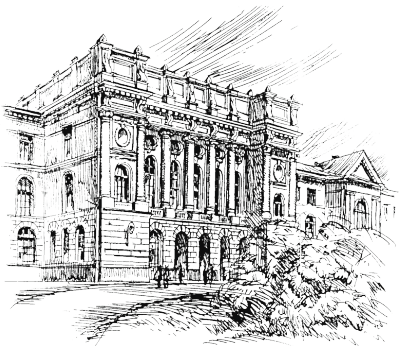
6–1(138)/2011



Научно-технические ведомости СПбГПУ

ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

Том 1

К 35-летию образования факультета технической кибернетики

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Алферов Ж.И., академик РАН; *Васильев Ю.С.*, академик РАН (председатель);
Костюк В.В., академик РАН; *Лопота В.А.*, чл.-кор. РАН;
Окрепилов В.В., чл.-кор. РАН; *Рудской А.И.*, чл.-кор. РАН;
Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН; *Федоров М.П.*, чл.-кор. РАН;
Фортов В.Е., академик РАН.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (главный редактор); *Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор (зам. гл. редактора);
Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор; *Глухов В.В.*, д-р экон. наук, профессор;
Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор; *Иванов А.В.*, д-р техн. наук, профессор;
Иванов В.К., д-р физ.-мат. наук, профессор; *Козловский В.В.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН (зам. гл. редактора); *Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН.

СЕРИЯ "ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ"

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;
Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;
Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;
Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;
Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;
Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор – зам. председателя;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор – зам. председателя;
Болдырев Ю.Я., д-р техн. наук, профессор;
Пышкина Г.А., технический секретарь;
Карпов Ю.Г., д-р техн. наук, профессор;
Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор;
Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор;
Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор;
Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор;
Шабров Н.Н., д-р техн. наук, профессор;
Клавдиев В.Е., канд. техн. наук, доцент.

Журнал выходит под научно-методическим руководством Российской академии наук с 1995 года.

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал издается в пяти сериях:
Наука и образование;
Физико-математические науки;
Экономические науки;
Информатика, телекоммуникации, управление;
Гуманитарные и общественные науки.

Журнал зарегистрирован в Госкомпечати РФ. Свидетельство № 013165 от 23.12.94.

Подписной индекс **18390** в каталоге "Газеты. Журналы" Агентства "Роспечать".

Журнал включен в базу данных "Российский индекс научного цитирования" (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки на сайте http://www.elibraru.ru.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции серии (812) 552-62-16.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011

Содержание

35 лет факультету технической кибернетики

Бабко Л.В., Мелехин В.Ф. *Истоки создания факультета технической кибернетики* 7

Кнорринг В.Г. *Восемь десятилетий кафедры измерительных информационных технологий ФТК – взгляд с трех точек зрения* 14

Васильев Ю.С., Черноруцкий И.Г. *К истории полета Юрия Алексеевича Гагарина* 18

Аппаратные и программные средства систем управления

Васильев А.Е., Мурго А.И. *Проектирование подсистем сетевого обмена данными для встраиваемых устройств управления на основе микроконтроллеров* 25

Тутыгин В.С., Южаков А.В. *Цифровая обработка спутниковых ЛЧМ-сигналов в реальном времени средствами ПЛИС XILINX* 32

Скворцов А.Н. *Оценка предельного быстродействия и энергопотребления при проектировании LVDS передатчиков* 39

Максименко С.Л. *Автоматизированный реинжиниринг цифровых устройств на основе HDL-спецификаций* 44

Беляева Н.И., Курмашев А.Д. *Исследование контурных режимов двухкоординатных систем воспроизведения программного движения* 50

Глухих М.И., Максименко С.Л., Мелехин В.Ф., Филиппов А.С. *Организация и проектирование высоконадежных вычислительных систем* 54

Березкин А.В., Федотов А.А., Филиппов А.С. *Тестирование цифровых систем, заданных высокоуровневыми спецификациями* 62

Моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Птицына Л.К., Смирнов Н.Г. *Разработка и анализ моделей интеграции сервис-ориентированных средств в гетерогенных сетях* 71

Фирсов А.Н. *Экспоненциальная устойчивость и точные решения уравнения Больцмана в двух частных случаях* 81

Шаповалов А.А., Курмашев А.Д. *Компьютерное моделирование контурных систем управления промышленных роботов* 84

Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. *От научно-исследовательской до промышленной версии: на примере среды визуального моделирования Rand Model Designer* 92

Ивановский Р.И. *Прикладные аспекты теории чувствительности* 102

Сениченков Ю.Б., Цзычэнь Чжан. *Конвертирование моделей* 111

Беляев А.Н., Ивановский Р.И., Карпов Ю.Г., Сотников К.А. *Smart grid. Разработка приложений* 115

Куликов К.Г. *Задача рассеяния света на телах произвольной формы, моделирующих клетки крови для случая in vivo* 121

Системный анализ и управление

Ростов Н.В. *Многокритериальная идентификация в компьютерном проектировании систем автоматического управления* 129

Черкесов Г.Н. *Проблема ЗИП и задача формирования нового раздела теории надежности восстанавливаемых систем* 136

Лыпарь Ю.И., Балтруков Н.Н., Скворцов А.Н. *Проектирование передатчика цифровых сигналов стандарта LVDS на основе теории системно-структурного синтеза* 153

Васильев А.Ю., Куприянов В.Е. *Синтез регуляторов по выходу для линейных объектов* 170

Бендерская Е.Н. *Перспективные концепции разработки интеллектуальных систем* 173

Лыпарь Ю.И., Молодяков С.А. *Методология системного проектирования аналогоцифровых оптоэлектронных процессоров обработки сигналов* 181

Нгуен Д.Х., Козлов В.Н., Фирсов А.Н. *Решение задачи об управлении нестационарной транспортировкой вязкой жидкости по системе трубопроводов* 190

Информационные системы и программное обеспечение

Кузнецов А.Н., Пышкин Е.В. *Алгоритм сравнения нотных фрагментов при поиске музыкальной информации по образцу мелодии* 195

Котляров В.П. *Критерии покрытия требований в тестовых сценариях, сгенерированных из поведенческих моделей приложений* 202

Нестеров С.А. *Методика построения и оптимизации комплекса средств защиты на основе результата анализа рисков* 207

Магер В.Е., Саралийский А.А., Стеганцов А.В., Черненькая Л.В. *Информационная поддержка системы менеджмента качества СПбГПУ* 212

Информационно-измерительные системы

Шедов С.В. *Способ компенсации станционных помех при обработке ЛЧМ-сигналов* 215

Тутыгин В.С. *Способ повышения точности определения времени задержки зашумленных радиолокационных эхо-сигналов* 220

Вытовтов А.А., Мешалкина М.Н. *Применение инфракрасной Фурье-спектроскопии для определения подлинности и качества молочных продуктов* 226

Со И.А., Малыхина Г.Ф. *Новый метод измерения цветовых различий* 233

Научный семинар ФТК

Сайто Х., Мараховский В.Б., Пышкин Е.В. *Автоматизация проектирования асинхронных схем* 237

Сведения об авторах 239

Аннотации 243

Contents

35th Anniversary of the Faculty of Computer Science

Babko L.V., Melekhin V.F. *Origins of the Faculty of Computer Science* 7

Knorring V.G. *80 years of the Department of Measuring Information Systems: Three points of view* 14

Vassiliev Yu.S., Chernorutsky I.G. *To the history of Yuri Gagarin's spacefaring* 18

Control Systems Hardware and Software

Vassiliev A.E., Murgo A.I. *Design of MCU-based network interconnection subsystems* 25

Tutygin V.S., Yuzhakov A.V. *Satellite LFM signals real time digital processing based on using PLD XILINX* 32

Skvortsov A.N. *Boundary transfer rate and power consumption estimation in design of LVDS transmitters* 39

Maximenko S.L. *Digital systems automated reengineering based on HDL specifications* 44

Belyaeva N.I., Kurmashev A.D. *Study contour modes of two-coordinate systems of programmed motion playback* 50

Glukhikh M.I., Maximenko S.L., Melekhin V.F., Filippov A.S. *High reliable computer systems design and development* 54

Berezkin A.V., Fedotov A.A., Filippov A.S. *Testing digital systems defined by high level specifications* 62

Modelling: Methods, Algorithms, Technologies

Ptitsina L.K., Smirnov N.G. *The development and analysis of service integration Models in Heterogeneous Environment* 71

Firsov A.N. *Exponential stability and exact solution of the Boltzmann equation in two special cases* 81

Shapovalov A.A, Kurmashev A.D. *Computer simulation of contouring control system of electric drives of industrial robots* 84

Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *From research to production: Rand Model Designer visual modelling environment* 92

Ivanovskiy R.I. *Applied aspects of the sensibility theory* 102

Senichenkov Yu. B., Dzechen Chgan. *Converting models* 111

Belyaev A.N., Ivanovskiy R.I., Karpov Yu.G., Sotnikov K.A. *Smart Grid. Application development* 115

Kulikov K.G. *The problem scattering light in the bodies of arbitrary shape, simulating blood cells for the case of in vivo* 121

System Analysis and Control

Rostov N.V. *Multiobjective identification in computer-aided design of automatic control systems* 129

Cherkesov G.N. *The spare part assembly problem and working out the new section of the reliability theory of repairable systems* 136

Lypar Yu.I., Baltrukov N.N., Skvortsov A.N. *LVDS standard digital signaling transmitter design based on the theory of system structural synthesis* 153

Vassiliev A.Yu., Kupriyanov V.E. *Output regulators synthesis for linear objects* 170

Benderskaya E.N. *Artificial intelligence: perspective trends* 173

Lypar Yu.I., Molodyakov S.A. *System design methodology for analog and digital optoelectronic signal processors* 181

Nguyen D.Kh., Kozlov V.N., Firsov A.N. *Solution of the problem on the control of unsteady viscous fluid transportation in pipelines* 190

Information Systems and Software Engineering

Kuznetsov A.N., Pyshkin E.V. *An algorithm for notated musical fragments comparison in searching for music by a melody sample* 195

Kotlyarov V.P. *Requirement coverage criteria for test cases generated from applications' behavioral models* 202

Nesterov S.A. *Security facilities construction and optimization based on risk analysis* 207

Mager V.E., Saraliysky A.A., Stegantsov A.V., Chernenkaya L.V. *Informational support for the quality management system of the Saint-Petersburg Polytechnical University* 212

Measuring Information Systems

Shedov S.V. *Approach to compensate stations noise for LFM signals* 215

Tutygin V.S. *Accuracy increasing of delay definition noised radar echo-signals* 220

Vytovtov A.A., Meshalkina M.N. *Application of infrared Fourier spectroscopy for milk food authenticity and quality evaluation* 226

So I.A., Malykhina G.F. *A new method for measuring color differences* 233

Research seminar

Saito H., Marakhovsky V., Pyshkin E. *Design automation for asynchronous circuits* 237

About the authors 239

Abstracts 243

УДК 007

Л.В. Бабко, В.Ф. Мелехин

ИСТОКИ СОЗДАНИЯ ФАКУЛЬТЕТА ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ

В текущем 2011 году факультету технической кибернетики исполняется 35 лет. В СПбГПУ этот факультет является базовым, на нем проводится обучение студентов в области компьютерных наук. Осознать закономерности современного состояния факультета и заглянуть в его будущее можно только с учетом анализа предыстории – истоков создания и процессов становления нового факультета как закономерных процессов, связанных с развитием науки, техники и образования.

Кибернетика, информатика и вычислительная техника – новые научные направления XX века

Важнейшими событиями, связанными с рассматриваемыми процессами, стали возникновение и развитие в XX в. новых направлений в науке и технике: кибернетики, вычислительной техники и информатики.

В 1948 г. в США вышла книга Норберта Винера «Кибернетика, или управление и связь в животном и машине» [1], сыгравшая большую роль в развитии науки XX в. и давшая имя одному из важнейших ее направлений. Это стало новым этапом развития науки об управлении. Именно в кибернетике была определена информация как важнейшая категория, которая наряду с материей и энергией является базовым понятием в развитии научной и хозяйственной деятельности.

Сейчас, спустя 60 лет, уже осознано и определено, что развитие цивилизации с середины XX в. перешло от этапа индустриального к постиндустриальному, называемому *информационным* [2, 3]. Характерные признаки этого: экспоненциальный рост объема информации, используемой во всех сферах жизни; быстрый рост инструментальной оснащенности человека в получении, хранении, обработке и передаче информации, повышающий интенсивность информационных процессов на много порядков; перераспределение трудовых ресурсов (в настоящее время более 85 % людей заняты в информационной сфере, в начале XX в. эта доля была менее 10 %).

Объектом исследований в кибернетике стали кибернетические системы. Кибернетическая система – это модель любой системы, в которой рассматриваются процессы получения, хранения, обработки, передачи информации и ее использования для формирования воздействий на изменение состояния системы и ее окружения. Энергетические потоки, физико-химические процессы, используемые для представления сигналов, с помощью которых кодируется информация, при этом являются вторичными и в рамках кибернетической системы не рассматриваются. Созданная во время индустриального этапа развития высшая математика служила основой для описания энергетических и материальных потоков и процессов. Она не позволяла адекватно описывать информационные процессы. Поэтому стали возникать новые ветви так называемой *компьютерной математики* [2], позволявшей формализовать постановку задач исследования кибернетических систем.

Ко времени формирования научного направления кибернетика появились первые ЭВМ, накапливался опыт их использования, формировалось соответствующее научное направление – вычислительная техника. Основным методом исследования кибернетических систем стало моделирование – имитация процессов на ЭВМ.

Объектом исследований в научном направлении вычислительная техника стали вычислительные машины, комплексы, системы и сети. Это – сложные системы, предназначенные для автоматизации сбора, хранения, обработки и передачи информации. При исследованиях эти системы

рассматриваются с точки зрения протекающих в них информационных процессов, т. е. как определенный класс кибернетических систем.

Технической базой для вычислительных машин и систем стали электронные устройства. Направление вычислительной техники послужило катализатором развития электроники, а с появлением в 50-х гг. XX в. полупроводниковых приборов и первых интегральных схем – микроэлектроники. Влияние микроэлектроники на технический прогресс с переходом к информационному этапу развития стало определяющим. Успехи микроэлектроники обеспечивают вот уже в течение более 50 лет экспоненциальный рост сложности и производительности вычислительных систем.

