуммировав члены ряда, получим

$$2\pi f_{\text{НОМ}} (\Delta t_k - \Delta t_0) = \sum_{m=1}^k 2\pi [N(m-1) - N_{\text{НОМ}}] - [\Phi_{\text{п}}(t_k + \Delta t_k) - \Phi_{\text{п}}(t_0 + \Delta t_0)].$$

Принимая начальное состояние равным нулю, выражение примет вид

$$2\pi f_{\text{НОМ}} \Delta t_k = \sum_{m=1}^k 2\pi [N(m-1) - N_{\text{НОМ}}] - \Phi_{\text{п}}(t_k + \Delta t_k). \quad (8)$$

Искомую флуктуацию фазы можно выразить с учётом следующих определений: $n(k) = N(k) - N_{\text{НОМ}}$, $\Phi_{\text{п}}(k) = \Phi_{\text{п}}(t_k)$, $f_{\text{НОМ}} = N_{\text{НОМ}}(1/T)$. Аппроксимируя $\Phi_{\text{п}}(t_k + \Delta t_k) \approx \Phi_{\text{п}}(t_k)$, получим следующее выражение:

$$\Delta t_k = \left(\frac{T}{2\pi}\right) \left(\frac{1}{N_{\text{НОМ}}}\right) \times \left\{ 2\pi \sum_{m=1}^k [n(m-1) - N_{\text{НОМ}}] - \Phi_{\text{п}}(k) \right\}. \quad (9)$$

Принимая дискретное значение фазы равным нулю и подставив выражение (9) в формулу (1), получим дискретное значение фазы ДДПКД:

$$\Phi_{\text{ДДПКД}}(k) = \left(\frac{1}{N_{\text{НОМ}}}\right) \times \left\{ -2\pi \sum_{m=1}^k [n(m-1) - N_{\text{НОМ}}] + \Phi_{\text{п}}(k) \right\}. \quad (10)$$

Таким образом, описав работу ДДПКД в дискретной временной области, можно получить временную модель работы СЧ, принимая во внимание следующее:

блок ЧФД преобразует цифровую разность фаз $\Phi_{\text{ОГ}}(k) - \Phi_{\text{ДДПКД}}(k)$ в аналоговый сигнал и передаёт с коэффициентом $\frac{T}{2\pi}$ (1);

блок токовой подкачки передаёт аналоговый сигнал, умножая его на величину тока подкачки I ;

ФНЧ имеет передаточную функцию $h(t)$;

УГ генерирует сигнал с фазой, меняющейся согласно выражению (3), при этом сигнал, идущий в петлю обратной связи, оцифровывается.

Временная модель СЧ изображена на рис. 3. Переход от временной модели СЧ к частотной осуществляется применением z -преобразования к дискретно-временным параме-

трам блоков и преобразования Фурье к временным параметрам [4].

Включим в данную модель (рис. 4) следующие известные источники шума [5]:

паразитные флуктуации фазы в делителе и устройстве сравнения (джиттинг) $\Phi_{\text{дж}}(k)$;

периодически возникавшие составляющие флуктуации фазы от работы трёхпозиционно-го ЧФД $\Phi_{\text{spur}}(t)$;

шумовые составляющие от работы блока ТП $\Phi_{\text{ТП}}(t)$;

флуктуации фазы от работы УГ $\Phi_{\text{УГ}}(t)$.

Выразим коэффициент передачи системы (рис. 5). Согласно теории управления коэффициент замкнутой системы имеет вид

$$G(f) = \frac{A(f)}{1 + A(f)},$$

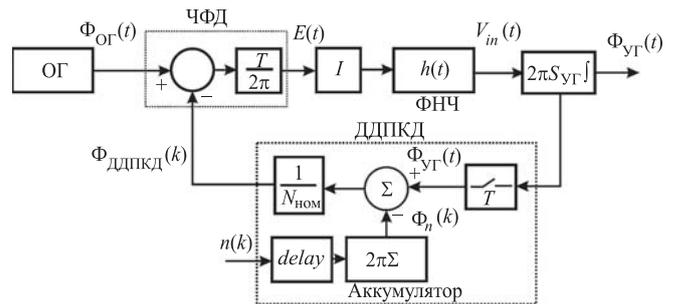


Рис. 3. Модель синтезатора частот во временной области

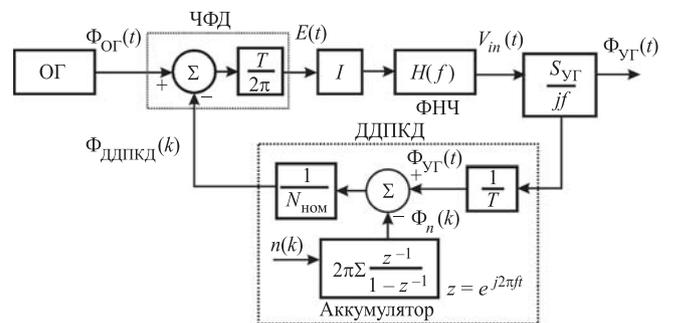


Рис. 4. Модель синтезатора частот в частотной области

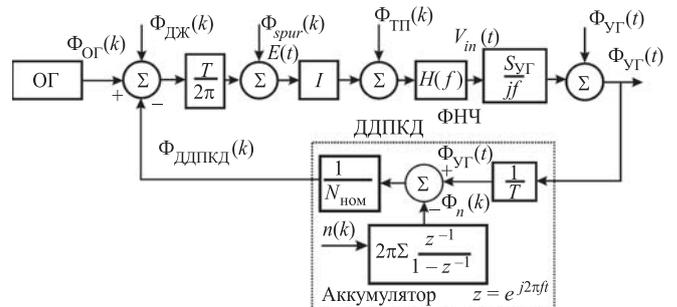


Рис. 5. Модель синтезатора частот в частотной области с известными источниками шума

где $A(f)$ — коэффициент разомкнутой системы,

$$A(f) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) IH(f) \left(\frac{S_{yT}}{jf}\right) \left(\frac{1}{N_{\text{ном}}}\right).$$

При этом передаточная функция аккумулятора ДДПКД для $f \ll \frac{1}{T}$ примет вид

$$\frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} = \frac{e^{-j2\pi fT}}{1-e^{-j2\pi fT}} \approx \frac{1-j2\pi fT}{1-(1-j2\pi fT)} \approx \frac{1}{j2\pi fT}.$$

Выразим флуктуации фазы в зависимости от прохождения сигнала через узлы СЧ, используя передаточную функцию $G(f)$. Согласно модели, представленной на рис. 6, рассчитаем значение спектральной мощности шума на выходе СЧ. Как показано в работе [6], если входной дискретный сигнал поступает в аналоговый фильтр и с выхода принимаем аналоговый сигнал, то спектральная мощность шума выходного сигнала может быть выражена в виде

$$S_y(t) = \frac{1}{T} |H(f)|^2 S_x(e^{j2\pi fT}). \quad (11)$$

Следует отметить, что при делении на дробную часть, т. е. изменении коэффициента деления $n(k)$, создаётся так называемая помеха дробности, которую блоки ЧФД, токовой подкачки и ФНЧ пропускают без исправления. Для компенсации этой помехи, а также для увеличения частоты, с которой будет осуществляться деление в ДДПКД, на вход аккумулятора необходимо поставить СДМ.

Возможность увеличения разрешения сигнала по частоте с использованием СДМ достигается тем, что происходит «размытие» сигнала, т. е. усреднение значения мощности

спектра помехи по всей частоте, тем самым достигается высокое разрешение выходного сигнала в высокочастотной области за счёт перераспределения энергии [7]. Также возможно построение СДМ порядка m с входным сигналом $x(k)$ и выходным сигналом $y(k)$ в виде каскадной системы (MASH-структуры):

$$y(z) = x(z) - (1-z^{-1})^m r(z), \quad (12)$$

где $r(z)$ — шумы квантования.

Использование такой структуры позволяет «перенести» шумы квантования в более высокочастотную область (в идеале сделать их «белым» шумом с уровнем 1/12).

Таким образом, работу СДМ можно выразить в виде двух передаточных функций: по сигналу $H_s(z) = 1$ и по шуму $H_r(z) = (1-z^{-1})^m \Big|_{z=e^{-j2\pi fT}}$.

Применение СДМ позволяет использовать непрерывный входной сигнал не только для изменения коэффициента деления, но и как масштабирующий фактор. Постоянное размытие значения делителя в ДДПКД с помощью СДМ позволяет уменьшить шумы в низкочастотной области, при этом образуется зависимость разрешения сигнала ДДПКД от частоты сигнала на входе СДМ, разрешение которого можно менять произвольно. Таким образом, использование СДМ позволяет поддерживать очень высокое разрешение СЧ независимо от частоты сравнения ЧФД, при этом высокая частота сравнения ЧФД может достигаться одновременно с высоким разрешением по частоте.

Для получения модели СЧ с ДДПКД и цифровой схемой компенсации в виде СДМ включим в модель СЧ для расчёта шумовых характеристик блок СДМ, как это показано на рис. 7. Данная модель позволяет рассчитать спектр мощности фазовых шумов СЧ с ДДПКД. Используя модель на рис. 7 и выражение (11), получим

$$S_{\Phi_{yT}}(f) = \frac{1}{T} |TG(f)|^2 \left| 2\pi \frac{e^{-j2\pi fT}}{1-e^{-j2\pi fT}} \right|^2 \times \times \left| (1-e^{-j2\pi fT})^m \right|^2 S_r(f). \quad (13)$$

При этом, если спектр шумов квантования $r(k)$ белый, то $S_r(f) = \frac{1}{12}$, чтобы это обеспечить, необходимо увеличить порядок СДМ.

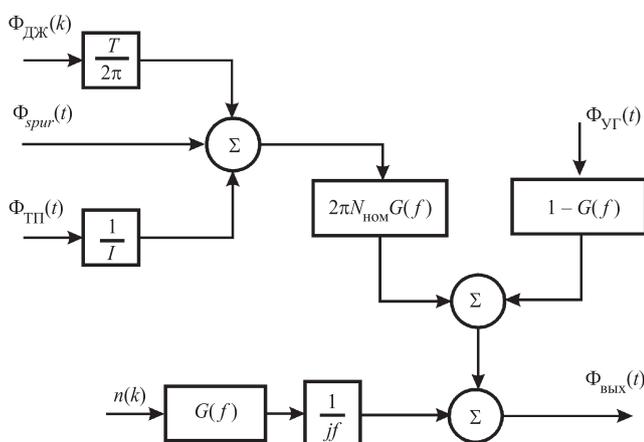


Рис. 6. Модель синтезатора частот для расчёта шумовых характеристик

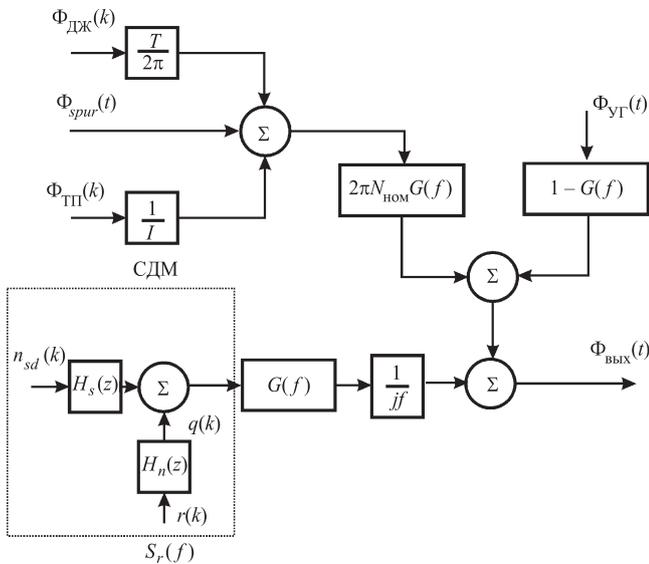


Рис. 7. Модель синтезатора частот с сигма-дельта-модулятором

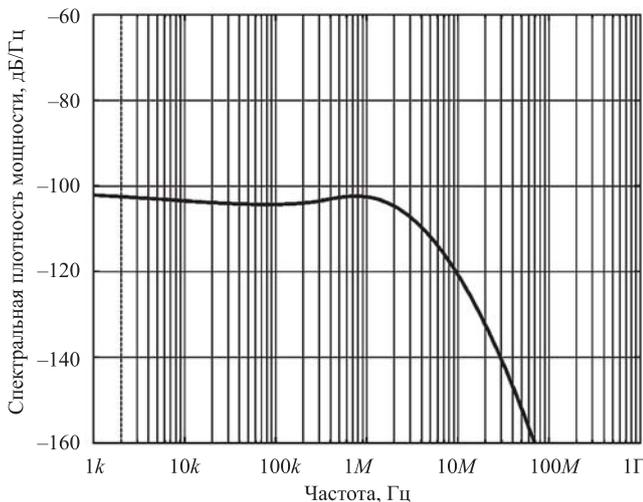


Рис. 8. Спектральная плотность мощности фазовых шумов синтезатора частот, рассчитанная по приведённой модели

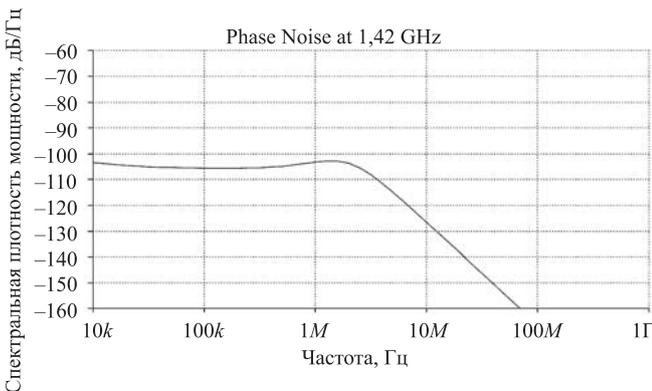


Рис. 9. Фазовые шумы синтезатора частот на микросхеме ADF4158, смоделированные в программе ADISimPLL

Для проверки результатов работы была разработана программа, позволяющая рассчитать спектральную плотность мощности шума выходного сигнала $10\log S_{\Phi_{УГ}}(f)$ по формуле (12) для СЧ с заданными основными параметрами: $f_{ОГ} = 20$ МГц; $I = 1,5$ мкА; $S_{УГ} = 30$ МГц/В; $N_{НОМ} = 92$; ФНЧ: $f_{ср} = 14,2$ кГц; $f_z = 11,6$ кГц; $f_p = 127,2$ кГц; $Q = 0,75$; шумы элементов: $\Phi_{дж} = 1,85 \cdot 10^{-16}$ В²/Гц; $\Phi_{дж} = 1,85 \cdot 10^{-16}$ В²/Гц; $\Phi_{spur} = 1,2 \cdot 10^{-24}$ А²/Гц; $\Phi_{ТП} = 1,8 \cdot 10^{-25}$ А²/Гц; $\Phi_{УГ} = 1,4 \cdot 10^{-16}$ В²/Гц.

Результат моделирования представлен на рис. 8.

Результат моделирования фазовых шумов для СЧ со схожими параметрами на микросхеме ADF4158 [8] в программе ADISimPLL представлен на рис. 9. Некоторое несоответствие объясняется допущениями при аппроксимации и усреднением характеристик при расчёте.

В результате исследования получена модель СЧ косвенного синтеза на основе системы ИФАПЧ с ДДПКД и цифровой схемой компенсации помех в виде СДМ, позволяющая оценить вклад помех, создаваемых работой отдельных блоков, в общий спектр шума работы СЧ. Модель является универсальной для всех СЧ на основе ИФАПЧ относительно их передаточных функций $G(f)$, что позволяет качественно оценить фазовые шумы СЧ на этапе проектирования и выбрать методы компенсации.

Библиографические ссылки

1. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование. М.: Связь, 1979. С. 112—180.
2. Steven R., Schreier R., Gabor C. Delta-Sigma Data Converters. Theory, design, and simulation // IEEE PRESS. 1997. P. 165—192.
3. Perrott M., Trott M., Sodini C. A Modeling Approach for SDFractional-N Frequency Synthesizers Allowed Straightforward Noise Analysis // IEEE Journal of Solid State Circuits. Vol. 37. No. 8. 2002. P. 1028—1037.
4. Rhee W., Xu N., Zhou B., Wang Z. Fractional-N Frequency Synthesis: Overview and Practical Aspects with FIR-Embedded Design // Journal of semiconductor technology and science. Vol. 13. No. 2. 2013. P. 170—172.
5. Прохладин Г.Н. Моделирование шумовых характеристик синтезаторов частот на основе систем ИФАПЧ // Радиотехника. 2006. № 2. С. 36—47.
6. Левин В.А., Малиновский В.Н., Романов С.К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки частоты. М.: Радио и связь, 1989. 232 с.
7. Шахтарин Б.И. Синтезаторы частот. М.: Горячая линия—Телеком, 2007. С. 86—93.
8. Костер У. Применение высокоскоростных систем. М.: Техносфера, 2009. С. 230—249.



УДК 625.144.7

С.В. Фокин

(Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна)

Sergei-Kolomna@mail.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА

Рассмотрены две системы мониторинга и анализа технического состояния промышленных объектов, используемые на железнодорожных путевых машинах. Представлена методика сравнения эффективности способов отображения информации, реализованная в этих системах, и предложен вариант нахождения количественной характеристики качества отображения информации на основе технических параметров системы и экспертных оценок.

Ключевые слова: система мониторинга и анализа технического состояния; отображение информации; оценка способа отображения информации; эффективность отображения информации; бортовая диагностика путевых машин; диагностика узлов и агрегатов.

Two systems for monitoring and analyzing the technical condition of industrial facilities used on railway track machines are considered. The methodology of comparing the information display methods effectiveness implemented in these systems is presented. A variant of finding a quantitative characteristic of the information display quality on the basis of the system technical parameters and expert estimates is proposed.

Keywords: system of monitoring and analysis of technical condition; information display; evaluate the information display mode; efficiency of information display; on-board diagnostics of track machines; diagnostics of units and assemblies.