В значительной мере в связи с этими успехами микроэлектроники получило быстрое развитие научное направление информатика, объектом исследований которого являются информационные технологии, методы и средства использования вычислительных машин, комплексов, систем и сетей для решения задач в самых разных областях человеческой деятельности.

Как отмечает член-корреспондент РАН Р.М. Юсупов: «...кибернетика и информатика – тесно связанные между собой междисциплинарные научные направления оказывают революционное влияние на развитие системно-управленческого мышления и технологической базы современной экономики и производства… Кибернетика, информатика, информационно-коммуникационные технологии – катализатор развития всех областей человеческой деятельности, формирования новой формации в истории человечества – информационного общества» [4].

Истоки создания направления техническая кибернетика

Истоками являются ростки нового научного направления, начало формирования соответствующих научно-педагогических коллективов.

«Информатика развивалась с середины 60-х гг. XX в. в значительной мере в недрах кибернетики на единой базе – вычислительной технике и средствах связи. В свою очередь кибернетика обобщает принципы и методы теории автоматического управления» [4], т. е. связана с направлением автоматизации.

С учетом этих связей рассмотрим появление ростков рассматриваемых научных направлений в Политехническом институте.

Хотя на индустриальном этапе развития категория информации не имела определяющего значения, тем не менее для развития науки и техники требовалось получать информацию о значениях различных величин, характеризующих состояние объектов окружающего мира и протекающих в них процессов. Поэтому из задач получения, хранения, обработки и передачи информации первоочередными были задачи получения информации. В частности, с начала применения электричества в технике важнейшими стали задачи измерения электрических и неэлектрических величин.

В качестве источника информации воспользуемся обзором, выполненным на эту тему профессором В.Г. Кноррингом [5].

Санкт-Петербургский политехнический институт, созданный в 1899 г., был ориентирован на материальное производство и энергетику. Рассмотрим основные события, связанные с научной и образовательной деятельностью института в информационной сфере.

«До 1931 г. работы в области информационной техники выполнялись одиночками-энтузиастами. В 1931–1932 гг. формируется несколько информационных направлений в ПИ и вне его». Отметим основные события, факты и ученых, связанные с этим.

Первым деканом электромеханического факультета Санкт-Петербургского политехнического института стал выдающийся электротехник Михаил Андреевич Шателен. Он окончил Санкт-Петербургский университет в 1888 г., а затем прошел в Париже курс Высшей электротехнической школы. Научные интересы М.А. Шателена соответствовали проблемам электротехники и в основном касались вопросов измерительной техники. С его именем связано начало формирования научной школы электрических измерений.

Существенный вклад в становление рассматриваемых научных направлений внес А.А. Чернышев, выпускник Института 1907 г., ставший в 1932 г. академиком. Он курировал создание в 1932 г. Института телемеханики (позднее – НИИ телевидения), в котором работали многие политехники. Телемеханика была одной из областей, внесших вклад в становление кибернетики.

Уже весной 1929 г. обнаружилась острая нужда в инженерных кадрах приборостроителей, и *осенью того же года* в Политехническом институте были выпущены первые специалисты

по технологии электроизмерительных приборов и электрическим измерениям. В следующем году заведующим этой специализацией был назначен Е.Г. Шрамков, окончивший электромеханический факультет в 1921 г. Он сформировал коллектив кафедры электроизмерительной техники (1932 г.) (в настоящее время – кафедра измерительных информационных технологий) и заведовал этой кафедрой до 1976 г. Помимо электрических измерений на электромеханическом факультете зародилось направление телемеханика. Телемеханика стала одной из первых областей, внесших свой вклад в кибернетику. Среди выпускников Института, внесших существенный вклад в это направление, следует отметить А.А. Чернышева (выпуск 1907 г.), А.А. Солодовникова и М.Л. Цуккермана (выпуск 1913 г.), а также выпускников специализации, возглавляемой Е.Г. Шрамковым: Л.Н. Штейнгауза, К.Б. Карандеева, В.О. Арутюнова, А.В. Фремке, В.В. Ковалевскую.

Другим направлением в науке и технике, непосредственно связанном со становлением кибернетики, было направление автоматизации и управления в технических системах. В рамках этого направления создан понятийный аппарат, развита теория и средства для обработки информации о состоянии объектов и процессов, получаемой от измерительных преобразователей, и формирования управляющих воздействий, целенаправленно изменяющих состояние управляемого объекта. Рассмотрим возникновение этих направлений в Политехническом институте.

В начале 30-х гг. профессором Владимиром Константиновичем Поповым на электромеханическом факультете была создана кафедра управления электроприводом (сейчас это кафедра систем автоматического управления). Электроприводы – сложные динамические объекты, для управления которыми с момента их появления потребовалось создание систем автоматического управления. Развитие этого направления в науке и технике существенно повлияло на развитие средств и теории автоматического управления.

В 1933 г. в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ) была открыта новая специальность и образована первая в стране кафедра автоматики и телемеханики (с 1972 г. – кафедра автоматики и вычислительной техники, с 2009 г. – кафедра компьютерных систем и программных технологий)**.** Заведующим назначили профессора Бориса Иосифовича Доманского, выпускника Политехнического института 1914 г**.** Он был идеологом и организатором всей работы по созданию кафедры и руководил ею до 1971 г. По широте взглядов и эрудиции в то время это был самый крупный авторитет по автоматике в нашей стране. Получив солидный опыт работы специалистом в организациях, где использовались устройства автоматики и телемеханики, и опыт преподавателя в Киевском политехническом институте, философски осмыслив состояние и перспективы развития в этой предметной области, Борис Иосифович пришел к твердому убеждению в том, что *автоматика и телемеханика* – самостоятельное направление в науке и технике, востребованное в самых различных типах технических систем. Для его успешного развития пришло время открывать специализированную кафедру, формировать образовательную программу, создавать педагогические и научные коллективы. С этой идеей в 1933 г. он возвратился в Ленинград и основал первую в СССР кафедру автоматики и телемеханики. Б.И. Доманский всегда стремился привлечь к педагогической работе на кафедре известных ученых и специалистов промышленности. В разные годы на кафедре работали академик АН СССР А.А. Воронов, член-корреспондент АН СССР Б.С. Сотсков, профессора Т.Н. Соколов и В.В. Сидельников и др.

Таким образом, в 30-е гг. на электромеханическом факультете были созданы три кафедры, занимавшиеся направлениями, ставшими истоками кибернетики. Для характеристики условий, послуживших основой создания нового факультета технической кибернетики, необходимо еще рассмотреть истоки зарождения двух других направлений: информатики и вычислительной техники.

Истоки создания направлений вычислительная техника и информатика в Ленинградском политехническом институте

Говоря об истории становления и развития информатики и вычислительной техники, следует выделить три группы задач, которые требовалось решать [6].

1. Создание аппаратуры вычислительной машины (ВМ) – нового средства обработки данных. Это связано с комплексом задач: разработка и реализация элементной базы, соответствующей поставленным задачам и состоянию производства элементов; разработка архитектуры ВМ в соответствии с ее назначением; разработка методов и инструментальных средств отладки и испытаний этого нового класса сложных систем.

2. Разработка и развитие численных методов решения различного класса вычислительных задач, решение которых без использования ВМ оказалось невозможным.

3. Создание и развитие методов и инструментальных средств автоматизации разработки программного обеспечения ВМ.

Актуальность решения этих групп задач, существенно отличающихся по предмету и методам исследований, на начальных этапах становления вычислительной техники и информатики зависела от имевшихся в наличии ЭВМ, от наличия соответствующих лидеров, ресурсов и кадров для организации выполнения соответствующих разработок и исследований.

Начало систематических исследований и разработок в ЛПИ, связанных с ВТ и информатикой, относится к концу 50-х и началу 60-х гг. XX в.

Следует отметить, что первые ЭВМ, созданные в 50-е гг., изготовлялись в единичных экземплярах, размещались в вычислительных центрах и для вузов были недоступны. Первые ЭВМ в вузах стали появляться после освоения серийного производства ЭВМ серий «Урал», «Проминь», «Минск», «МИР», т. е. в 60-е гг.

До их появления в ряде вузов образовались научные группы энтузиастов, занимавшихся разработкой специализированных ЭВМ для нужд космоса, атомной энергетики и авиации. Подобные группы, положившие начало крупным научно-педагогическим коллективам, возникли и в Ленинградском политехническом институте. Это произошло в конце 50-х гг. XX в. С учетом состояния вычислительной техники в этот период в стране, возникшие группы должны были заниматься в основном задачами создания аппаратуры специализированных вычислительных машин.

Появление научных школ всегда связано в первую очередь с появлением лидера, обладающего глубокими профессиональными знаниями, индивидуальным подходом к их творческому использованию, целеустремленностью, волей и способностью генерировать новые идеи при выполнении крупных работ, имеющих большое значение для общества. Обычно – это крупные ученые и талантливые организаторы. В ЛПИ такими лидерами, инициировавшими начало работ по вычислительной технике и использованию вычислительных машин в научных исследованиях на возглавляемых ими кафедрах, были профессора Тарас Николаевич Соколов, Борис Иосифович Доманский и Владимир Александрович Троицкий.

Возникновение и развитие научных школ по вычислительной технике и информатике на кафедре профессора Т.Н. Соколова

Кафедра, образованная в 1949 г. на физико-механическом факультете ЛПИ, имела название «Автоматическое управление движением». Первым заведующим был профессор Г.Н. Никольский. В 1952 г. он оставил заведование кафедрой по состоянию здоровья и новым заведующим стал доктор технических наук Тарас Николаевич Соколов. Кафедра получает название «Математические и счетно-решающие приборы и устройства» и переводится на образованный в ЛПИ радиотехнический факультет. Проводя исследования и разработки систем автоматического управления, Т.Н. Соколов уделял внимание и устройствам, предназначенным для выполнения математических операций сложения, умножения, дифференцирования и др. Исследования Т.Н. Соколова послужили базой для начала работ на его кафедре по построению аналоговых и цифровых моделей сложных динамических объектов.

С 1952 г. на кафедре начали разработку методов моделирования динамики движения летательных аппаратов. Впервые использован принцип одновременного исследования в реальном времени создаваемых регуляторов и аналоговых моделей отдельных подсистем. Электромеханическая аналоговая вычислительная машина «Модель 1», разработанная в 1952–1954 гг., была предназначена для решения нелинейных дифференциальных уравнений пространственного движения самолетов, ракет, торпед. В схему решения уравнений включалась реальная аппаратура автоматического управления. Далее последовали разработки комплексов «Модель 2», …, «Модель 4». Использование новых технологий моделирования (не только аналоговых, но и цифровых) в военной промышленности и, особенно, в космических исследованиях решало настолько важные общегосударственные задачи, что весь цикл проводимых на кафедре работ был взят под прямой контроль правительства.

Благодаря энергии, целеустремленности и выдающимся организаторским способностям Т.Н. Соколова принимались нестандартные

организационные решения, позволившие вначале небольшому коллективу (менее 10 человек) организовать работу и в сжатые сроки решить целый комплекс новых и сложных задач. В напряженной работе, в условиях творческого подъема и огромной ответственности за результаты быстро увеличился и сформировался слаженный коллектив высококвалифицированных специалистов кафедры. Росло «коллективное знание». К 1959 г. на кафедре уже было более 40 преподавателей.

В 1956 г. кафедру согласно Постановлению ЦК КПСС и Совета Министров СССР включили в число исполнителей автоматизированной системы управления (АСУ), предназначенной для слежения за искусственными спутниками Земли (ИСЗ). Кодовое название работы «Кварц».

Вычислительная машина «Кварц», представляющая собой новую технику, должна была эксплуатироваться в настоящих армейских условиях. От начала разговоров о такой машине до выпуска маленькой серии прошло всего полтора года. Работу успешно выполнили.

В 1961 г. по инициативе Т.Н. Соколова принято Постановление Совета Министров РСФСР об организации на базе кафедры ИУС опытно-конструкторского бюро (ОКБ ЛПИ), ныне – НПО «Импульс».

Дальнейшее развитие работ на кафедре привело к появлению самостоятельных научных направлений и школ, образованных учениками и последователями Т.Н. Соколова. В значительной мере эти направления связаны не с вычислительной техникой (архитектура и принципы построения ВМ и систем), а с информатикой (технологии эффективного использования ВМ и систем).

Возникновение и развитие научных школ по вычислительной технике и информатике на кафедре профессора Б.И. Доманского

Основателем научных школ кафедры является профессор Б.И. Доманский. Первым направлением исследований была *автоматизация процессов управления в энергетических системах.* Работы в области автоматизации электрических станций были начаты Б.И. Доманским, имевшим до заведования кафедрой опыт работы в области энергетики. Когда в стране появились крупные энергообъединения, и на повестку дня встала задача создания Единой энергосистемы СССР, на кафедре начались исследования новых способов управления энергетическими системами для обеспечения их надежной и устойчивой работы. Их возглавил ученик Б.И. Доманского доцент Е.И. Юревич. Основным методом исследований процессов в сложных энергетических системах стало *моделирование на электронных моделях***.** Поэтому работы по электронной вычислительной технике на кафедре АиВТ начались с аналоговой техники и электронных устройств. Помимо Е.И. Юревича в развитии этого направления в 50-е гг. принимали участие доцент В.К. Захаров (выпускник ЛЭТИ), организовавший на кафедре подготовку по электронике, доцент А.М. Сучилин (выпускник ЛЭТИ), организовавший подготовку по счетно-решающим устройствам, аспирант Р.П. Строганов.

Работы по моделированию, электронике и счетно-решающим устройствам создали предпосылки и обеспечили подготовку кадров из выпускников кафедры для начала работ по цифровой вычислительной технике.

Первой крупной работой кафедры в этом направлении стала разработка малой цифровой вычислительной машины МВМ в 1959–1962 гг. Инициатор этой работы и один из основных исполнителей – В.Д. Ефремов, закончивший обучение на кафедре в 1958 г. и оставленный ассистентом. Он был увлечен новым зарождающимся направлением вычислительной техники. К тому времени на кафедре проводились работы по электронике, аналоговым вычислительным машинам. Первыми работами по цифровой вычислительной технике (разработка кассовых аппаратов по заданию ГСКТБ) руководил Л.П. Афиногенов. В них участвовали преподаватели, аспиранты и студенты старших курсов. В итоге была создана необходимая «критическая масса» энтузиастов нового направления, готовых взяться за сложные новые проекты.