Введение. В процессе создания новых и модернизации старых систем мониторинга и промышленной автоматизации возникает естественная необходимость оценки новых методов и способов отображения информации. Выполнить эту оценку весьма непросто в силу сложности формализации отображения информации и многогранности данного процесса. Рассмотрим бортовую систему мониторинга для специального подвижного состава. Сравним способы отображения информации, реализуемые в бортовой системе мониторинга и анализа технического состояния путевой машины РПБ-01 производства АО «ВНИКТИ» и автоматизированной системе контроля параметров и управления путевых машин (АСКУМ) производства НКБ «МИУС» (г. Таганрог).

Обзор рассматриваемых бортовых систем. Бортовая система мониторинга и анализа технического состояния путевой машины РПБ-01 (рис. 1), разработанная в АО «ВНИКТИ», входит в состав системы управления унифицированного пульта машиниста и предназначена для объективного контроля параметров дизельной установки, гидропередачи, транс-

миссии, гидросистемы, электрооборудования и рабочих органов машины. Она обеспечивает предоставление машинисту РПБ-01 диагностической информации о текущих основных параметрах узлов и агрегатов машины, выдачу рекомендаций машинисту при возникновении



Рис. 1. Бортовая система мониторинга и анализа технического состояния путевой машины РПБ-01



Рис. 2. Автоматизированная система контроля параметров и управления путевых машин (АСКУМ)

сбоев и неисправностей, архивирование анализируемой информации для её последующей обработки и анализа в стационарных условиях.

АСКУМ осуществляет как мониторинг и автоматизированный контроль параметров, так и управление некоторыми агрегатами путевой машины (дизельной монтажной автомотрисы (АДМ), погрузочно-транспортного мотовоза (МПТ), оснащённых гидропередачей ГП-300). Визуализация информации осуществляется с помощью монитора размером $280 \times 220 \times 100$ мм, который установлен на пульте машиниста (рис. 2) и имеет специализированную клавиатуру с 18 клавишами.

Оценка эффективности метода визуализации информации. Основная функция визуализации — отображение информации в объёмах, достаточных для принятия необходимых решений. Исходя из этого наиболее объективной является оценка качества метода визуализации по эффективности его функционирования в плане необходимого и достаточного предоставления информации для принятия решений в различных ситуациях.

Метод визуализации характеризуется широким набором свойств:

$$W_B = \{W_k\}, k \in K, |K| = m \gg 1,$$

где W_k — показатель эффективности метода визуализации; K — множество свойств; m — мощность множества свойств;

Числовое значение функционала, отражающее свойство метода визуализации, которое характеризует уровень его качества, называется показателем этого свойства [1]. Совокупность числовых значений показателей свойств метода визуализации W_B представляет собой обобщённое свойство метода визуализации как подсистемы системы мониторинга и анализа технического состояния. Однако эта со-

вокупность ещё не характеризует эффективность метода визуализации, так как необходимо учесть условия использования системы мониторинга по целевому назначению.

Основными характеристиками, определяемыми требованиями, предъявляемыми к системам визуализации, являются быстрдействие, надёжность, точность отображения информации, информационная ёмкость, разрешающая способность и эргономические свойства.

Для того чтобы определить числовое значение показателя эффективности метода визуализации, введём следующие обозначения:

S_B — структурная организация визуализации данных (состав и взаимосвязь элементов);

F_B — функциональная организация визуализации данных (поведение и взаимодействие элементов);

P_S, P_F — множества параметров структурной и функциональной организации метода визуализации соответственно;

P_Z — совокупность параметров, характеризующих свойства решаемых функциональных задач;

P_{SC} — совокупность параметров структуры и свойств программно-технических средств системы мониторинга и анализа технического состояния за исключением визуализации;

P_{inp} — множество параметров входной информации о контролируемых агрегатах.

В этом случае функционал, отражающий степень соответствия метода визуализации его назначению по тому или иному его свойству, можно представить в виде

$$W_k = W_k(S_B, F_B, P_S, P_F, P_Z, P_{SC}, P_{inp}, t).$$

Числовое значение данного функционала называется показателем эффективности [1].

Значение показателя эффективности может изменяться в процессе функционирования системы, на что указывает наличие переменной времени t в приведённом выражении функционала.

Поскольку эффективность метода отображения информации необходимо оценивать по заданной совокупности параметров, обобщённо задача оценки эффективности заключается в установлении числовых значений выбранных показателей эффективности W_k в зависимости от показателей процесса функционирования, т. е.

$$W_B = \{W_k(S_B, F_B, P_S, P_F, P_Z, P_{SC}, P_{inp}, t) \mid k = 1, 2, \dots, m\},$$

при

$$\begin{aligned} p_{si} &\in P_S | P_{is}, P'_{is}, \Delta p_{si}; \quad i \in I, |I| = N; \\ p_{fi} &\in P_F | P_{if}, P'_{if}, \Delta p_{fi}; \quad i \in J, |J| = M; \\ p_{zi} &\in P_Z | P_{zi}, P'_{zi}, \Delta p_{zi}; \quad i \in I_Z, |I_Z| = N_Z; \\ p_{sci} &\in P_{SC} | P_{sci}, P'_{sci}, \Delta p_{sci}; \quad i \in I_{sc}, |I_{sc}| = N_{sc}; \\ p_{inpi} &\in P_{inp} | P_{inpi}, P'_{inpi}, \Delta p_{inpi}; \\ i &\in I_{inp}, |I_{inp}| = N_{inp}, \end{aligned}$$

где m — число показателей эффективности; p_{si} , p_{fi} , p_{zi} , p_{sci} , p_{inpi} — значения соответствующего i -го параметра; $P_{is} = \min\{p_{si}\}$; $P'_{is} = \max\{p_{si}\}$; $P_{if} = \min\{p_{fi}\}$; $P'_{if} = \max\{p_{fi}\}$; $P_{zi} = \min\{p_{zi}\}$; $P'_{zi} = \max\{p_{zi}\}$; $P_{sci} = \min\{p_{sci}\}$; $P'_{sci} = \max\{p_{sci}\}$; $P_{inpi} = \min\{p_{inpi}\}$; $P'_{inpi} = \max\{p_{inpi}\}$ — максимальные и минимальные значения соответствующего i -го параметра; Δp_{si} , Δp_{fi} , Δp_{zi} , Δp_{sci} , Δp_{inpi} — дискретность значений параметров; N , M , N_Z , N_{sc} , N_{inp} — число различных параметров соответствующей организации метода визуализации.

Сложность решения задачи связана с выбором дискретности изменений параметров и трудностью сравнения векторных оценок $W_B = \langle W_1, W_2, \dots, W_m \rangle$ различных вариантов организации визуализации.

Сравнивая два метода визуализации V_l и V_r , при $(V_l, V_r) \in V$, где V — множество возможных методов визуализации, будем считать, что они оцениваются одним и тем же набором показателей эффективности. Примем, что лучший способ визуализации характеризуется большим числовым значением каждого показателя. Тогда, если выполняется соотношение $\forall k \Rightarrow W_k(V_l) > W_k(V_r)$, то метод V_l предпочтительнее метода V_r .

Для рассматриваемого случая целесообразно оценивать метод визуализации по четырём группам показателей эффективности: целевого назначения ($W_{ц}$), технического совершенства ($W_{т}$), эргономичности ($W_{э}$) и экономической целесообразности ($W_{эк}$). Таким образом, метод визуализации можно представить в виде

$$W'_B = W_{ц} \cup W_{т} \cup W_{э} \cup W_{эк}.$$

Для получения обобщённого показателя эффективности метода визуализации W_{Σ} воспользуемся линейной комбинацией отдельных показателей [1]:

$$W_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m W_j \lambda_j; \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

где λ_j — весовые коэффициенты, $\sum \lambda_j = 1$.

Для определения весовых коэффициентов использовался метод экспертных оценок, в частности метод средних рангов. Согласно [2] при подборе экспертов с высокой квалификацией можно использовать небольшую их группу. Однако при численности группы экспертов менее четырёх человек возникают трудности с обработкой результатов опроса. С другой стороны, большое число экспертов в группе может «заглушить» мнение меньшинства, которое может оказаться правильным. Исходя из этого рекомендуется включать в группу экспертов от 5 до 15 человек. При исследовании бортовых систем мониторинга группа экспертов состояла из 9 человек.

В качестве экспертов выступали как наладчики, так и пользователи системы. Они были выбраны по следующим основным критериям:

опыт работы с путевыми машинами не менее пяти лет;

знание различных бортовых систем мониторинга;

знание современных технических достижений.

В качестве экспертов-наладчиков при оценке бортовых систем мониторинга выступали специалисты завода—разработчика путевых машин АО «Калугапутьмаш», а в качестве экспертов-пользователей — машинисты путевых машин из различных регионов России. Группу экспертов составили:

эксперт 1 — начальник бюро отладки цеха;

эксперт 2 — начальник цеха;

эксперт 3 — инженер цеха;

эксперт 4 — начальник ОТК цеха;

Эксперты 5...9 — машинисты путевых машин привязки Горьковской, Красноярской, Южно-Уральской, Северо-Кавказской и Куйбышевской железной дороги соответственно.