В это время (конец 50-х) цифровых вычислительных машин (ЦВМ) было еще очень мало, а потребность в выполнении сложных математических расчетов велика. Одной из отраслей, где потребность в ЦВМ была велика, была атомная промышленность. В 1959 г. кафедра автоматики и телемеханики получила заказ на создание и поставку в НИИ электрофизической аппаратуры малой вычислительной машины. Понятия «мини-ЭВМ» в то время еще не существовало. Но потребность в ЭВМ невысокой стоимости и

сравнительно простой в эксплуатации была большой. Вначале работу возглавил преподаватель кафедры Л.П. Афиногенов (выпускник 1951 г.). Основными разработчиками были В.Д. Ефремов, В.Г. Колосов (выпускник 1959 г.), дипломники В.Ф. Мелехин, А.Ф. Сергеев. С 1961 г. работу по системной отладке, передачу для эксплуатации в НИИЭФА и техническому сопровождению возглавлял В.Д. Ефремов.

При разработке МВМ все приходилось создавать впервые: от элементной базы до архитектуры. В это время отечественная промышленность начала выпускать магнитные сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса, а также первые полупроводниковые диоды и транзисторы. В качестве элементной базы для построения арифметического, управляющего и интерфейсных блоков МВМ были предложены оригинальные феррит-диодные элементы, получившие название *схем распределения тока*. Цифровые схемы распределения тока позволяли достаточно эффективно выполнять операции в десятичной системе счисления. По сравнению с двоичной системой счисления, десятичная позволяла значительно (в четыре раза) уменьшить глубину распространения сигнала, что было существенно для быстродействия. Каждый десятичный разряд в МВМ был представлен избыточным кодом «2 из 5». Это позволяло контролировать правильность кодов при хранении и передачах информации. Основная память (ОЗУ) была реализована на магнитных сердечниках с ППГ и по своей организации относилась к классу 2D. Разработка и сопровождение МВМ были успешно выполнены.

Важный итог работы над МВМ для кафедры автоматики и телемеханики ЛПИ – создание ядра специалистов в области вычислительной техники, быстро пополнявшееся новыми выпускниками. К 1965 г. группа насчитывала уже более 10 человек и быстро увеличивалась. Были поставлены новые лабораторные циклы, стали преподавать новые дисциплины. Успешно работающая МВМ, публикации, защищенные диссертации способствовали распространению информации о новых результатах. Они заинтересовали разработчиков специализированной цифровой аппаратуры. Молодой сформировавшийся коллектив разработчиков и исследователей цифровой аппаратуры был привлечен к работам ОКБ «Зарница». Несколько позже после определенной структурной перестройки ОКБ вошло в состав созданного ЦНПО «Ленинец». Во главе группы от кафедры находился В.Д. Ефремов. Работы начались с создания специализированных ЭВМ для предстартового контроля летательных аппаратов. ЭВМ разрабатывались на базе цифровых схем распределения тока. Поскольку условия эксплуатации этих ЭВМ были полевыми, то требовалась соответствующая модернизация элементов, конструктивная и технологическая проработка. Архитектура ЭВМ соответствовала классу решаемых задач. Длительное и плодотворное сотрудничество ЦНПО «Ленинец» и кафедры начиналось по инициативе ее выпускника, в то время аспиранта кафедры, а впоследствии – начальника СКБ-7, кандидата технических наук Г.С. Иссерлина.

С 1971 г. на кафедре помимо специальности автоматика и телемеханика началась подготовка студентов по специальности математические и счетно-решающие приборы и устройства. Поэтому кафедра с 1972 г. получила название «Автоматика и вычислительная техника». Вектор дальнейшего развития работ на кафедре в значительной мере склонялся в сторону информационных технологий. В связи с этим в 2009 г. кафедра была переименована в кафедру компьютерных систем и программных технологий.

Возникновение и развитие научной школы профессора В.А. Троицкого по внедрению вычислительных машин в научные исследования различных направлений

Лидером в формировании коллектива по использованию вычислительных машин в научных исследованиях различных направлений в ЛПИ был крупный ученый, сформировавший научное направление по вариационным подходам к задачам теории оптимальных процессов, доктор физико-математических наук, профессор Владимир Александрович Троицкий [7]. В 1962 г. В.А. Троицкий организовал на физико-механическом факультете ЛПИ первую в СССР кафедру вычислительной математики Впоследствии она была переименована в кафедру прикладной математики. В Институте был создан Совет по использованию вычислительной техники. Работу по координации фактически возглавил В.А. Троицкий.

В 1964 г. кафедре вычислительной математики была передана ЭВМ «Урал-2». В короткий срок В.А. Троицкий создал работоспособный коллектив преподавателей, научных работников, программистов и инженеров, обеспечивавший

проведение учебных занятий по использованию вычислительной техники в научных исследованиях. Трудами коллектива кафедры положено начало созданию вычислительного центра Института. В.А. Троицким поставлен курс «Программирование на ЭВМ “Урал-2”». Под его руководством организован цикл лабораторных занятий на ЭВМ для студентов разных факультетов ЛПИ.

В хорошей организации работы вычислительного центра большую роль играли инженеры, обеспечивавшие обслуживание ЭВМ. Значительную часть этой группы составляли выпускники кафедры автоматики и телемеханики (в их числе И.А. Старостин, Е.В. Елецкий и др.).

Создание факультета технической кибернетики

С начала работ по вычислительной технике и ее использованию в научных исследованиях в 60-е гг. в ЛПИ появилась потребность в консолидации энтузиастов, для которых категория информации стала определяющей в их творческой деятельности. Эта потребность созревала и получила организационное оформление в 1976 г. созданием нового факультета.

Первоначально факультет получил название «Факультет автоматизации управления» (ФАУ). Главной целью организации факультета была концентрация работы и кадров по исследованию, разработке и использованию средств вычислительной техники для решения задач управления сложными объектами и автоматизированного управления информационными, производственными и технологическими процессами и системами.

В факультет вошли кафедры автоматики и вычислительной техники (АиВТ), информационно-измерительной техники (ИИТ), систем автоматического управления (САУ), технической кибернетики (ТК) из состава электромеханического факультета и кафедра информационных и управляющих систем (ИУС) из состава радиофизического факультета. Кафедра технической кибернетики основана на электромеханическом факультете профессором Е.И. Юревичем в 1975 г., который с 1973 г. вышел из кафедры автоматики и вычислительной техники с группой сотрудников и стал главным конструктором созданного им ОКБ технической кибернетики (ныне – ЦНИИ РТК).

Первым деканом факультета стал профессор, заведующий кафедрой АиВТ Всеволод Константинович Захаров. На его плечи легла нелегкая задача объединить в единый коллектив кафедры двух факультетов, выросшие на основе различных традиций, методических и научных подходов представителей разных школ.

Непросто было сблизить позиции лидеров кафедр по ключевым вопросам организации работы на факультете: составлению учебных планов, определению объемов и содержаний курсов, лабораторных практикумов и пр. Сближение позиций не должно было вести к потере оригинальных достижений каждой из кафедр. Необходимо было сглаживать противоречия, добиваться взаимного понимания и согласия, формировать общее согласованное видение основных путей дальнейшего развития. Большую помощь в момент становления факультета и в налаживании его работы оказали партийная и профсоюзная организации факультета. Партийное бюро факультета в этот период возглавлял Леонид Васильевич Бабко, получивший до этого солидный опыт партийной работы в парткоме ЛПИ. Профсоюзную организацию факультета возглавлял Игорь Георгиевич Черноруцкий.

В обсуждении и решении возникавших проблем активное участие принимали профессора В.К. Захаров, В.Д. Ефремов, С.А. Ковчин, А.М. Яшин, Б.Е. Аксенов, Ш.Ю. Исмаилов, Е.И. Юревич, Т.К. Кракау, Ю.В. Ракитский, П.В. Новицкий.

В.А. Троицкий принимал активное участие в обсуждении концепции нового факультета. Поскольку в его состав вошли кафедры, направление работ которых в значительной мере носило прикладной характер, кафедра В.А. Троицкого по его решению осталась на ФМФ. Но связи ФАУ с этой кафедрой и В.А. Троицким развивались, и в конце своего жизненного пути он работал на ФТК профессором кафедры системного анализа и управления.

В 1982 г. ФАУ переименовали в факультет технической кибернетики (ФТК), что лучше отражало суть проблем, над которыми работали на факультете. В тот же год факультет возглавил профессор Владимир Дмитриевич Ефремов. Под его руководством продолжалось активное развитие факультета. Он много сделал для переезда всех кафедр ФТК в 9-й корпус. Объединение кафедр в одном корпусе способствовало развитию взаимодействия кафедр, служило ускорителем развития информационных технологий в Инсти-

туте, способствовало организации новых кафедр на факультете.

После безвременной кончины В.Д. Ефремова в 1996 г. факультет возглавил профессор Игорь Георгиевич Черноруцкий.

В настоящее время ФТК – ведущий факультет Университета по подготовке разработчиков современных информационных технологий, компьютерной техники и кибернетических систем. На нем работают более 210 преподавателей, в т. ч. 46 профессоров. На ФТК обучаются свыше 1500 студентов на девяти кафедрах: компьютерных систем и информационных технологий (зав. кафедрой В.Ф. Мелехин), системного анализа и управления (зав. кафедрой В.Н. Козлов), систем автоматического управления (зав. кафедрой И.М. Семенов), информационных и управляющих систем (зав. кафедрой И.Г. Черноруцкий), информационно-измерительных технологий (зав. кафедрой Г.Ф. Малыхина), распределенных вычислений и компьютерных сетей (зав. кафедрой Ю.Г. Карпов), информационной безопасности компьютерных систем (зав. кафедрой П.Д. Зегжда), информационных систем экологической безопасности (зав. кафедрой Ю.В. Тарбеев), базовая кафедра корабельных информационно-управляющих систем (зав. кафедрой К.Ю. Шилов).

На факультете сформировались известные в стране научно-педагогические школы, активно развиваются научно-исследовательские работы, связи с отечественными предприятиями и зарубежными фирмами. Укрепляется и развивается материально-техническая лабораторная база, в т. ч. благодаря организации на ФТК нескольких научно-образовательных центров с участием иностранных фирм, создаются межкафедральные лаборатории, увеличивается число межкафедральных дисциплин, лекции по которым читают ведущие профессора факультета.

По всем направлениям работы за последние пять лет получены значительные успехи и имеются хорошие перспективы дальнейшего развития факультета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Винер, Н.** Кибернетика, или управление и связь в животном и машине [Текст] / Н. Винер. –М.: Сов. радио, 1968. –2-е изд.

2. **Чечкин, А.В.** Математическая информатика [Текст] / А.В. Чечкин – М.: Наука, 1991. – 416 с.

3. **Громов, Г.Р.** От гиперкниги к гипермозгу: информационные технологии эпохи Интернета: Эссе, диалоги, очерки [Текст] / Г.Р. Громов. –М.: Радио и связь, 2004. –208 с.

4. История информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде) [Текст] / Под общ. ред. Р.М. Юсупова; сост. М.А. Вус // Яркие фрагменты истории. –СПб.: Наука, 2008. –Вып. 1. –356 с.

5. **Кнорринг, В.Г.** Развитие информационной техники и теории управления в Политехническом институте в первой половине XX века [Текст] / В.Г. Кнорринг // В сб. История информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде); Под общ. ред. Р.М. Юсупова; сост. М.А. Вус. –СПб.: Наука, 2008. –Вып. 1. –С. 56–62.

6. **Мелехин, В.Ф.** Становление и развитие вычислительной техники и информатики в Ленинградском политехническом институте [Текст] / В.Ф. Мелехин // В сб. История информатики и кибернетики в Санкт-Петербурге (Ленинграде); Под общ. ред. Р.М. Юсупова; сост. М.А. Вус. –СПб.: Наука, 2010. –Вып. 2. –152 с.

7. Владимир Александрович Троицкий [Текст] / Библиограф. сер. Выдающиеся ученые СПбГПУ. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. – Вып. 17. –55 с.

УДК 681.518.3

В.Г. Кнорринг

ВОСЕМЬ ДЕСЯТИЛЕТИЙ КАФЕДРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФТК – ВЗГЛЯД С ТРЕХ ТОЧЕК ЗРЕНИЯ

Выпускающая вузовская кафедра может быть малочисленной, но при этом может по значимости не уступать серьезному НИИ. За ней – сотни, если не тысячи выпускников, множество публи-

каций, сеть разнообразных научных связей. Поэтому особенности творческого пути почти любой кафедры заслуживают изучения.

К тому же коллектив каждой выпускающей кафедры включен по меньшей мере в две сложные системы. Одна из них – это система кафедр и методических учреждений, реализующих в разных вузах страны образование по *одной и той же* специальности или образовательному направлению. Другая – это система *разнонаправленных* кафедр, принадлежащих одному факультету (разработчики образовательных стандартов игнорируют эту вторую систему, о чем можно только сожалеть). Соответственно работа кафедры выглядит поразному, если на нее взглянуть с позиций этих двух систем, внешних для кафедры. Но существует и третья, внутренняя точка зрения – взгляд самой кафедры на задачи и смысл своей деятельности.

Сопоставим эти три точки зрения на кафедру измерительных информационных технологий, имея в виду, что ее деятельность началась задолго до образования ФТК – около 80 лет назад, и прошла ряд различных этапов.

Электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЭлМФ ЛПИ) в 1929 г. первым в Советском Союзе организовал выпуск инженеров по специальности «Технология электроизмерительных приборов и электрические измерения» (впоследствии она была переименована в «Электроизмерительную технику», а в настоящее время свелась к профилю «Информационно-измерительная техника и технологии» образовательного направления приборостроение).

В то время, в 1929 г., уже существовало воспитанное М.А. Шателеном ядро того коллектива преподавателей, который в 1932 г. при организации кафедр в ЛЭМИ (Ленинградском электромеханическом институте – самостоятельном институте, которым в течение нескольких лет был ЭлМФ) оформился в кафедру под руководством Евгения Георгиевича Шрамкова. Первенство этой кафедры признавалось всем электроизмерительным сообществом Советского Союза. Естественно, что именно Е.Г. Шрамков возглавил общесоюзный Научно-методический совет по данной специальности. В течение всего времени самостоятельного существования специальности вся методическая работа по ней замыкалась на кафедру Е.Г. Шрамкова.

Интенсивность этой работы была очень высокой; в ней участвовали все одноименные кафедры различных республик Союза, а этих кафедр было более 20. Мало того, Е.Г. Шрамков выступил организатором проводимых раз в пять лет конференций по перспективным путям развития электроприборостроения. Доклады на этих конференциях готовились специально формируемыми группами специалистов, в которые включались как ведущие преподаватели различных вузов, так и представители промышленности.

Таким образом, длительное время, вплоть до начала перестройки системы высшего образования, кафедра Е.Г. Шрамкова играла ведущую роль в масштабах страны.

Посмотрим теперь, какое положение занимала кафедра на факультете. Нужно сказать, что система кафедр на ЭлМФ ЛПИ изначально была хорошо продумана. С одной стороны, готовились инженеры по отдельным участкам цикла производства электроэнергии (электрические станции), ее распределения (электрические сети и системы) и потребления (электропривод). С другой стороны, изучались отдельные виды электрических устройств – электрические машины, аппараты, электроизмерительные приборы и т. д. Обучению студентов в конкретных областях электротехники предшествовало изучение ее общих основ, реализуемое кафедрой теоретических основ электротехники.

Всем специальностям факультета было необходимо знание основ электроизмерительной техники, и кафедра Е.Г. Шрамкова обеспечивала соответствующий лекционный курс и лабораторный практикум. Она обслуживала также другие факультеты, нуждавшиеся в электроизмерительном образовании, и в этом отношении имела общеинститутское значение.

Что касается внутренних устремлений кафедры, то на них явным образом сказывалось сознание ответственности за развитие специальности, – ответственности, определяемой ведущим положением кафедры в стране. Уже в довоенные годы Е.Г. Шрамковым была поставлена задача превращения электроизмерительной техники из вспомогательной электротехнической дисциплины в самостоятельную область знаний, выходящую за рамки электротехники и имеющую собственные теоретические основы. Работа в этом направлении, начатая еще до начала Великой Отечественной войны, активно развернулась в послевоенные годы.

Сейчас, окидывая взглядом различные этапы поиска теоретических основ измерительной техники сотрудниками кафедры, можно видеть, что направление поиска фактически диктовалось потребностями народного хозяйства страны в новых идеях в области измерений.

На первом, довоенном этапе, когда преобладали стрелочные электромеханические приборы, представлялось, что в основу теории должен быть положен поиск условий, при которых прибор получает от объекта измерения *максимум энергии*.

Второй этап, пришедшийся на послевоенное двадцатилетие, связан с тем, что в это время для создания новой техники потребовались разнообразнейшие, не существовавшие ранее средства измерений, предназначенные преимущественно для неэлектрических величин, обладавшие сравнительно сложной структурой и выполнявшиеся с применением электроники. Опыт создания таких средств привел к разработке теоретической концепции *измерительного преобразования*. Две составляющие этой концепции – теория обратимых преобразователей и структурная теория средств измерений – были представлены, в частности, в двух изданиях монографии Л.А. Островского «Основы общей теории электроизмерительных устройств» (название смелое по тому времени!), а также в других публикациях кафедры.

Третий этап начался в шестидесятые годы. Это было время взрывообразного развития идей кибернетики и теории информации. Коллектив кафедры, вместе с новосибирской научной школой «электрометрии», возглавлявшейся членом-корреспондентом АН СССР Константином Борисовичем Карандеевым (окончившим ЭлМФ ЛПИ в 1930 г.), выступил с инициативой преобразования специальности из «Электроизмерительной техники» в «Информационно-измерительную технику».

Одновременно с этим Петр Васильевич Новицкий занялся разработкой оригинальной *информационной теории измерительных устройств*. В 1965 г. он защитил по этой теории докторскую диссертацию, а в 1968 г. опубликовал монографию.

Вначале казалось, что информационная теория – это и есть долгожданная общая теория измерительных устройств. Эти надежды в общем не оправдались, хотя П.В. Новицкий и получил на основе проделанной работы ряд интересных результатов в теории погрешностей и в квалиметрии средств измерений.

В середине 70-х гг. стали актуальными проблемы создания автоматизированных систем научного и производственного эксперимента. На этом, следующем этапе теоретического поиска сложилось убеждение, что создавать нужно не теорию измерительных устройств (как раньше), а *теорию измерений*. Определенная работа в этом направлении была проделана (и в 1990 г. защищена как докторская диссертация) автором настоящей статьи.

На этот раз надежды возлагались на репрезентационную теорию (теорию шкал). Но эта работа дала неожиданные выводы. Первый состоял в том, что единой теории измерений быть не должно, поскольку измерение имеет ряд относительно независимых аспектов (в диссертации названных *функциями*) со своими теоретическими основами. Второй вывод заключался в том, что каждый из этих аспектов (функций) в какой-то степени выходит за рамки измерений, и поэтому целесообразно создавать не столько теорию измерений, сколько *теорию получения информации*.

Эти идеи не были развиты молодыми сотрудниками кафедры. К тому же в связи с событиями 90-х гг. актуальность проблематики автоматизированного эксперимента резко упала, и кафедра по существу прекратила общетеоретические поиски. Концепция аспектов (функций) измерения не осталась без применения: она, в частности, оказалась полезной при преподавании метрологии будущим исследователям, обучающимся на факультете медицинской физики и биоинженерии.

Как и на предыдущем этапе, одновременно с разработкой новой теоретической концепции была проведена методическая работа в близком направлении. П.В. Новицкий приложил большие усилия для создания (в рамках специальности) новой специализации «Организация процессов измерений и испытаний», ориентированной не на приборостроение, а на «приборопользование» – область деятельности, в которой, как представлялось, занято значительно большее число инженеров, чем в приборостроении. Эта специализация была официально введена в 1983 г., но распространения не получила.

Необходимо добавить, что в 80-х и 90-х гг. были завершены и защищены в виде докторских диссертаций крупные работы сотрудников кафедры.

В 1984 г. Валентин Сергеевич Гутников подвел итог многолетним исследованиям и разработкам частотно-временных интегрирующих измерительных преобразователей.

В 1990 г. Геннадий Николаевич Солопченко в диссертации «Метрологический анализ измерительно-вычислительных комплексов» выдвинул и подробно разработал идею о том, что для измерения характерны *обратные задачи*, т. е. движение мысли исследователя навстречу потоку информации, получаемому при взаимодействии средства измерений с объектом.

В 1994 г. Валерий Дмитриевич Мазин защитил докторскую диссертацию «Геометрические аспекты измерений».

В 1995 г. Эдуард Михайлович Шмаков защитой диссертации завершил длительную работу в области систем автоматизированного проектирования датчиков.

Наконец, в 1996 г. Галина Федоровна Малыхина защитила докторскую диссертацию «Разработка методов и средств интеллектуализации измерений в задачах определения свойств технических объектов».

Представляется, что эти работы при всей своей научной значимости все-таки не решали проблему построения общей теории измерений или тем более теории получения информации.

Теперь нужно посмотреть, как эти же три точки зрения на кафедру изменились в новых условиях, когда, во-первых, кафедра перешла с ЭлМФ на факультет технической кибернетики и, во-вторых, развиваемая ею специальность потеряла свою самостоятельность, будучи включенной в образовательное направление приборостроение. Начнем опять со статуса кафедры в масштабах страны.

С созданием в 1988 г. системы учебно-методических объединений (УМО) методическое руководство специальностью было передано Московскому электротехническому институту (конкретно – В.Н. Малиновскому). С этого времени совместная методическая работа кафедр страны, налаженная Е.Г. Шрамковым, прекратилась. Однако наша кафедра смогла на стадии разработки первого, а отчасти и второго поколения государственных образовательных стандартов (ГОС) представлять интересы специальности в УМО по оптическому и приборостроительному образованию, которое базировалось на ЛИТМО. Правда, о развитии наметившейся тенденции выхода специальности за рамки приборостроения уже не могло быть речи.

Третье поколение ГОС, в котором специальность «Информационно-измерительная техника и технологии» исчезла, свернувшись до «профиля», готовилось уже почти без участия кафедры ИИТ СПбГПУ.

Еще в период разработки второго поколения ГОС кафедрой была сделана попытка обратить внимание измерительного сообщества страны на целесообразность создания отдельного образовательного направления – технологии и системы получения информации. Проект такого направления, опубликованный в виде статьи в шестом номере журнала «Датчики и системы» за 2000 г., получил некоторую поддержку, но она была недостаточной для практической реализации начинания.

Таким образом, ключевые позиции в общероссийском масштабе коллективу кафедры не удалось сохранить. Однако кафедра еще пользуется авторитетом у той части измерительного сообщества страны, которая помнит ее прежнюю активность.

Положение кафедры на созданном в 1976 г. факультете автоматизации управления (переименованном впоследствии в ФТК), казалось бы, было более естественным, чем на ЭлМФ. Если до перехода на новый факультет кафедра отвечала за изучение студентами определенного вида электротехнических устройств, то теперь «зоной ее ответственности» по логике вещей становился определенный участок цикла обращения информации – весьма важный участок *получения информации и оценивания ее достоверности*. Это соответствовало бы и той тенденции к обобщениям в методической деятельности кафедры, которая была прослежена выше.

Но на ФТК система кафедр, отвечающих за отдельные участки цикла обращения информации, не была создана. В образовательных стандартах по большинству образовательных направлений факультета также не было разработано логично построенных систем дисциплин, в которых получение информации заняло бы достойное место. В итоге кафедры факультета занимаются различными (зачастую одними и теми же) аспектами обработки информации, а проблематика ее получения остается как бы в стороне.

Положение усугубляется тем, что, вследствие развала приборостроительной промышленности

страны и значительного уменьшения объема научных и промышленных исследований, резко уменьшилась потребность в соответствующих специалистах. Упал и общественный интерес к деятельности по получению информации, что проявилось в снижении конкурса на измерительную специальность.

В этих непростых условиях внутренние устремления кафедры в большой степени сводятся к развитию перечисленных выше крупных работ 90-х гг. То, что «теоретическое лицо» кафедры все еще выглядит вполне достойно на фоне мировой измерительной науки, подтверждено выступлениями представителей кафедры на X Международном симпозиуме ИМЕКО «Advances of Measurement Science» («Новое в измерительной науке»), состоявшемся в нашем городе летом 2004 г. Следует отметить: сам факт проведения в разных странах нескольких симпозиумов с таким названием говорит о том, что измерительной науке в мире уделяется значительное внимание.

В области преподавания кафедра стремится развивать системные вопросы измерений, стараясь вместе с тем не жертвовать основной для нее проблематикой получения информации и оценивания ее достоверности. Да, эту проблематику в настоящее время (будем надеяться, что временно) нельзя назвать модной. Но полный отказ от нее не только обесценил бы весь накопленный за восемь десятилетий опыт и авторитет кафедры, – он обеднил бы факультет, поскольку техническая кибернетика немыслима без фундаментальных вопросов получения информации. Важной задачей кафедры остается повышение метрологической культуры студентов других факультетов – естественно, только тех, руководство которых осознает потребность в этом.

УДК 007

Ю.С. Васильев, И.Г.Черноруцкий

К ИСТОРИИ ПОЛЕТА ЮРИЯ АЛЕКСЕЕВИЧА ГАГАРИНА

Пятьдесят лет назад, в апреле, в космос полетел Гагарин. Самое непосредственное отношение к полету Ю.А. Гагарина имел Ленинградский политехнический институт (ЛПИ) имени М.И. Калинина (ныне – Санкт Петербургский государственный политехнический университет – СПбГПУ) и кафедра информационных и управляющих систем, где проводились важные работы по информационному обеспечению полета. Не менее, а может быть и более важное место в работах кафедры и созданного при ней ОКБ ЛПИ занимали проблемы обороноспособности страны. Заведовал кафедрой в то время Тарас Николаевич Соколов. Важность работ, проводимых в ЛПИ, подтверждается, в частности, текстом выступления Главнокомандующего РВСН (Ракетные войска стратегического назначения) генерал-полковника И.Д. Сергеева 9 февраля 1994 г. на конференции «История строительства и развития ракетных войск стратегического назначения»: «В этот технический прорыв, определивший дальнейшее развитие Ракетных войск стратегического назначения, внесли неоценимый вклад конструкторские бюро, возглавляемые Владимиром Николаевичем Челомеем, Михаилом Кузьмичем Янгелем, Сергеем Павловичем Королевым, Николаем Алексеевичем Пилюгиным, Тарасом Николаевичем Соколовым».

Профессор ЛПИ Т.Н. Соколов почетно входит в блистательный список из четырех академиков – генеральных конструкторов межконтинентальных ракет (Челомей, Янгель, Королев) и генерального конструктора бортовых систем управления (Пилюгин), а коллектив ОКБ ЛПИ находится в одном ряду с коллективами прославленных КБ и НИИ.

Роль Т.Н. Соколова в проводимых в ЛПИ работах подтверждается и следующим текстом из «Хроники основных событий истории РВСН», написанной под общей редакцией Главнокомандующего РВСН генерал-полковника И.Д. Сергеева в 1994 г.: «СОКОЛОВ Тарас Николаевич (17.04.1911–15.09.1979). Главный конструктор НПО «Импульс». Доктор технических

наук (1951). Профессор (1953). Герой Социалистического Труда (1970). Лауреат Ленинской премии (1959) и двух Государственных премий (1949, 1977).

Один из основных создателей систем управления. Внес значительный вклад в работы в области исследования космического пространства, запуск первого ИСЗ и первого полета человека в космос. Является родоначальником автоматизации процессов управления войсками и стратегическим оружием в РВСН. Под его руководством и с его непосредственным участием созданы и внедрены в войска высоконадежные АСУ и системы дистанционного управления оружием. Разработанные им технические решения и сегодня являются базовыми в части создания перспективных АСУ РВСН и СЯС в целом».[1]

Рассказать про кафедру информационных и управляющих систем (ИУС) достаточно сложно. Сложно потому, что это легендарная кафедра в Политехническом университете и, может быть, одна из самых знаменитых. Именно преподаватели и сотрудники кафедры начиная с середины 50-х гг. теперь уже прошлого века начали разработку сенсационных методов моделирования динамики движения летательных аппаратов. Как мы бы сказали сегодня, впервые был использован принцип «косимуляции» – принцип одновременного исследования в реальном времени «живой» аппаратуры и аналоговых моделей отдельных подсистем. При этом использовались специально создаваемые для этих целей вычислительные комплексы. Тогда таких средств и, соответственно, вычислительных машин не было.