Экспертам предлагалось присвоить каждому из показателей эффективности $W_{ц}$, $W_{т}$, $W_{э}$ и $W_{эк}$ ранг от 1 до 4 в соответствии с их значимостью. Ранг 1 присваивался наиболее значимому, по мнению эксперта, показателю, ранг 4 — наименее значимому. Опрос проводился независимо, в форме анкетирования. Его результаты представлены в табл. 1. Видно, что полного согласия между экспертами нет.

Вычислим коэффициент конкордации ω по формуле [3]

$$\omega = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (1)$$

где S — сумма квадратов отклонений сумм рангов, полученных по каждому показателю эффективности, от средней суммы рангов; m — число экспертов; n — число показателей эффективности.

Таблица 1
Распределение рангов значимости показателей

Эксперт	$W_{ц}$	$W_{т}$	$W_{э}$	$W_{эк}$
1	2	3	1	4
2	1	4	2	3
3	2	3	1	4
4	2	4	1	3
5	2	3	1	4
6	2	3	1	4
7	1	3	2	4
8	2	3	1	4
9	2	3	1	4

Получаем $\omega = 0,86$. Это говорит о хорошей согласованности мнений экспертов.

Из-за отсутствия полного согласия между экспертами данные, приведённые в табл. 1, следует подвергнуть обработке по алгоритму, рассмотренному в [4].

Поскольку ответы экспертов измерены по порядковой шкале, среднеарифметическое усреднение оценок экспертов может привести к некорректному результату, так как полученное значение может не принадлежать ни к одному из рангов, присвоенных экспертами. В данном случае уместно использовать метод медиан. Итоговое упорядочивание по методу медиан имеет вид

Показатель.....	$W_{ц}$	$W_{т}$	$W_{э}$	$W_{эк}$
Медиана ранга R	2	3	1	4

Весовые коэффициенты в соответствии с вычисленными рангами распределяются по линейному закону:

$$\lambda_i = \frac{R_i + n + 1}{\sum_{j=1}^n R_j}, \quad (2)$$

где n — число показателей эффективности.

В итоге получаем весовые коэффициенты показателей:

$$\lambda_{ц} = 0,3; \lambda_{т} = 0,2; \lambda_{э} = 0,4; \lambda_{эк} = 0,1.$$

Оценим эффективность \mathcal{E} отображения информации в системе мониторинга и анализа технического состояния (БСМА) путевой машины РПБ-01 относительно системы мониторинга АСКУМ:

$$\mathcal{E} = \frac{W_{в\text{ БСМА}}}{W_{в\text{ АСКУМ}}}, \quad (3)$$

$$W_{в\text{ БСМА}} = \lambda_{ц}W_{ц\text{ БСМА}} + \lambda_{т}W_{т\text{ БСМА}} + \lambda_{э}W_{э\text{ БСМА}} + \lambda_{эк}W_{эк\text{ БСМА}}, \quad (4)$$

$$W_{в\text{ АСКУМ}} = \lambda_{ц}W_{ц\text{ АСКУМ}} + \lambda_{т}W_{т\text{ АСКУМ}} + \lambda_{э}W_{э\text{ АСКУМ}} + \lambda_{эк}W_{эк\text{ АСКУМ}}. \quad (5)$$

С помощью показателя $W_{ц}$ оценивается эффективность метода визуализации по степени его соответствия целевому назначению — отображению информации. Выразить количественно эту оценку достаточно сложно. Однако поскольку обе системы выполняют установленные техническим заданием требования, дадим оценку обеим системам, равную единице: $W_{ц\text{ БСМА}} = W_{ц\text{ АСКУМ}} = 1$.

С помощью показателя $W_{т}$ характеризуются техническое совершенство метода визуализации, учёт современных и перспективных технологий, технических и инженерных достижений. Для оценки этого показателя используем сумму таких технических характеристик систем, как быстродействие процессора системной платы ($\tilde{П}$), ресурс изделия (наработка на отказ \tilde{P}), время непрерывной работы ($\tilde{T}_{н.р}$), поколение применяемого оборудования ($\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}$):

$$W_{т\text{ БСМА}} = \lambda_{\tilde{П}}\tilde{П}_{\text{БСМА}} + \lambda_{\tilde{P}}\tilde{P}_{\text{БСМА}} + \lambda_{\tilde{T}_{н.р}}\tilde{T}_{н.р\text{ БСМА}} + \lambda_{\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}}\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}_{\text{БСМА}},$$

$$W_{т\text{ АСКУМ}} = \lambda_{\tilde{П}}\tilde{П}_{\text{АСКУМ}} + \lambda_{\tilde{P}}\tilde{P}_{\text{АСКУМ}} + \lambda_{\tilde{T}_{н.р}}\tilde{T}_{н.р\text{ АСКУМ}} + \lambda_{\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}}\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}_{\text{АСКУМ}},$$

где $\tilde{П}_{\text{БСМА}}$, $\tilde{П}_{\text{АСКУМ}}$, $\tilde{P}_{\text{БСМА}}$, $\tilde{P}_{\text{АСКУМ}}$, $\tilde{T}_{н.р\text{ БСМА}}$, $\tilde{T}_{н.р\text{ АСКУМ}}$, $\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}_{\text{БСМА}}$, $\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}_{\text{АСКУМ}}$ — приведённые значения соответствующих параметров; $\lambda_{\tilde{П}}$, $\lambda_{\tilde{P}}$, $\lambda_{\tilde{T}}$, $\lambda_{\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}}$ — соответствующие весовые коэффициенты.

Согласно данным работ [5, 6] $\tilde{П}_{\text{БСМА}} = 3300$ MIPS; $\tilde{П}_{\text{АСКУМ}} = 6$ MIPS; $\tilde{P}_{\text{БСМА}} = 30\,000$ ч; $\tilde{P}_{\text{АСКУМ}} = 30\,000$ ч; $\tilde{T}_{н.р\text{ БСМА}} = 120$ ч; $\tilde{T}_{н.р\text{ АСКУМ}} = 18$ ч; $\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}_{\text{БСМА}} = 14$; $\tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}_{\text{АСКУМ}} = 6$.

Для того чтобы привести указанные значения к одному диапазону, разделим требуемый показатель на его максимальное значение. Получим

$$\begin{aligned} \tilde{П}_{\text{БСМА}} &= 1; \tilde{П}_{\text{АСКУМ}} = 0,00182; \\ \tilde{P}_{\text{БСМА}} &= 1; \tilde{P}_{\text{АСКУМ}} = 1; \\ \tilde{T}_{н.р\text{ БСМА}} &= 1; \tilde{T}_{н.р\text{ АСКУМ}} = 0,15; \\ \tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}_{\text{БСМА}} &= 1; \tilde{П\tilde{K}\tilde{L}}_{\text{АСКУМ}} = 0,426. \end{aligned}$$

Для определения весовых коэффициентов также использовался метод экспертных оценок. Группа экспертов состояла из семи человек. Для обеспечения непредвзятости результатов в опросе принимали участие специали-

сты из различных организаций, являющиеся разработчиками современных бортовых систем мониторинга. Основными критериями выбора экспертов послужили:

опыт работы по данной тематике не менее пяти лет;

знание различных технических систем;

знание современных технических достижений.

В качестве экспертов выступали:

эксперты 11...13 — специалисты компании Prosoft — ведущего российского дистрибьютора оборудования и программного обеспечения для автоматизации технологических процессов и встраиваемых систем;

эксперты 14...16 — ведущие инженеры АО «ВНИКТИ»;

Эксперт 17 — ведущий инженер НПЦ «Динамика».

Экспертам предлагалось присвоить каждой из технических характеристик ранг от 1 до 4 в соответствии с их значимостью. Ранг 1 присваивался наиболее значимой, по мнению эксперта, характеристике, ранг 4 — наименее значимой. Опрос проводился независимо, в форме анкетирования. Его результаты представлены в табл. 2.

В соответствии с соотношением (1) коэффициент конкордации $\omega = 0,6$, что говорит об удовлетворительной согласованности мнений экспертов.