Использование новых технологий моделирования, не только аналоговых, но и цифровых, в военной промышленности и особенно в космических исследованиях решало настолько важные общегосударственные задачи, что весь цикл проводимых на кафедре работ был немедленно взят под прямой контроль правительства [1]. Министр высшего образования СССР В.П. Елютин лично давал распоряжения об изменении графика учебного процесса студентов-старшекурсников кафедры ИУС и их освобождении от занятий на длительные сроки в связи с занятостью на заводах и в войсках по срочной разработке, налаживанию и внедрению новой техники, проектируемой на кафедре. Преподавателям кафедры присваивались ученые степени по результатам их работ без защиты диссертаций. Вручались Ленинские и Государственные премии: и не одна или две, а «пачками» – десяткам человек. Вручались ордена и медали. Возникает вопрос, что же такое происходило? Откуда такое беспрецедентное внимание правительства к относительно малочисленной кафедре Политехнического института? А ответ следующий – космос, спутники, Гагарин. И, конечно, обеспечение обороноспособности страны. Именно тогда все это начиналось. Именно на этом поприще удалось получить столь значительные результаты, что от теоретических и исследовательских прототипов создаваемых объектов до их реализации «в железе» проходили по нынешним, да и по прежним представлениям смехотворно короткие сроки – год или два, не более. Делалось все это в значительной степени руками «молодых» – студентов и выпускников кафедры. Именно тогда в СССР успешно начались разработки крылатых ракет (КБ Челомея) и были получены передовые результаты [2]. Там тоже значительный след оставили специалисты кафедры ИУС в области моделирования. (К сожалению, впоследствии эти работы были свернуты, и по крылатым ракетам мы начали уступать американцам).

Если говорить более конкретно, то на кафедре разработано несколько поколений аппаратуры для траекторных измерений, что позволяло в реальном времени отслеживать траектории летательных аппаратов. Кроме того, выполнен комплекс важнейших работ по созданию и внедрению автоматизированной системы управления ракетными войсками стратегического назначения и целый ряд других проектов. Разработанные на кафедре аналоговые и цифровые моделирующие комплексы позволяли многим военным и гражданским НИИ и КБ впервые с большой точностью исследовать динамические характеристики существующих и проектируемых летательных аппаратов, что существенно понижало стоимость разработок, повышало надежность и точность основных теоретических выводов. Одновременно рос авторитет кафедры и ее руководства, да и авторитет Института в целом.

Свое теперешнее до сих пор актуальное название «Информационные и управляющие системы» кафедра получила в 1966 г., 45 лет назад [3]. Это говорит об устоявшихся традициях и на-

[1] Здесь ИСЗ – искусственный спутник Земли; АСУ – автоматизированная система управления; СЯС – стратегические ядерные силы.

правлениях работ кафедры и о дальновидности проводимой в Институте и на кафедре политики. С тех пор и по настоящее время на кафедре продолжает трудиться и постоянно пополняться коллектив специалистов, занимающихся по существу все той же проблематикой, но уже на новом уровне с учетом существующих непростых условий и ограничений. Кафедра существенно выросла в количественном отношении (более 40 человек преподавателей). А ведь начиналась она с трех человек в 1949 г. – физико-механический факультет, кафедра автоматического управления движением, первый заведующий – профессор Г.Н. Никольский, крупный специалист в области управления движущимися объектами, главным образом, самолетами. На кафедре помимо Г.Н. Никольского было всего два преподавателя. Именно тогда были, по существу, заданы «начальные условия», определившие последующую траекторию развития кафедры. В 1952 г. Г.Н. Никольский по состоянию здоровья оставляет работу на новой кафедре (он заведовал одновременно и кафедрой теоретической механики).

О событиях тех лет в Политехническом институте красноречивее всего свидетельствуют сухие факты, приводимые ниже.

1949 г. На физико-механическом факультете ЛПИ организована кафедра автоматического управления движением. Заведующим кафедрой назначен профессор Георгий Николаевич Никольский (см. выше).

1952 г. Создание радиотехнического факультета (РТФ). Кафедра переводится на новый факультет. В этом же году в связи с уходом Г.Н. Никольского новым заведующим кафедрой назначается доцент кафедры автоматики и телемеханики, доктор технических наук Тарас Николаевич Соколов. Кафедра получает новое название – «Математические и счетно-решающие приборы и устройства».

1952–1954 гг. На кафедре разработана и изготовлена первая в СССР электромеханическая аналоговая вычислительная машина (АВМ) «Модель-1» с динамическим стендом с тремя степнями свободы.

1953–1955 гг. Разработана и изготовлена электронная АВМ «Модель-2».

1954 г. При кафедре организована первая проблемная лаборатория вычислительной техники.

1954–1955 гг. На АВМ «Модель-1» впервые в СССР решен ряд задач моделирования движения летательных аппаратов с реальной аппаратурой автоматического управления. Разработана и изготовлена электромеханическая АВМ «Модель-3» с динамическим стендом с пятью степенями свободы для решения задач управления морскими объектами.

1955 г. По заданию Главного конструктора ракетных войск С.П. Королева на кафедре начались исследования устойчивости движения многоступенчатых ракет.

1956 г. В конце года на кафедре начались работы по созданию автоматизированной цифровой информационной машины «Кварц», предназначенной для определения параметров траектории космических (орбитальных) объектов и передачи данных по специализированным каналам связи на наземные пункты.

1956–1957 гг. Разработана и изготовлена электромеханическая АВМ «Модель-4».

1957–1958 гг. На Ленинградском заводе имени М.И. Калинина запущена в серийное производство машина «Кварц».

Май 1958 г. Впервые в СССР машины «Кварц», обслуживаемые сотрудниками и студентами старших курсов ЛПИ, успешно использованы для определения параметров траектории третьего искусственного спутника Земли.

1958–1959 гг. Изготовлены АВМ «Модель-4» для Ленинградской и Московской военно-воздушных инженерных академий.

22 апреля 1959 г. За выполнение важного задания Правительства СССР по созданию и введению в эксплуатацию цифровой информационной машины «Кварц» звания лауреатов Ленинской премии удостоены Т.Н. Соколов, Н.М. Французов, Б.С. Кренев и Ю.А. Девятков.

Май 1959 г. За разработку методов автоматизированной обработки телеметрической информации и их использовании в машине «Кварц» ученые степени кандидатов технических наук без защиты диссертаций получили семь преподавателей кафедры.

1958–1960 гг. Машины «Кварц» регулярно используются для поддержки запусков искусственных спутников Земли и космических кораблей-спутников. Можно сказать, что созданием машины «Кварц» Политехнический институт внес решающий вклад в разработку системы измерения параметров траекторий летательных аппаратов. Была построена автоматизированная система траекторных измерений на основе новой

тогда цифровой техники, способной работать в полевых условиях. До создания этой системы запись данных радиолокационных станций вдоль всей траектории полета осуществлялась на самописцы. Затем эти данные на самолетах физически доставлялись на командный пункт космодрома для апостериорного вычисления фактических парметров траектории. При этом было невозможно осуществлять коррекцию траектории полета в реальном времени. В результате ввода в эксплуатацию автоматизированных систем на основе машин «Кварц» удалось добиться осуществления управляемого полета с возможностью коррекции траектории в реальном времени. Особенно отличились при вводе в эксплуатацию машин «Кварц» и основанных на них информационных систем сотрудники кафедры Б.Е. Аксенов, И.Д. Бутомо, Ф.А. Васильев, Ю.А. Котов и А.М. Яшин. В будущем – профессора и доценты кафедры ИУС. Они возглавили бригады на измерительных пунктах и полигонах страны для опытной эксплуатации разработанной техники.

1960–1961 гг. На кафедре создана автоматизированная система управления «ИЦУ», предназначенная для доведения программы полета искусственного спутника Земли от электронной вычислительной машины до борта спутника. Тем самым был создан прообраз современной вычислительной сети.

12 апреля 1961 г. *Машины «Кварц», обслуживаемые сотрудниками кафедры, успешно использованы для обеспечения полета в космос Ю.А. Гагарина.*

1961 г. За обеспечение космического полета Ю.А. Гагарина большая группа сотрудников кафедры награждена орденами и медалями. В числе награжденных был и ректор ЛПИ профессор В.С. Смирнов, обеспечивший всестороннюю поддержку проводимых на кафедре работ.

24 апреля 1961 г. Принято постановление Совета Министров РСФСР об организации в Институте (на базе кафедры Т.Н. Соколова) опытного конструкторского бюро – ОКБ ЛПИ (позже, с 1967 г. – ОКБ при ЛПИ). Создание ОКБ «назрело». Коллектив, руководимый Т.Н. Соколовым, составлял уже несколько сот человек. Две созданные в Институте проблемные лаборатории не могли решить все кадровые и прочие вопросы. Необходимо было также искать новую элементную базу, отличную от использовавшихся феррит-диодных ячеек, разработанных на кафедре. И она была найдена. Возникла идея феррит-ферритовых элементов. На основе этих элементов был создан соответствующий интегральный блок с высокой для того времени степенью интеграции, оформленный в виде феррит-ферритовой платы (ФФП) с заливкой всей платы компаундом. ФФП явилась той базовой логической единицей, на основе которой ОКБ при ЛПИ более десяти лет создавало важнейшие автоматизированные системы управления.

1959–1962 гг. На кафедре и в ОКБ ЛПИ созданы автоматизированные цифровые информационные машины типа «Темп», являющиеся существенными модификациями машин «Кварц». Несколько типов этих машин серийно изготавливались и поставлялись в войсковые части на командно-измерительные пункты. Основное отличие от машин «Кварц» состояло в облегчении обслуживания и эксплуатации. Отныне эти функции могли выполняться штатными сотрудниками войсковых частей. Эти новые машины также были построены на феррит-диодных ячейках.

27 декабря 1966 г. Кафедра математических и счетно-решающих приборов и устройств переименована в кафедру информационных и управляющих систем (ИУС).

1968 г. Новый прорыв – в ОКБ при ЛПИ создана автоматизированная система управления ракетными войсками стратегического назначения (АСУ РВСН) первого поколения. Решена труднейшая и важнейшая задача по обеспечению безопасности страны. По-видимому, в то время это было главным и наиболее значимым направлением работ кафедры и ОКБ при ЛПИ. Впервые в СССР была создана система автоматизированного управления важнйшим видом Вооруженных сил. Она представляла из себя большую территориально распределенную иерархическую управляющую и диагностирующую систему. Цель создания АСУ заключалась в решении таких важных задач, как повышение оперативности и эффективности РВСН, повышение надежности функционирования, обеспечение скрытности управления. Система передавала на командные пункты соответствующие команды для установки нужных режимов работы, перевода войсковых подразделений в различные степени готовности, приказы о пуске или отмене пуска ракет и т. п. Обеспечивался также сбор информации о фактическом состоянии дивизионов РВСН и о результатах выполнения задач. В дальнейшем проводились работы

по совершенствованию архитектурных решений системы и расширению ее функциональных возможностей. В 1976 г. было завершено создание системы второго поколения. Одни из основных характеристик созданных систем – высочайшая надежность (благодаря применению высоконадежных ФФП) и приемлемое быстродействие при простых регламентах обслуживания.

1970 г. За научные достижения при выполнении специального задания правительства звания лауреатов Ленинской премии удостоены сотрудники ОКБ при ЛПИ: А.П. Волков, В.И. Лебедев, В.И. Лазуткин, А.М. Яшин. Звания лауреатов Государственной премии СССР удостоены сотрудники кафедры ИУС и ОКБ при ЛПИ: Б.Е. Аксенов, Л.В. Васильев, Г.И. Иоффе, Т.В. Нестеров, В.Е. Петухов, Н.В. Ращепкин. Многие сотрудники ОКБ при ЛПИ награждены орденами и медалями. Указом Президиума Верховного Совета СССР Т.Н. Соколову присвоено звавние Героя Социалистического Труда.

1972 г. Т.Н. Соколов передал заведование кафедрой ИУС Анатолию Михайловичу Яшину, а сам сосредоточился на работе в ОКБ.

1973 г. По предложению руководства Института на кафедре ИУС была разработана, а позднее успешно внедрена компьютерная система управления вузом – АСУ ВУЗ с подсистемами «Бухгалтерия», «Отдел кадров», «Абитуриент», «Студент», «Научный отдел» и др. В группу разработчиков входили в основном выпускники и студенты кафедры ИУС. Отдельные подсистемы выдержали испытание временем и после нескольких модификаций успешно эксплуатируются и до настоящего времени. На заре развития вычислительной техники это было значительным событием, ведь больших вычислительных машин в вузе было всего несколько, а специалистов, способных выполнить подобную разработку, ни у кого больше не было.

1974 г. Постановлением директивных органов в ОКБ при ЛПИ организовано комплексное отделение с правом юридического лица – будущее ОКБ «Радуга».

1975 г. В ОКБ при ЛПИ создана АСУ РВСН нового поколения. 19 июня ОКБ при ЛПИ получило наименование «Импульс» и стало подчиняться Минвузу РСФСР, выйдя из состава Политехнического института. Однако многие ведущие сотрудники кафедры ИУС еще длительное время продолжали работать в ОКБ «Импульс».

1976 г. При участии Т.Н. Соколова и А.М. Яшина (секретарем комиссии по организации нового факультета был будущий заведующий кафедрой И.Г. Черноруцкий) организован факультет автоматизации управления (ФАУ), в состав которого в числе других кафедр вошла кафедра ИУС. Цель создания нового факультета состояла в концентрации усилий в области бурно развивающихся компьютерных технологий в одном структурном подразделении. Позже (в 1982 г.) факультет был переименован в факультет технической кибернетики (ФТК). В 1978 г. кафедра выбрала другого заведующего – профессора Б.Е. Аксенова, а вскоре (1979 г.) на базе кафедры ИУС была организована новая кафедра (названная впоследствии «Компьютерные интеллектуальные технологии в проектировании» – КИТвП) во главе с А.М. Яшиным.