Для усреднения показаний экспертов воспользуемся методом медиан. Итоговое упорядочивание по методу медиан:

Характеристика...	<i>П</i>	<i>Р</i>	<i>T_{н.р}</i>	<i>ПКЛ</i>
Медиана ранга.....	2	2	2	4

Таким образом, согласно формуле (2)

$$\lambda_P = 0,3; \lambda_R = 0,3; \lambda_T = 0,3; \lambda_{ПКЛ} = 0,1.$$

Таблица 2

Распределение рангов значимости характеристик

Эксперт	<i>П</i>	<i>Р</i>	<i>T_{н.р}</i>	<i>ПКЛ</i>
11	1	2	3	4
12	3	2	1	4
13	3	1	2	4
14	1	2	3	4
15	2	3	1	4
16	1	2	3	4
17	3	1	2	4

В итоге получаем

$$W_{ТБСМА} = 0,3 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1 + 0,1 \cdot 1 = 1;$$

$$W_{ТАСКУМ} = 0,3 \cdot 0,00182 + 0,3 \cdot 1 + 0,3 \cdot 0,15 + 0,1 \cdot 0,426 = 0,388146.$$

Эргономические показатели W_3 связаны с инженерно-психофизическими свойствами метода визуализации и определяют уровень комфортности работы операторов. Для их оценки используем сумму количественных значений таких показателей, как яркость отображения \tilde{Y} , разрешающая способность дисплея $\tilde{P}\tilde{A}\tilde{Z}\tilde{P}$, минимальные размеры отображаемых символов $\tilde{C}\tilde{I}\tilde{M}\tilde{B}$:

$$W_{3БСМА} = \lambda_Y \tilde{Y}_{БСМА} + \lambda_{РАЗР} \tilde{P}\tilde{A}\tilde{Z}\tilde{P}_{БСМА} + \lambda_{СИМВ} \tilde{C}\tilde{I}\tilde{M}\tilde{B}_{БСМА};$$

$$W_{3АСКУМ} = \lambda_Y \tilde{Y}_{АСКУМ} + \lambda_{РАЗР} \tilde{P}\tilde{A}\tilde{Z}\tilde{P}_{АСКУМ} + \lambda_{СИМВ} \tilde{C}\tilde{I}\tilde{M}\tilde{B}_{АСКУМ},$$

где $\tilde{Y}_{БСМА}$, $\tilde{P}\tilde{A}\tilde{Z}\tilde{P}_{БСМА}$, $\tilde{C}\tilde{I}\tilde{M}\tilde{B}_{БСМА}$, $\tilde{Y}_{АСКУМ}$, $\tilde{P}\tilde{A}\tilde{Z}\tilde{P}_{АСКУМ}$, $\tilde{C}\tilde{I}\tilde{M}\tilde{B}_{АСКУМ}$ — приведённые значения соответствующих параметров.

Согласно данным работ [5, 6]

$$\tilde{Y}_{БСМА} = 800 \text{ кд/м}^2;$$

$$\tilde{P}\tilde{A}\tilde{Z}\tilde{P}_{БСМА} = 1024 \times 768 = 786\,432 \text{ пикс};$$

$$\tilde{C}\tilde{I}\tilde{M}\tilde{B}_{БСМА} = 20 \times 20 = 400 \text{ пикс};$$

$$\tilde{Y}_{АСКУМ} = 1000 \text{ кд/м}^2;$$

$$\tilde{P}\tilde{A}\tilde{Z}\tilde{P}_{АСКУМ} = 640 \times 480 = 307\,200 \text{ пикс};$$

$$\tilde{C}\tilde{I}\tilde{M}\tilde{B}_{АСКУМ} = 20 \times 20 = 400 \text{ пикс}.$$

Для того чтобы привести указанные значения к одному диапазону, разделим требуемый показатель на его максимальное значение и получим

$$\tilde{Y}_{БСМА} = 0,8; \tilde{P}\tilde{A}\tilde{Z}\tilde{P}_{БСМА} = 1;$$

$$\tilde{C}\tilde{I}\tilde{M}\tilde{B}_{БСМА} = 1;$$

$$\tilde{Y}_{АСКУМ} = 1; \tilde{P}\tilde{A}\tilde{Z}\tilde{P}_{АСКУМ} = 0,391;$$

$$\tilde{C}\tilde{I}\tilde{M}\tilde{B}_{АСКУМ} = 1.$$

Для определения весовых коэффициентов необходимо вновь прибегнуть к методу экспертных оценок. Группа экспертов состояла из тех же семи специалистов, что и при определении весовых коэффициентов для вычисления W_1 . Экспертам предлагалось присвоить

Таблица 3
Распределение рангов значимости характеристик

Эксперт	Я	РАЗР	СИМВ
11	1	3	2
12	1	2	3
13	2	3	1
14	1	3	2
15	1	3	2
16	1	3	2
17	1	3	2

каждой из технических характеристик ранг от 1 до 3 в соответствии с их значимостью. Ранг 1 присваивался наиболее значимой, по мнению эксперта, характеристике, ранг 3 — наименее значимой. Результаты опроса, проведенного независимо, в форме анкетирования, представлены в табл. 3.

Видно, что мнения экспертов практически полностью согласованы. Исходя из этого, весовые коэффициенты распределяются по линейному закону согласно (2):

$$\lambda_{Я} = 0,5; \lambda_{РАЗР} = 1/6; \lambda_{СИМВ} = 1/3.$$

Таким образом, получаем

$$W_{\text{э}}_{\text{БСМА}} = 0,5 \cdot 0,8 + \frac{1}{6} \cdot 1 + \frac{1}{3} \cdot 1 = 0,897;$$

$$W_{\text{э}}_{\text{АСКУМ}} = 0,5 \cdot 1 + \frac{1}{6} \cdot 0,391 + \frac{1}{3} \cdot 1 = 0,895.$$

Показатели группы $W_{\text{эк}}$ характеризуют экономические факторы. Выразим их численно в виде рыночной стоимости комплектующих изделия. Фактическая рыночная стоимость системы является закрытой информацией, однако по информации из открытых источников можно оценить себестоимость системы:

$$\tilde{W}_{\text{эк}}_{\text{БСМА}} = 600\,000 \text{ руб.};$$

$$\tilde{W}_{\text{эк}}_{\text{АСКУМ}} = 400\,000 \text{ руб.}$$

Для приведения данных значений к общему диапазону так же, как и в предыдущих случаях, разделим каждый из показателей на максимальное значение. Получим

$$W_{\text{эк}}_{\text{БСМА}} = 1; W_{\text{эк}}_{\text{АСКУМ}} = 0,67.$$

Подставляя числовые значения в соотношения (4) и (5), получим

$$W_{\text{в}}_{\text{БСМА}} = 0,9588; W_{\text{в}}_{\text{АСКУМ}} = 0,803429.$$

$$\text{Согласно (1)} \quad \vartheta = \frac{0,9588}{0,803429} = 1,193.$$

Следовательно, эффективность метода визуализации информации, применяемого в разработанной БСМА, в 1,193 раза выше, чем на ближайшем аналоге — системе АСКУМ.

Заключение. Представлена методика оценки эффективности метода визуализации данных мониторинга, которая позволяет учесть как технические характеристики системы, так и качество восприятия информации пользователями. Рассмотрены две системы мониторинга и анализа технического состояния железнодорожных путевых машин, применяемые в настоящее время на Российской железной дороге. Для каждой из них приведена количественная оценка эффективности применяемого метода визуализации данных, которая формируется по четырём группам показателей: эффективность целевого назначения, техническое совершенство, эргономичность и экономическая целесообразность. Значимость показателей определена с помощью метода экспертных оценок. Показано, что эффективность отображения информации на бортовой системе мониторинга и анализа технического состояния путевой машины РПБ-01, разработанной в АО «ВНИКТИ», в 1,193 раза выше, чем на автоматизированной системе контроля параметров и управления путевых машин АСКУМ, разработанной в НКБ «МИУС».

Библиографические ссылки

1. Вилкова Н.Н., Назаров С.В. Эффективность систем отображения информации коллективного пользования // Электросвязь. 2015. № 9. С. 29—33.
2. Крупнова Е.К., Елгаренко Е.А. Обработка экспертных оценок: учеб. пособие. М.: МИФИ, 1982. 96 с.
3. Ирзаев Г.Х. Экспертные методы управления технологичностью промышленных изделий. М.: Инфра-Инженерия, 2010. 192 с.
4. Орлов А.И. Эконометрика: учеб. пособие. М.: Экзамен, 2002. 576 с.
5. Автоматизированная система контроля параметров и управления машин МПТ и АДМ (АСКУМ2-01 и АСКУМ2-02): Руководство по эксплуатации. Таганрог, НКБ «МИУС», 2007. 52 с.
6. Фокин С.В., Васнев К.И. Бортовая система контроля, диагностики и управления для специального подвижного состава // Вестник ВНИКТИ: сб. науч. тр. Коломна, ОАО «ВНИКТИ», 2014. Вып. 96. С. 142—148.



УДК 621.396

В.В. Глазков, канд. техн. наук, **С.В. Микаэльян**, **И.В. Муратов**, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

wave@sm.bmstu.ru

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ДИСКРИМИНАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрена задача формирования дискриминационной характеристики оптоэлектронной следящей системы. Приведена цифровая модель дискриминационной характеристики. Получено аналитическое выражение для погрешности аппроксимации.

Ключевые слова: дискриминационная характеристика; цифровое моделирование; следящая система; численные методы.

The problem of forming a discriminating characteristic of an optoelectronic servo system is considered. A digital model of discriminative characteristics is adduced. An analytical expression for the approximation error is received.

Keywords: discrimination characteristic; digital modeling; servo system; numerical methods.

Введение. В настоящее время при решении различных задач в области управления широко используются оптоэлектронные приборы. Достаточно обширным классом таких приборов являются оптоэлектронные следящие системы (ОЭСС). ОЭСС автоматического сопровождения движущихся целей позволяют получать непрерывную информацию об угловых координатах цели, а также определять угловую скорость линии визирования.

Входным элементом ОЭСС является анализатор оптического излучения, который и формирует требуемую дискриминационную характеристику (ДХ). Аналитический расчёт ДХ возможен только в ряде частных случаев и требует введения значительных упрощений. В общем случае чаще всего используют численные методы, для реализации которых необходима цифровая модель ДХ ОЭСС. Имеется ряд работ [1–5], посвящённых цифровому моделированию процесса сопровождения различных объектов, поэтому данный вопрос в настоящее время является актуальным.

Формирование дискриминационной характеристики. Рассмотрим формирование сигнала на выходе фотоприёмника ОЭСС. Чувствительный слой фотоприёмника покрыт непрозрачной крестообразной маской. Пятно, частично выступающее за пределы маски, условно изображает сопровождаемый объект.

Напряжение на выходе фотоприёмника можно описать формулой

$$U(x_T, y_T) = \iint_{(D)} E(x, y) dx dy, \quad (1)$$

где (D) — область пересечения прозрачного окна раstra и пятна, которое в фокальной плоскости является изображением сопровождаемого объекта; $E(x, y)$ — распределение освещённости внутри пятна, x_T, y_T — координаты центра пятна.

На рис. 1 изображён возможный вариант расположения пятна относительно маски (показана 1/4 часть раstra).

При математическом моделировании оказывается удобным вписать круглое пятно в квадрат. При этом пятно также разбивается на элементы, например так, как показано на рис. 2. Все элементы перенумерованы, начиная с верхнего левого угла, и образуют двумерный массив. Относительные координаты (x, y) центральных точек элементов вычисляются по формулам

$$x = 2h \left(\frac{1/h - 1}{2} + k - 1 \right), 1 \leq k \leq 10;$$

$$y = 2h \left(\frac{1/h - 1}{2} + l - 1 \right), 1 \leq l \leq 10,$$

где h — половина стороны элемента разбиения; k, l — индексы элементов разбиения.

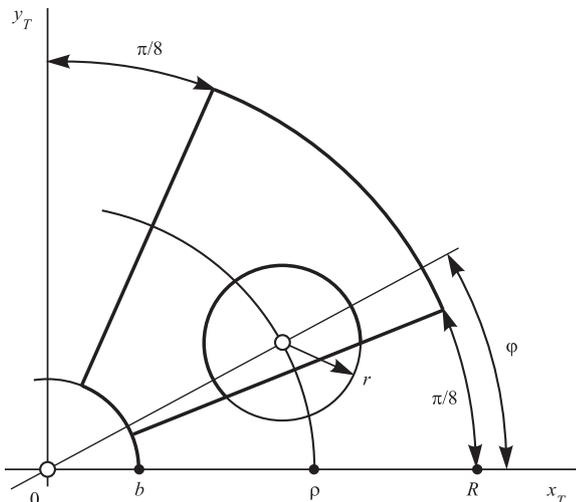


Рис. 1. Геометрические соотношения пятна и прозрачного окна растра:

b — внутренний радиус прозрачного участка растра; R — внешний радиус прозрачного участка растра; r — радиус изображения цели; ρ — текущий радиус центра изображения в полярной системе координат; φ — текущий угол центра изображения в полярной системе координат

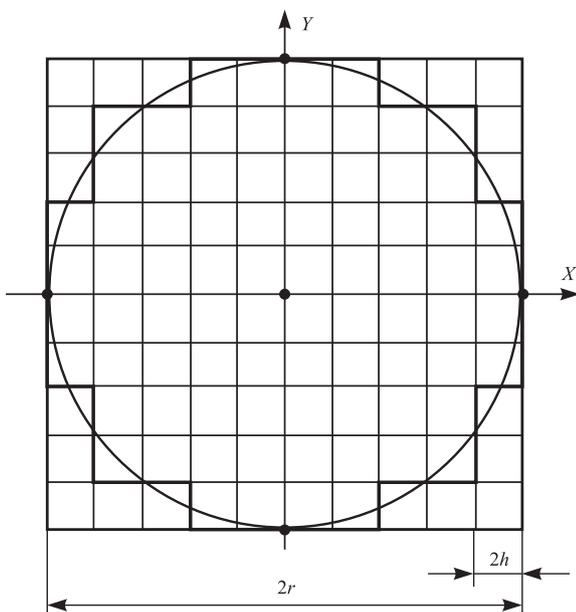


Рис. 2. Разбиение круглого пятна на элементы:
 $2h$ — размер стороны элемента разбиения; $2r$ — сторона аппроксимирующего квадрата

Если центр элемента находится вне окружности пятна, то ему присваивается вес, равный нулю. В противном случае присваивается вес, равный значению функции $E(x, y)$, отнесенный к центру элемента.

При равномерной засветке все такие элементы пятна имеют один и тот же вес. Для определённости примем вес, равный единице.

Расчёт интеграла (1) производится путём суммирования весов элементов, оказавшихся

в области пересечения прозрачной области растра и пятна. В данном случае, благодаря специфической геометрии растра, наиболее удобно расчёт производить путём проверки выполнения неравенств вида

$$x^2 + y^2 > b^2; \tag{2}$$

$$x^2 + y^2 \leq R^2, \tag{3}$$

а также

$$y/x \geq \tan(\pi/8); \tag{4}$$

$$y/x \leq \tan(3\pi/8). \tag{5}$$

Благодаря симметрии растра достаточно ограничиться формулами (2)—(5), справедливыми для первого квадранта плоскости (x, y) .

С помощью программы на языке MatLab был произведён расчёт площади светового пятна. Исходные данные для расчёта взяты в условных единицах:

максимальный радиус прозрачной части растра $R = 5$;

радиус светового пятна в фокальной плоскости ОЭСС $r = 1$;

сторона аппроксимирующего квадрата $2r = 2$;

число разбиений аппроксимирующего квадрата $n = 10 \times 10 = 100$;

размер стороны элемента разбиения $2h = 2 \cdot 0,1 = 0,2$;

площадь светового пятна $S_{\text{п}} = \pi r^2 = \pi$;

площадь квадрата $S_{\text{кв}} = 4r^2 = 4$;

площадь одного элемента разбиения $4h^2 = 0,04$.

В результате проверки условия $x^2 + y^2 > r^2$, определено, что световое пятно содержит 80 элементов разбиения.

С учётом периодичности растра рассчитаны значения зависимости дискриминацион-

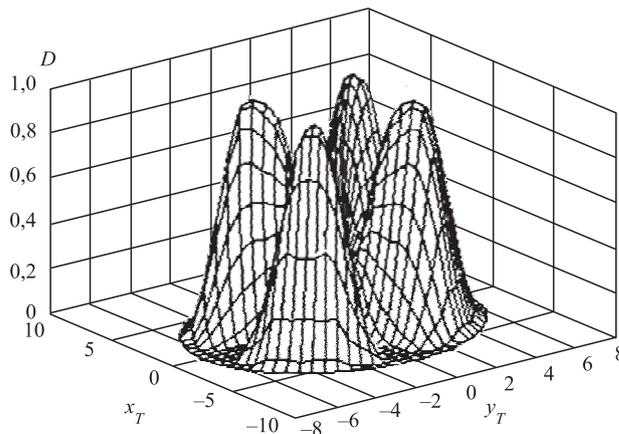


Рис. 3. Поверхность ДХ

ной характеристики от полярного угла φ при различных значениях модуля ошибки $0 < \rho < 6,5$. Трёхмерное изображение поверхности ДХ в прямоугольной системе координат представлено на рис. 3.

Цифровая модель дискриминационной характеристики. При математическом моделировании следящей системы непосредственное использование формулы (1) приводит к неоправданно большим затратам времени. Задача состоит в математическом описании зависимости между выходным напряжением на фотоприёмнике и координатами центра изображения при заданной функции облученности в конечной (не интегральной) форме. Из рис. 3 следует, что ДХ является чётной периодической функцией с периодом $\pi/2$ по отношению к полярному углу φ . Поэтому имеет смысл воспользоваться разложением зависимости $D(\rho, \varphi)$ в ряд по $\cos(\varphi)$ для ограниченного числа гармоник. Последующим построением интерполяционных многочленов по каждой из гармоник эта зависимость распространяется на всю область изменения переменных φ и ρ .

Таким образом, сформулируем задачу практического гармонического анализа: аппроксимировать на интервале $(0, T)$ тригонометрическим полиномом N -го порядка функцию $y = f(x)$, для которой известны m её значений

$$y_k = f(x_k) \text{ при } x_k = kT/m,$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, m - 1$.