В 1979 г. Т.Н. Соколов скончался в возрасте 68 лет. Он был и остался простым профессором. Он не стал ни членом-корреспондентом АН СССР, ни тем более – академиком. Не имел он и звания «Заслуженный деятель науки и техники». По-видимому, страна его недооценила, хотя у него была своя система ценностей и приоритетов и своих целей он, безусловно, достиг.

После «космической эры» на кафедре ИУС было много новых исследований и побед, в т. ч. уже без Т.Н. Соколова. Была теория жестких систем (профессора Ю.В. Ракитский, С.М. Устинов, И.Г. Черноруцкий). Ю.В. Ракитский заслуженно считался главой ленинградской школы по изучению проблемы жесткости в теории компьютерного моделирования. Были и продолжаются исследования С.М. Устинова по моделированию больших энергетических систем; И.Г. Черноруцкого – в области нового направления – компьютерных технологий оптимизации по жестким целевым функционалам, а также в области общих методов системного анализа и принятия решений, в т. ч. и в области организационно-технических систем военного назначения. Были важные работы, которые велись под руководством профессора В.С. Тарасова.

Создана научная школа профессора Г.Н. Черкесова, изучающая проблемы надежности, живучести, безопасности технических систем, использующая функционально-технологический подход к анализу систем, основанный на соединении физических и вероятностных моделей в рамках общей динамической модели функционирования.

В области надежности создано новое научное направление – теория временной избыточности (резервирования времени).

Выполнен крупный, почти 10-летний, цикл работ для ОНПО «Пластполимер» по моделированию процессов управления химико-технологическими процессами производства высокомолекулярных соединений (профессора Ю.В. Ракитский, С.М. Устинов, И.Г. Черноруцкий, доценты В.А. Зимницкий, Л.К. Кириллова и др.).

Велись и ведутся работы в области автоматизированных систем научных исследований (В.С. Тарасов, И.А. Веренинов, Д.Д. Родионов, В.С. Тутыгин, А.Е. Вишневский, Ю.А. Котов, Р.И. Малинин, С.С. Попов, В.И. Филимонов), преобразования и передачи информации (Б.Е. Аксенов, В.С. Алмазова, В.В. Хромов, Б.М. Медведев, К.А. Кудрявцев, В.И. Дмитриев, Ю.К. Сабанцев, А.И. Черненький), магнитных элементов и устройств (Т.К. Кракау, В.В. Амосов, И.Г. Черноруцкий, В.П. Иванов, В.В. Боголепов, Н.Н. Черноруцкая), надежности и живучести технических систем (Г.Н. Черкесов, Ю.М. Морозов, Л.В. Пеллинец), вычислительных систем (И.Д. Бутомо, В.П. Котляров, Д.Ф. Дробинцев, А.В. Самочадин, И.П. Хижняк, А.Е. Питько, А.В. Евсеев), автоматизированных систем обработки изображений (Ю.А. Котов, В.М. Крылов, С.А. Молодяков, С.К. Круглов, С.Н. Баженов, С.Э. Сараджишвили, Н.Ф. Григорьев).

С 1995 г. кафедрой ИУС заведует доктор технических наук, профессор Игорь Георгиевич Черноруцкий. Он же является деканом ФТК (с 1996 г.).

На кафедре продолжаются работы, связанные с концепцией «автоматизации». В том числе – в области современных технологий разработки программного обеспечения вычислительных и управляющих информационных систем. Так, на базе кафедры ИУС и факультета технической кибернетики совместными усилиями заведующего кафедрой ИУС профессора И.Г. Черноруцкого, профессора В.П. Котлярова и руководства компании Motorola в 1996 г. в Университете создан первый в России учебно-научный центр (УНЦ) «Политехник-Моторола», цель деятельности которого – приближение процесса подготовки специалистов в области компьютерных технологий и программной инженерии к современным требованиям высокотехнологичного производства программных продуктов. Спустя 15 лет УНЦ вырос в современный Центр разработки программного обеспечения, где в настоящее время более тридцати талантливых молодых сотрудников, студентов и аспирантов кафедры ИУС успешно разрабатывают программные продукты по заказам фирм и организаций. Используемый и разрабатываемый ими инструментарий отвечает всем требованиям сегодняшних передовых технологий и находится на переднем рубеже современного автоматизированного промышленного программирования. Они же обеспечивают высокотехнологичную подготовку студентов Университета по различным информационным и компьютерным технологиям.

Сегодня примеру Motorola следуют и другие российские и зарубежные компании, понимая, что только долгосрочные инвестиции в университеты и в подготовку специалистов обеспечат им будущие достижения. Это вселяет надежду на то, что период выживания вузовской науки и самих вузов в России закончился и совместными усилиями нам удастся сохранить лучшие традиции российской высшей школы и даже придать новый импульс развитию научно-технического потенциала России.

Представленный выше экскурс в историю Санкт-Петербургского государственного политехнического университета вызывает интерес и сегодня – с позиций обсуждения развития высшей школы и вузовской науки в нашей сегодняшней стране. Действительно, в апреле 1961 г. страна ликовала в связи с полетом в космос Ю.А. Гагарина. Этот и другие наши успехи в области освоения космоса, например запуск первого ИСЗ, справедливо связывали с нашей системой образования и говорили, что она существенно превзошла американскую. Когда 2 января 1959 г. советский «лунник» облетел Луну и сфотографировал ее обратную сторону, именно в западной прессе появилась шутка: «Русские ученые фотографируют обратную сторону Луны, а их западные коллеги – обратную сторону Мэрилин Монро». Не хотелось бы, чтобы на современном этапе мы отказывались от наших традиций образования и перенимали столь «ценный» зарубежный опыт. Попытки ликвидировать инженерное образование в стране, свести все к бакалаврской и магистерской подготовке и исключить сам термин «инженер» из профессионального лексикона вызывают вопросы.

В свое время был сделан вывод о необходимости укрепления связи вузов с промышленностью. В 1965 г. (сорок шесть лет назад!) в Минвузе РСФСР был организован самостоятельный отдел, отвечающий за развитие науки в вузах России. По абсолютно правильному мнению руководителей этого отдела у вузовской науки есть уникальные возможности по сравнению с отраслевой наукой:

систематический подбор кадров из обучающихся в вузе студентов и аспирантов, их участие в реальных проектах уже на стадии обучения по специально сформированным учебным планам;

быстрая адаптация молодых специалистов в промышленности и отраслевых НИИ за счет непрерывности тематики выполняемых ими работ в качестве студентов, а затем – в качестве специалистов;

постоянное обновление знаний руководящего состава научно-производственных подразделений вузов за счет работы со студентами и аспирантами;

непосредственное участие во всем цикле создания новых продуктов (техники, программного обеспечения) большого количества высококвалифицированных кадров, в т. ч. преподавателей различных кафедр вуза;

оперативная отработка новых идей и технологических решений, не ограничиваемая ведомственными и отраслевыми рамками.

По-видимому, чтобы реализовать все изложенное выше совершенно необходимо предоставить право ведущим политехническим вузам России, к которым, без сомнения, принадлежит и Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, самостоятельно формировать свои учебные планы и программы подготовки специалистов, как это уже сделано для некоторых университетов России. В свое время кафедра Т.Н. Соколова таким правом обладала. Эти планы можно где-то согласовывать, утверждать, но принцип разноплановости и ориентированнности образования в регионах на разные направления развития науки и промышленности, отказа от излишней унификации вузовского обучения необходимо если не сохранить, то возродить. История, рассказанная в этой заметке, подтверждает сделанные выводы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К истории становления «ядерной кнопки» России [Текст]. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. –488 с.

2. Стремительный взлет [Текст] / Отв. редактор Ю.С. Васильев. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1995. –184 с.

3. **Черноруцкий, И.Г.** Кафедра ИУС – вчера, сегодня, завтра [Текст] / И.Г. Черноруцкий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2005. –№ 3 (41). –С. 10–14.

УДК 004.75

А.Е. Васильев, А.И. Мурго

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМ СЕТЕВОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

Типовым подходом к технической реализации современных локальных систем управления (ЛСУ) является использование встраиваемых систем управления – специализированных программируемых устройств, обладающих минимизированными массогабаритными, стоимостными и энергетическими характеристиками, конструктивно и технологически объединенных с объектом управления. Аппаратными платформами для построения встраиваемых систем служат микроконтроллеры (МК), программируемые логические интегральные схемы и их гибриды (в частности, так называемые *системы на кристалле* – System on Chip). Область применения таких встраиваемых систем довольно широка – промышленная автоматика, средства связи, медицинская аппаратура, бытовая техника и др. Применение специализированных аппаратных платформ обеспечивает достижение рекордных значений показателей технико-экономической эффективности, но предъявляет ряд специфических требований к процессу проектирования встраиваемых систем на их основе, а также к уровню квалификации разработчиков.

Важная задача, возникающая при проектировании современных систем автоматического управления (САУ), – поиск архитектурных решений, обеспечивающих возможность информационного взаимодействия совокупности локальных систем управления (ЛСУ), что позволяет создавать иерархически организованные, территориально распределенные и мобильные САУ (рис. 1).

К настоящему времени разработано множество технологий, обеспечивающих возможность построения распределенных САУ, в состав которых входят программируемые контроллеры, датчики и исполнительные устройства. Сетевое взаимодействие перечисленных элементов осуществляется, как правило, посредством специализированных решений, таких, как Profibus,

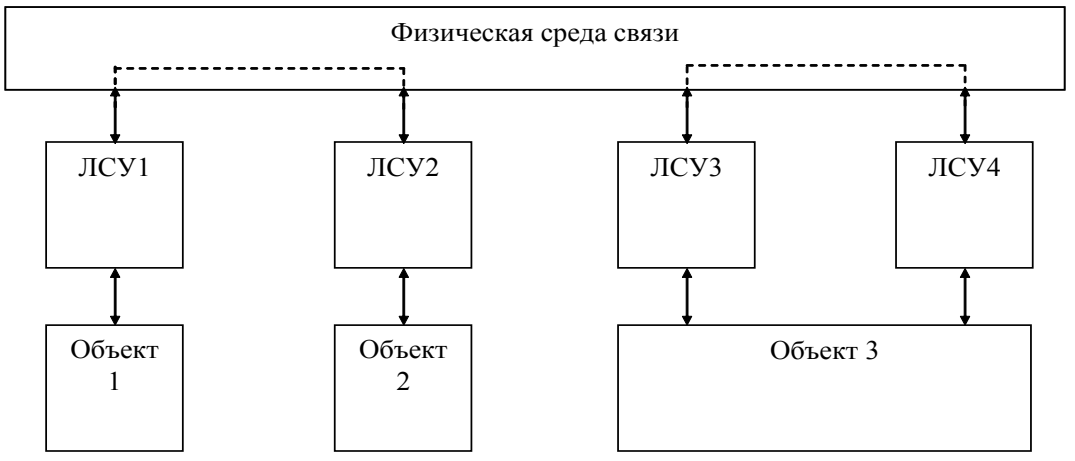


Рис. 1. Пример организации распределенной САУ

Modbus, Interbus, ControlNet, DeviceNet, P-NET, WorldFIP и др. [1].

Между тем все большую значимость для распределенных систем управления приобретают требования простоты развертывания и обслуживания, а также соответствия стандартам информационных сетей общего назначения. Последнее позволяет обеспечить единство информационной структуры промышленного производства, обеспечивающей совместную работу программно-аппаратных средств автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и автоматизированных систем управления предприятием (АСУП). Актуальность такого подхода обусловливается растущей потребностью использования оперативных производственных данных в бухгалтерском учете, системах планирования и управления ресурсами (ERP), программах инвентаризации и т. п. Современные АСУП используют для коммуникаций сети Ethernet и протоколы TCP/IP, а информационные системы – технологии Internet.

Техническая и экономическая целесообразность такого направления развития убедительно иллюстрируется интенсивными работами (в частности, групп ODVA, Echelon, Beckhoff, Schneider Electric и др.) по внедрению технологии Ethernet на производстве, применению широко распространенных сетевых протоколов для интеграции АСУП и АСУ ТП. На основе Ethernet-стандартов разрабатываются решения для применения в промышленности (PROFINET, EtherNet/IP, EtherCAT и др.) [2–4].

Становится также всё более популярной концепция micro-web серверов, реализованных непосредственно на встраиваемых устройствах, что обеспечивает управление локальными системами и их мониторинг посредством Internet-доступа.

В связи с перечисленными выше тенденциями возникает потребность предоставить в распоряжение разработчика микроконтроллерных ЛСУ средства, обеспечивающие возможность создания подсистем доступа в сеть Ethernet со стороны ЛСУ и поддерживающие обмен данными между ЛСУ посредством стандартных сетевых решений [5].

На сегодняшний день можно выделить два рода технических решений, обеспечивающих поддержку технологии Ethernet для встраиваемых ЛСУ: первый – микроконтроллерные системы с интегрированными на кристалл устройствами сетевого обмена; второй – внешние по отношению к целевому МК специализированные модули сопряжения.

Рассмотрим характерных представителей обеих групп.

Так, компания Atmel предлагает несколько подсемейств микроконтроллеров, ориентированных на сетевые приложения и имеющих особое периферийное устройство – Ethernet MAC-контроллер. К таким микроконтроллерам относится, в частности, AT32UC3A0128, поддерживающий скорость сетевого обмена 10 и 100 Мбит/с.

Важно отметить, что в данном микроконтроллере отсутствует аппаратная реализация физического уровня взаимодействия, в связи с чем для подключения ЛСУ к сети необходим внешний аппаратный драйвер Ethernet (рис. 2).

К достоинствам решений первого рода относится высокая пропускная способность цепочки «целевое приложение – сетевой абонент», к не-

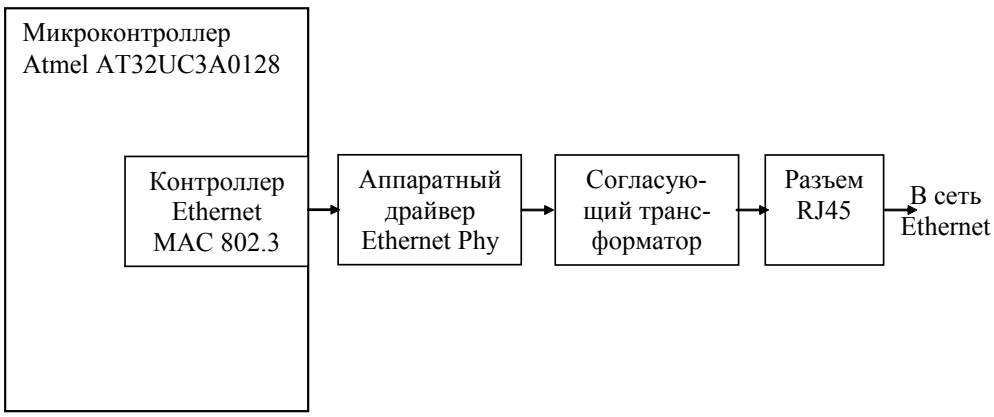


Рис. 2. Подключение МК со встроенным MAC-контроллером к Ethernet

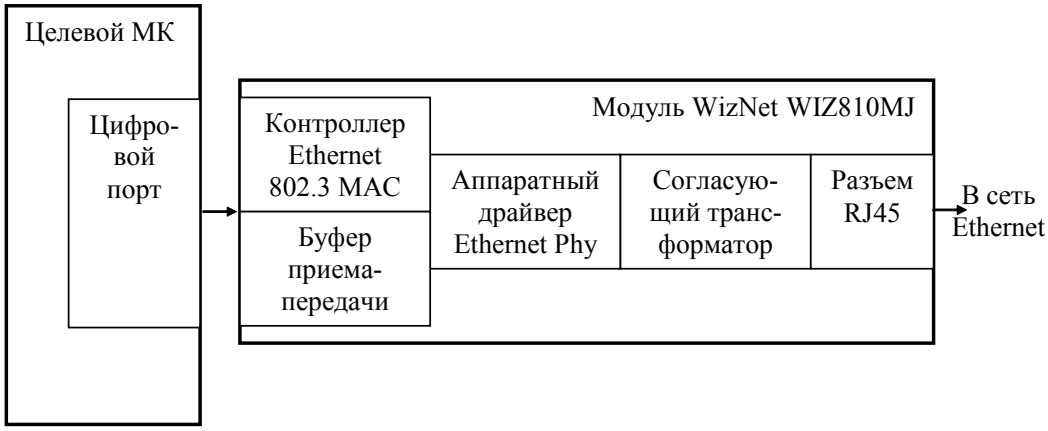


Рис. 3. Подключение МК к Ethernet с применением модуля WizNet

достаткам – ограниченность номенклатуры таких микроконтроллеров и, как следствие, ограниченность применения подобных решений в ЛСУ.

Представители второй группы решений, обеспечивающих поддержку сетевого взаимодействия, как правило, имеют аппаратно реализованный физический уровень 10Base-T и различаются количеством поддерживаемых протоколов. Следует отметить, что широта их номенклатуры является важным преимуществом, т. к. аппаратная реализация протоколов в специализированном модуле не требует затрат памяти и вычислительных ресурсов процессорного ядра основного микроконтроллера на их программную реализацию.

К достоинствам решений второго рода относится высокая степень универсальности (возможность применения практически в любой микроконтроллерной ЛСУ), к недостаткам – ограничения целевой пропускной способности, накладываемые применением относительно низкоскоростных шин внутриприборного обмена.

В качестве примера таких решений укажем модуль WIZ810MJ компании WIZnet, представляющий собой сетевой контроллер с аппаратной реализацией как физического уровня, так и протоколов транспортного, сетевого и канального уровней – TCP, UDP, IPv4, ICMP, ARP, IGMP и MAC.

К особенностям аппаратуры модуля относятся применяемые для связи с МК внутриприборные интерфейсы Direct Bus, Indirect Bus, SPI, а также наличие встроенного буфера обмена на основе статической памяти.

Схема подключения ЛСУ к Ethernet с применением этого модуля показана на рис. 3.

Очевидно, что модуль WIZ810MJ является пригодным для построения универсальных распределенных встраиваемых систем управления; рассматриваемые ниже практические решения основаны на его применении.

В лаборатории встраиваемых интеллектуальных систем управления авторами статьи разработан базовый вариант комплекса средств поддержки проектирования подсистем сетевого обмена данными для микроконтроллерных устройств.

В состав комплекса (рис. 4) входят:

• инструментальная ЭВМ, содержащая среду разработки Shell51 (для проектирования и отладки программного обеспечения (ПО) микроконтроллеров семейства MCS-51), библиотеки программ-драйверов для микроконтроллера, тестовую программу-клиент Conn51 и библиотеку программных модулей для разработки целевого клиентского ПО;

• управляющий микроконтроллер семейства MCS-51 фирмы Infineon [6], являющийся ядром целевой ЛСУ и непосредственно выполняющий действия по управлению целевым объектом;

• модуль сопряжения со средой кабельной передачи данных в формате Ethernet на основе сетевого процессора WizNet и дополнительных устройств.

Таким образом, к разработанной аппаратной составляющей комплекса относится модуль сопряжения МК с сетью Ethernet, к разработанному системному ПО – библиотеки подпрограмм сетевого обмена по различным протоколам и средства тестирования сетевого обмена.

Создаваемое пользователем комплекса – разработчиком целевой микроконтроллерной ЛСУ –

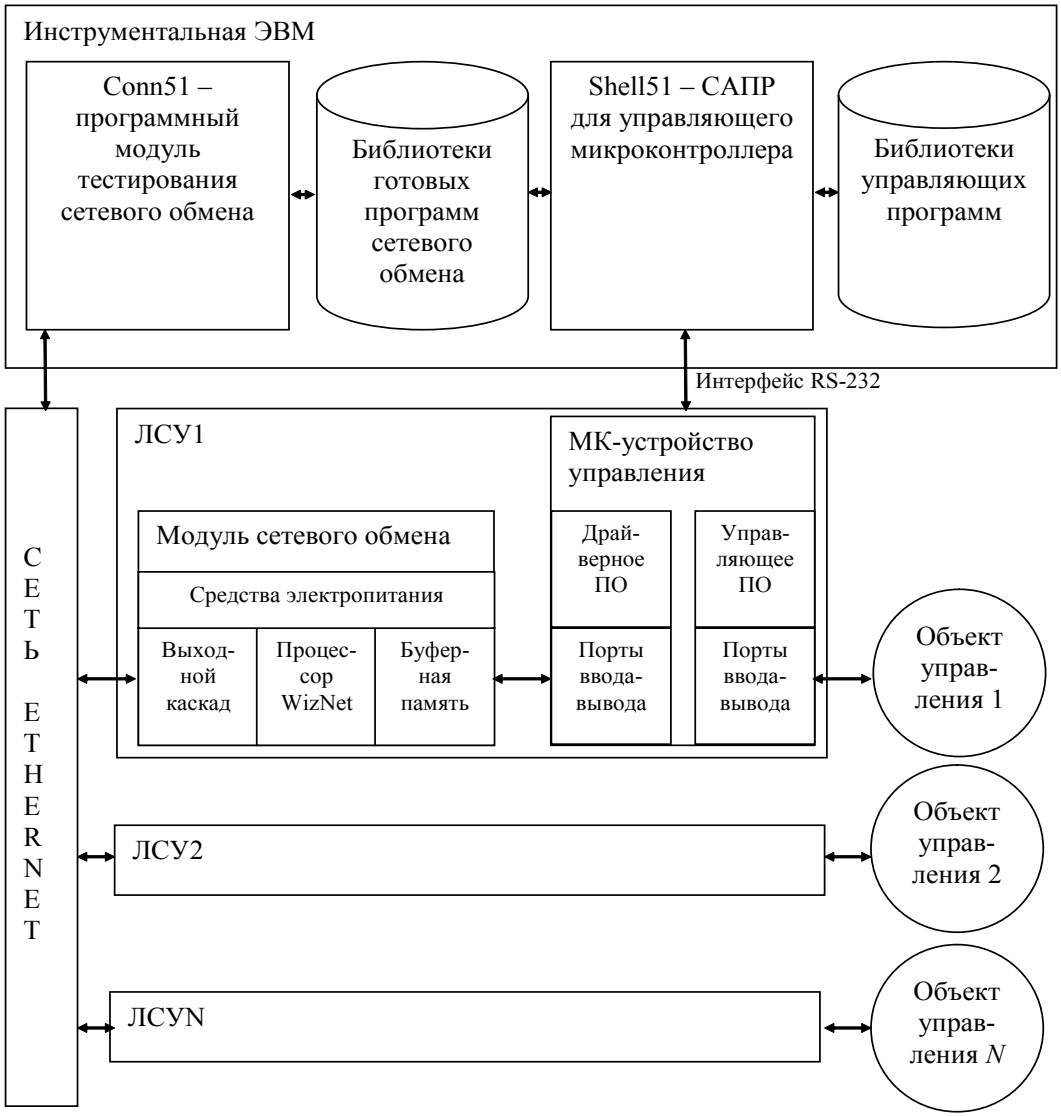


Рис. 4. Структура комплекса проектирования

управляющее и сетевое ПО проектируется, отлаживается и загружается в микроконтроллер посредством системы Shell51. Процесс разработки программных компонент сетевого обмена поддерживается библиотекой готовых решений, содержащей типовые программные реализации различных способов сетевого и межсетевого обмена.

На рис. 5 показан вариант аппаратной реализации модуля сопряжения.

К его особенностям относятся:

возможность одновременного подключения к модулю нескольких микроконтроллеров;

возможность применения нескольких вариантов обмена данными с микроконтроллером, что обеспечивает разнообразие допустимых способов подключения к нему, и, следовательно, возможность выбора оптимального решения (например, с точки зрения количества затрачиваемых линий ввода-вывода, пропускной способности и т. п.);

наличие встроенной памяти, что обеспечивает возможность хранения специфической информации (например, содержания web-страниц) непосредственно в модуле и экономии этого дефицитного для микроконтроллера ресурса;

несколько схем поддержки электропитания, что обеспечивает пригодность модуля к эксплуатации в системах с различными стандартами напряжения питания системного ядра.

Программное обеспечение состоит из ПО для микроконтроллера и ПО абонентского уровня.

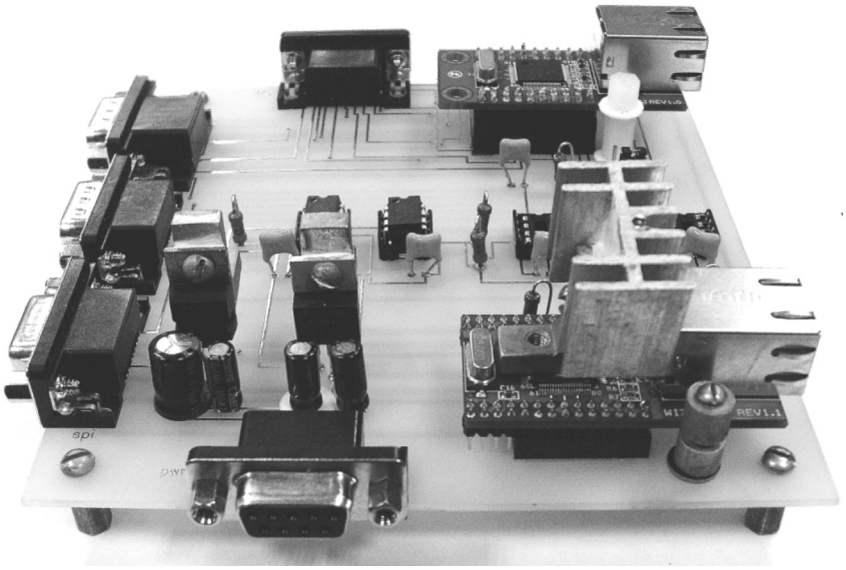


Рис. 5. Внешний вид модуля сопряжения

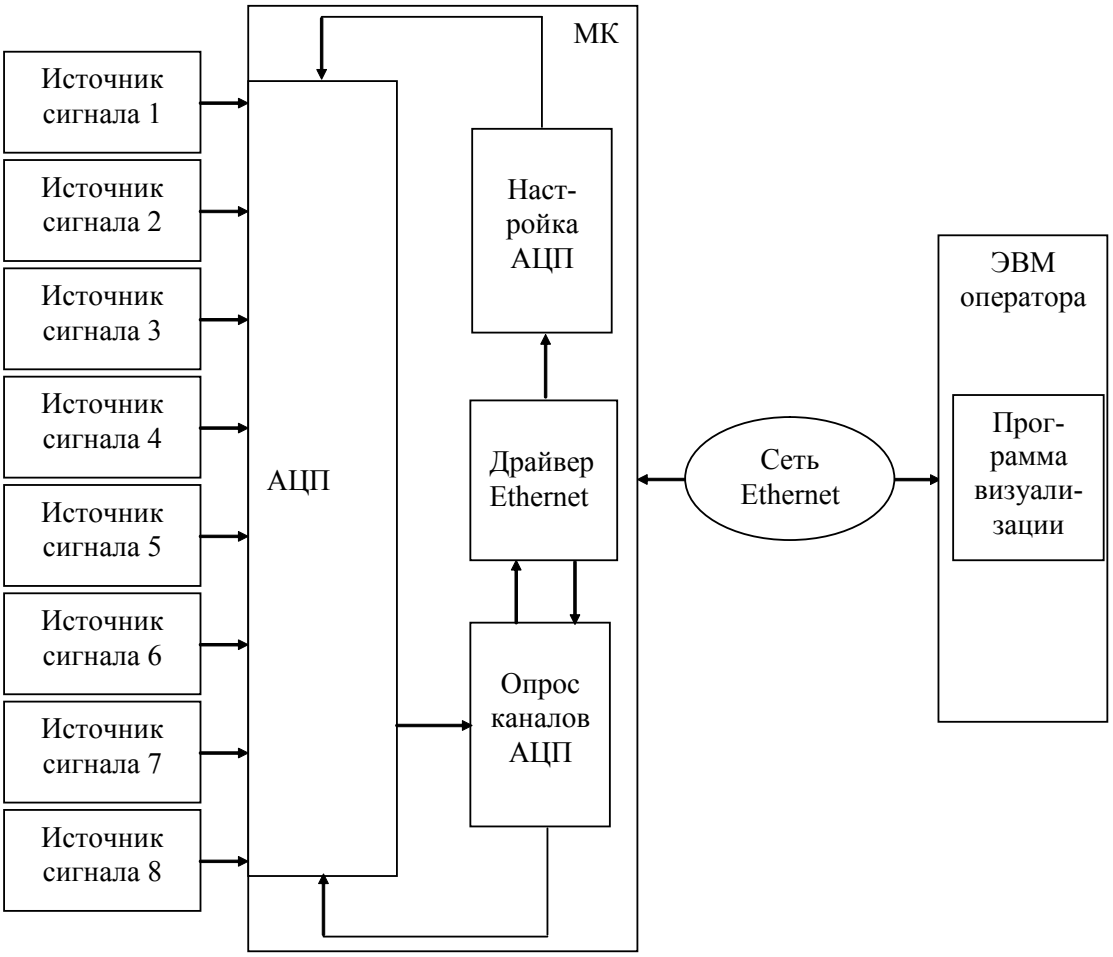


Рис. 6. Структура системы «сетевой осциллограф»