Тригонометрический полином для функции, определённой на интервале $(0, T)$, имеет вид

$$Q_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N \left[a_n \cos\left(n \frac{2\pi}{T} x\right) + b_n \sin\left(n \frac{2\pi}{T} x\right) \right],$$

где

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cos n \frac{2\pi}{T} dx;$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \sin\left(n \frac{2\pi}{T}\right) dx, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N.$$

Вычисление коэффициентов Фурье по этим формулам в данном случае не представляется возможным, так как функция $f(x)$, а в нашем случае $D(\rho, \varphi)$, задаётся дискретным числом точек, полученных путём предыдущего моделирования. Пакет MAPLE даёт воз-

можность вычисления первых четырёх коэффициентов a_0, a_1, a_3, a_5 ряда Фурье для чётных функций по методу наименьших квадратов при фиксированном ρ :

$$D = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{\pi}{10} \varphi\right) + a_3 \cos\left(\frac{3\pi}{10} \varphi\right) + a_5 \cos\left(\frac{5\pi}{10} \varphi\right).$$

Листинг для получения этих коэффициентов имеет следующий вид:

```
restart;
with(stats);
omega := evalf((1/10)*Pi);
X_values := [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20];
Y_values := [0, 1, 8, 16, 29, 40, 51, 64, 72, 79, 80, 79, 72, 64, 51, 40, 29, 16, 8, 1, 0];
eq_fit := evalf(fit[leastsquare][x, y, y = a0 + a1 * cos(omega*x) + a3 * cos(3*omega*x) + a5*cos(5*omega*x), {a0, a1, a3, a5}]([X_values, Y_values]));
y = 40.01 - 40.17 cos(0.3141592654 x) - 0.50 cos(0.9424777962 x) + 0.42 cos(1.570796327 x)
with(plots);
pic1 := plot(40.01-40.17*cos(.31*x)-.50*cos(.94*x) +.42*cos(1.57*x), x = 0.. 20);
pic2 := plot([[0, 0], [1, 1], [2, 8], [3, 16], [4, 29], [5, 40], [6, 51], [7, 64], [8, 72], [9, 79], [10, 80], [11, 79], [12, 72], [13, 64], [14, 51], [15, 40], [16, 29], [17, 16], [18, 8], [19, 1], [20, 0]], style = point);
display({pic1, pic2}).
```

На рис. 4 приведены дискретные значения коэффициентов a_0, a_1, a_3, a_5 и их аппроксимирующие полиномы

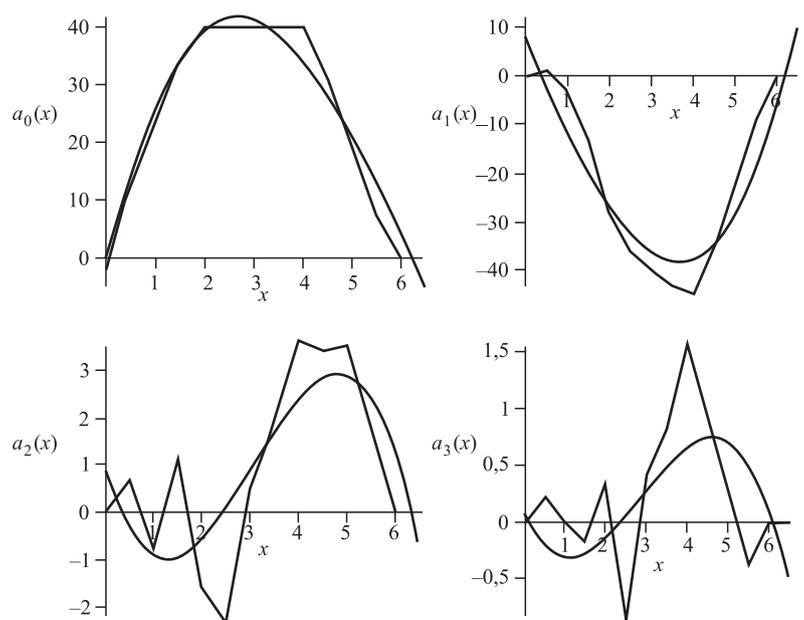


Рис. 4. Дискретные значения коэффициентов a_0, a_1, a_3, a_5 и их аппроксимирующие полиномы

мирующие полиномы, вычисленные по приведённой выше методике. Зависимость коэффициентов разложения от ρ можно аппроксимировать многочленами не выше третьего порядка.

Из рис. 4 видно, что пятая гармоника вычисляется с наибольшей погрешностью. Это объясняется сравнительно небольшим числом элементов матрицы разбиения пятна (в данном случае 100). Однако сама пятая гармоника невелика, и при дальнейших построениях её можно не учитывать без потери точности моделирования.

Существуют более точные методы аппроксимации данных, но следует учитывать, что исходным материалом послужило приближённое вычисление интегральной суммы непосредственным расчётом дискретных элементов, поэтому метод наименьших квадратов с его сглаживающими свойствами является наиболее подходящим в данном случае. Зависимость каждой из амплитуд тригонометрических многочленов аппроксимируется многочленом вида

$$a_v(\varepsilon) = f_{3v}\varepsilon^3 + f_{2v}\varepsilon^2 + f_{1v}\varepsilon + f_{0v}, \quad v = 0, 1, 3, 5.$$

Если пренебречь пятой гармоникой, то ДХ характеризуется 12 числами, которые можно использовать для дальнейшего моделирования процесса слежения.

На рис. 5 приводится аппроксимирующая поверхность ДХ, выполненная средствами трёхмерной графики MAPLE и близкая к расчитанной ранее (см. рис. 3). Для повышения

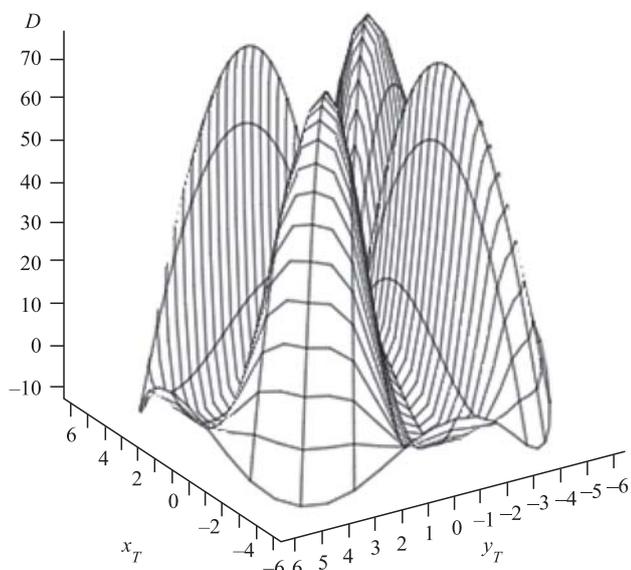


Рис. 5. Аппроксимирующая поверхность ДХ

точности построений использованы данные моделирования с уменьшенным шагом по ρ .

Листинг для получения аппроксимирующей поверхности имеет следующий вид:

```
restart;
f00:= -1.96; f01:= 35.92; f02:= -8.49; f03:=.45;
f10:= 7.83; f11:= -20.61; f12:=.87; f13:=.36;
f30:=.98; f31:= -3.37; f32:= 1.66; f33:= -.18;
a0:= f03*x^3 + f02*x^2 + f01*x + f00;
a1:= f13*x^3 + f12*x^2 + f11*x + f10;
a3:= f33*x^3 + f32*x^2 + f31*x + f30;
plot3d([x*cos(phi), x*sin(phi), a0 + a1*cos(4*phi) + a3*cos(12*phi)],
x = 0..6.5, phi = 0..2*Pi).
```

Погрешность аппроксимации. При построении цифровой модели важно оценивать максимальную погрешность аппроксимации. Рассмотрим произвольную ограниченную и интегрируемую функцию $f(x)$ на отрезке $[-\pi, \pi]$.

При аппроксимации необходимо выбрать коэффициенты α_k и β_k в конечной сумме

$$P_n(x) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{k=1}^n (\alpha_k \cos kx + \beta_k \sin kx),$$

таким образом, чтобы погрешность

$$r_n = \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) - P_n(x))^2 dx \tag{6}$$

получила наименьшее значение. Очевидно, что погрешность r_n есть функция $2n + 1$ переменных $\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1, \dots, \alpha_n, \beta_n$, и необходимо определить минимум этой функции. Специальная природа этой задачи позволяет обойтись без дифференцирования по всем коэффициентам.

Представим выражение (6) в виде

$$r_n = \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x)dx + \int_{-\pi}^{\pi} P_n^2(x)dx - 2 \int_{-\pi}^{\pi} f(x)P_n(x)dx. \tag{7}$$

Ввиду справедливости формул вычисления коэффициентов разложения в ряд Фурье

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x)P_n(x)dx = \pi \left(\frac{\alpha_0 a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (\alpha_k a_k + \beta_k b_k) \right). \tag{8}$$

Далее, ввиду ортогональности системы функций $1, \cos x, \sin x, \dots, \cos nx, \sin nx, \dots$, имеем

$$\int_{-\pi}^{\pi} P_n^2(x)dx = \pi \left(\frac{\alpha_0^2}{2} + \sum_{k=1}^n (\alpha_k^2 + \beta_k^2) \right). \tag{9}$$

Подставив формулы (8) и (9) в выражение (7) и имея в виду элементарные тождества

$$\begin{aligned}\alpha_k^2 - 2a_k\alpha_k &= (\alpha_k - a_k)^2 - a_k^2, \\ \beta_k^2 - 2b_k\beta_k &= (\beta_k - b_k)^2 - b_k^2,\end{aligned}$$

получаем

$$\begin{aligned}& \int_{-\pi}^{\pi} \Pi_n^2(x) dx - 2 \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \Pi_n(x) dx = \\ &= \pi \left(\frac{(\alpha_0 + a_0)^2}{2} + \sum_{k=1}^n ((\alpha_k - a_k)^2 + \beta_k b_k) \right) - \\ & \quad - \pi \left(\frac{\alpha_0^2}{2} + \sum_{k=1}^n (\alpha_k^2 + \beta_k^2) \right).\end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned}r_k &= \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x) dx - \pi \left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k^2 + b_k^2) \right) + \\ &+ \pi \left(\frac{(\alpha_0 - a_0)^2}{2} + \sum_{k=1}^n ((\alpha_k - a_k)^2 + (\beta_k - b_k)^2) \right).\end{aligned}$$

Очевидно, что правая часть последнего равенства приобретает минимальное значение при $\alpha_k = -a_k$, $\beta_k = -b_k$. Данный результат позволяет сформулировать утверждение: из всех тригонометрических полиномов наилучшая аппроксимация функции $f(x)$ в среднеквадратическом смысле достигается, если коэффициенты многочлена вычисляются по формулам расчёта коэффициентов ряда Фурье.

Отсюда следует ещё один вывод. Возвращаясь к обозначению (7), при наилучшей аппроксимации видно, что справедливо тождество Бесселя:

$$\begin{aligned}& \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) - P_n(x))^2 dx = \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x) dx - \pi \left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k^2 + b_k^2) \right).\end{aligned}\quad (10)$$

В выражении (10) $P_n(x) = \Pi_n(x)$ при $\alpha_k = a_k$, $\beta_k = b_k$ и левая часть равенства неотрицательна. Отсюда вытекает неравенство Бесселя

$$\frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k^2 + b_k^2) \leq \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x) dx. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что при сколь угодно большом значении n сумма в левой части последнего соотношения остаётся ограниченной, и следовательно, коэффициенты Фурье стремятся к нулю вместе с неограниченным возрастанием индекса k .

Заключение. Использование предлагаемой процедуры при моделировании проще по сравнению с программированием аналитических выражений, поскольку в этих случаях приходится обращаться к вычислению косинусов и целых многочленов.

Также отметим, что аппроксимация с помощью ортогональной системы функций с коэффициентами является наилучшей с точки зрения среднеквадратической погрешности. Это, в частности, означает, что аппроксимирующая функция S_{appr} имеет наименьшую погрешность относительно функции S , возникающую из-за отбрасывания остатка ряда Фурье.

Библиографические ссылки

1. Муратов И.В., Лихоеденко К.П., Хохлов В.К. Моделирование бортового радиолокационного координатора цели миллиметрового диапазона радиоволн // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 11. С. 18—22.
2. Муратов И.В. Математическая модель пеленгационной характеристики следающего координатора цели // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. № 11. С. 34—38.
3. Глазков В.В., Муратов И.В. Разработка математической модели сопровождения воздушных объектов // Вестник СибГУТИ. 2016. № 3 (35). С. 93—99.
4. Ковригин В.А., Муратов И.В., Хохлов В.К. Численное исследование срыва слежения за частотой в доплеровской головке самонаведения для точечной цели // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т. 20. № 3. С. 24—33.
5. Глазков В.В., Муратов И.В., Цисарский А.Д. Математическое моделирование процесса сопровождения воздушных объектов // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 10. С. 38—42.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала.

При этом ссылка на журнал обязательна.



ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Инженерный метод геометрического синтеза планетарного механизма роторной гидромашины. *Вестник машиностроения.* 2017. № 10.

Рассмотрены новый подход к геометрическому синтезу некруглых зубчатых звеньев роторной гидромашины, а также соответствующая ему инженерная методика, реализуемая с использованием общедоступного математического программного обеспечения и стандартных пакетов графических компьютерных программ.

Влияние накопленной энергии в ёмкостных системах зажигания ГТД и частоты искровых разрядов на ресурс полупроводниковых свечей зажигания. *Вестник машиностроения.* 2017. № 10.

Исследуется изменение ресурса полупроводниковых свечей зажигания газотурбинных двигателей (ГТД) от накопленной в ёмкостной системе зажигания энергии и частоты искровых разрядов при разных условиях пуска ГТД.

Исследования гидроабразивного изнашивания прецизионных сопряжений гидрораспределителей тракторов. *Вестник машиностроения.* 2017. № 10.

Рассмотрено влияние абразивных загрязнителей в рабочей жидкости на изнашивание прецизионных деталей тракторных гидросистем. Приведены результаты ускоренных ресурсных испытаний гидрораспределителей тракторов.

Исследование процесса обработки твёрдых горных пород алмазно-твердосплавными пластинами. *Вестник машиностроения.* 2017. № 10.

Разработан режущий измерительный блок (РИБ) для измерения основных параметров процесса бурения твёрдых горных пород долотами, оснащёнными алмазно-твердосплавными пластинами. Блок обеспечивает сбор и передачу по радиоканалу информации в компьютер.

Комбинированный процесс литья под низким давлением и по газифицируемым моделям — новый способ изготовления облегченных автомобильных компонентов. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2017. № 10.

На основе комбинированного процесса литья под низким давлением и по газифицируемым моделям разработаны следующие технологии для изготовления облегченных автомобильных компонентов: литьё полых деталей без использования стержней; изготовление отливок, армированных непрерывным волокном в областях максимального нагружения; изготовление

отливок на основе лёгких материалов (керамических или металлических пен, металлических полых частиц).

Проектирование технологического процесса штамповки полых сфер из алюминиевого сплава АД1. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2017. № 10.

Рассмотрен вопрос проектирования технологического процесса штамповки полых сфер из алюминиевого сплава АД1, являющихся составным элементом плавучего понтона, используемого при хранении и транспортировке лёгких углеводородов. Особенностью представленного технологического процесса является учёт особенностей взаимодействия в системе «заготовка—инструмент», обеспечивающих отсутствие налипания материала заготовки на инструмент, что приводит к увеличению стойкости инструмента. Представлены сведения о необходимом числе элементов плавучего понтона и времени заполнения резервуара с хранимым нефтепродуктом.

Лазерное поверхностное легирование титана и его сплавов марганцем и железом. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2017. № 10.

Изложены закономерности формирования состава, структуры и свойств поверхности титана и его сплавов при лазерном легировании марганцем, железом или марганцем и железом совместно.

Проанализированы особенности формирования фазового состава зоны оплавления при лазерном легировании титана.

Моделирование лазерного упрочнения вершины режущего клина инструмента. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2017. № 10.

Численно методом конечных элементов в трёхмерной постановке решена задача о нагреве вершины режущего клина инструмента импульсным лазерным излучением. Разработанная модель учитывает влияние как геометрических параметров инструмента, так и пространственных и временных характеристик лазерного излучения на формирование температурного поля в зоне лазерной обработки. Путём численных экспериментов определены режимы упрочняющей лазерной обработки вершины режущего клина инструмента, обеспечивающие максимальную глубину упрочнения в области вершины реза и протяженность зоны упрочнения вдоль главной

и вспомогательной кромок резца. Разработана методика выбора технологических параметров процесса упрочнения вершины резца.

Влияние электромеханической обработки на структуру и твёрдость титанового сплава BT22. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2017. № 10.

Определено влияние различных способов электромеханической обработки на структуру и твёрдость титанового сплава BT22. Представлены результаты исследования структуры упрочнённых поверхностей и измерения их твёрдости по глубине изделий. Приведены рекомендации по выбору способов обработки различных деталей.

Исследование технологических возможностей метода удаления покрытий с поверхности деталей ГТД водой под высоким давлением. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2017. № 10.

Рассмотрены проблемы, связанные с удалением различных покрытий при ремонте деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Предложен новый метод удаления покрытий с описанием его технологических возможностей, преимуществ и недостатков.

Новый метод проектирования электромеханических преобразователей энергии с использованием генетических алгоритмов. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2017. № 10.

Представлен новый метод оптимального проектирования электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ), основанный на генетическом алгоритме. Разработано математическое описание алгоритма и проведено оптимальное проектирование высокооборотного ЭМПЭ предлагаемым методом. Новый метод оптимального проектирования позволил получить ЭМПЭ, масса которого в два раза меньше

исходного, активная длина ротора в 2,37 раза меньше исходного, плотность тока увеличилась (по отношению к исходному) в 1,7 раза, при этом потери увеличились только на 25 %.

Сравнительная оценка интенсивности износа гребней стандартных и инновационных колёс грузовых вагонов. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2017. № 10.

Рассмотрены результаты дорожного эксперимента по определению износа гребней колёс, изготовленных из стали Ст2 в конструктивном исполнении по ГОСТ 10791—2011 и изготовленных из стали повышенного качества и твёрдости в конструктивном исполнении по ТУ 0943-170-01124323—2004.

Компьютерное моделирование и проектирование светодиодного светильника с автономным источником питания. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2017. № 10.

Рассмотрены особенности архитектурного освещения и световые приборы. Проанализированы требования к архитектурным светильникам и их особенности, солнечные элементы, их принцип работы и устройство. Описаны разработанный светильник, его конструкция и источники света, электронные элементы прибора. Осуществлено моделирование светораспределения и освещения светильника.

Программное обеспечение для автоматизированного проектирования пальцевой фасонной фрезы для эвольвентной винтовой шестерни. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2017. № 10.

Представлено разработанное программное обеспечение для автоматизированного расчёта конструктивных параметров и построения моделей и чертежей фасонных фрез.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 26.12.2017.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

Подписано в печать 22.02.2018.

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация. Современные технологии» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель