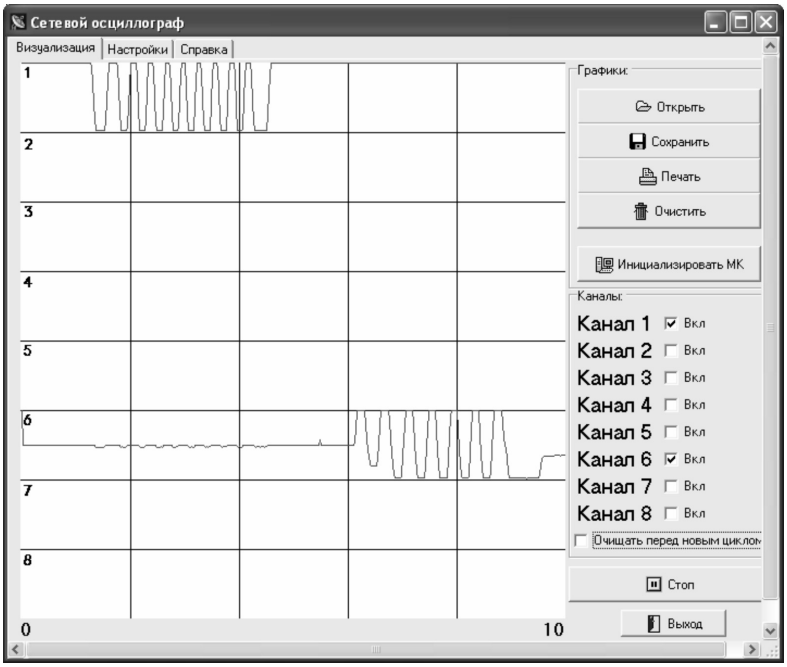


Рис. 7. Внешний вид клиентского приложения

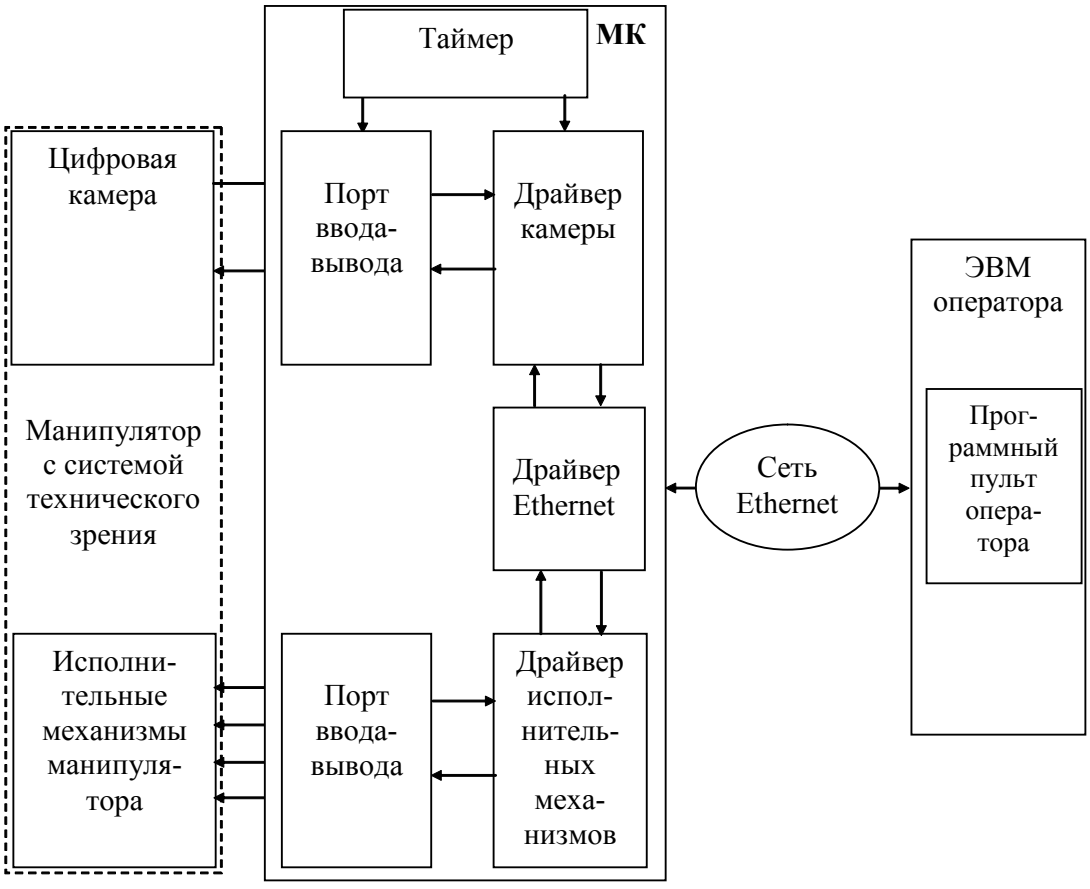


Рис. 8. Структура системы дистанционного управления робототехническим манипулятором

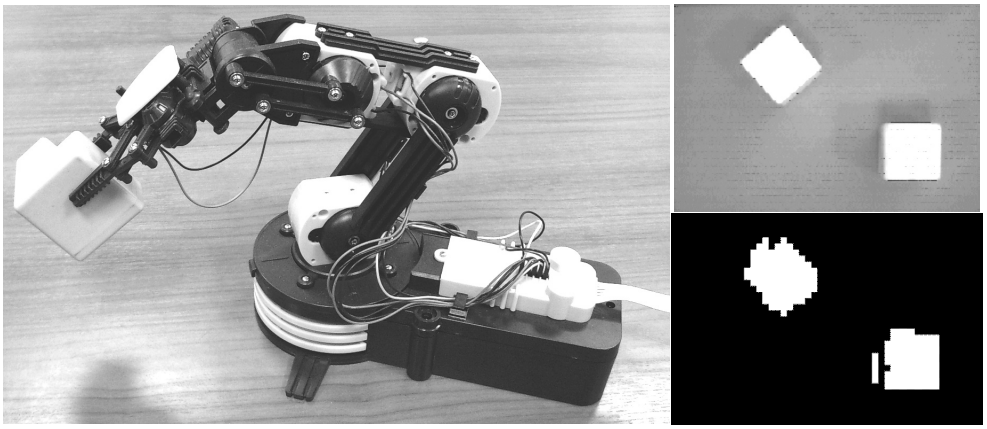


Рис. 9. Внешний вид манипулятора и кадр изображения с СТЗ

В состав программного обеспечения МК входят:

программные средства связи с разработанным сетевым модулем по внутриприборным интерфейсам (Direct, Indirect и SPI);

программные средства поддержки обмена данными между МК и сетью Ethernet по стандартным сетевым протоколам.

В качестве примера применения комплекса проектирования приведем вариант реализации целевой системы – «сетевой осциллограф» (рис. 6), обеспечивающий измерение микроконтроллером уровней аналоговых сигналов на выбранных оператором входах, передачу информации по сети на территориально удаленный узел и ее отображение клиентской программой (рис. 7).

Ведется разработка варианта комплекса, обеспечивающего дистанционное управление робототехническим манипулятором с системой технического зрения (СТЗ) (рис. 8). Команды оператора с удаленного узла передаются на комплекс по сети Ethernet. Для контроля состояния сцены оператору также передается исходное или отфильтрованное на МК изображение с цифровой камеры, установленной на манипуляторе (рис. 9).

Описанный выше комплекс может найти применение для решения задач разработки систем дистанционного управления, мониторинга и контроля, а также в учебном процессе вузов. Его использование обеспечит повышение качества проектирования модулей и узлов связи для указанных систем при одновременном снижении трудоемкости этого проектирования, повысит качество подготовки специалистов в области автоматизации и управления, информатики и вычислительной техники.

Дополнительная информация о лаборатории ВИСУ и деятельности ее коллектива доступна в сети по адресу http://aivt.ftk.spbstu.ru/education/labs/intelsys/

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Таненбаум, Э.** Распределенные системы. Принципы и парадигмы [Текст]/ Э. Таненбаум, М. Ван Стен. –СПб.: Питер, 2003. –880 с.

2. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://odva.org

3. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://echelon.com

4. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://ethercat.org

5. **Баррет, С.** Встраиваемые системы. Проектирование приложений на микроконтроллерах [Текст] / С. Баррет, Д.Дж. Пак. –М.: ДМК-Пресс, 2007. –640 с.

6. **Васильев, А.Е.** Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений [Текст]/ А.Е. Васильев. –СПб.: БХВ-Петербург, 2008. –304 с.

УДК 621.391:004.421

В.С. Тутыгин, А.В. Южаков

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ ЛЧМ-СИГНАЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ СРЕДСТВАМИ ПЛИС XILINX

Обнаружение и определение параметров спутниковых ЛЧМ-сигналов в реальном времени – задача весьма сложная в техническом отношении. Известный способ решения этой задачи заключается в преобразовании с помощью акустооптоэлектронного процессора, преобразующего поток ЛЧМ-сигналов в поток мгновенных спектров [1, 2]. Технические возможности современной аппаратуры позволяют получать мгновенный частотный спектр за 1–4 мкс при количестве разрешимых элементов до 128–256. В результате на аппаратуру цифровой обработки поступает поток мгновенных спектров с частотой следования элементов от 40 МГц (если каждый мгновенный спектр включает от 128 частотных линий). Основные задачи цифровой обработки – обнаружение в реальном времени ЛЧМ-сигналов в условиях шумов и помех и определение параметров ЛЧМ-сигнала, таких, как центральная частота, полуширина спектра и амплитуда. Способы решения этих задач в режиме off-line, рассмотрены в [5–8]. Для решения этих же задач в режиме on-line необходимо применение аппаратных средств цифровой обработки на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Сведения о системах такого назначения, в которых быстрое преобразование Фурье, обнаружение, фильтрация узкополосных помех и определение параметров широкополосных сигналов в реальном времени реализованы полностью на ПЛИС, приведены в [3, 4]. Однако гибридные системы, одна из которых рассмотрена в данной статье, сочетающие возможности акустооптоэлектронных процессоров с возможностями средств цифровой обработки, реализованных на современных ПЛИС и быстродействующих сигнальных процессорах, в настоящее время по техническим характеристикам превосходят полностью цифровые системы, созданные на основе ПЛИС.

Структура системы регистрации и цифровой обработки данных (СРЦОД) приведена на рис. 1.

В состав аппаратной части СРЦОД входят промышленный компьютер IPC-6806WHB-20ZAS51 в специальной комплектации и модуль цифровой

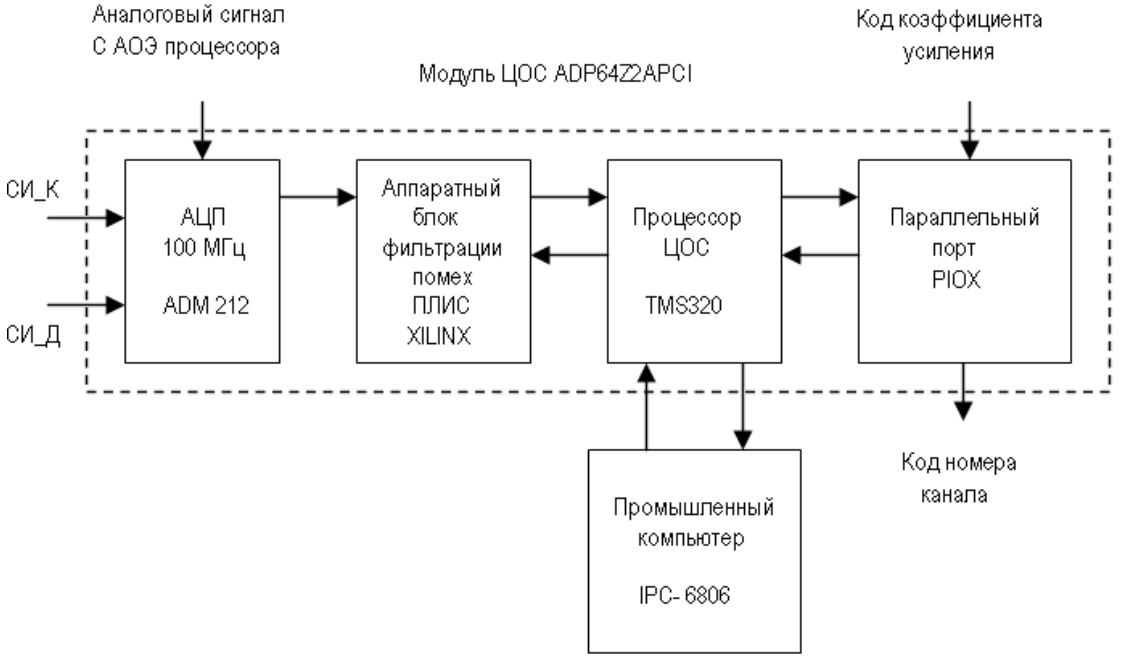


Рис. 1. Структура СРЦОД

обработки сигналов ADP64ZAZ2PCI с субмодулем ввода аналоговых сигналов ADM212X100M.

Задачи и средства цифровой обработки

Для цифровой обработки сигналов использованы ресурсы ПЛИС, быстродействующего сигнального процессора TMS и компьютера.

В процессе цифровой обработки решается несколько задач:

1) фильтрация шумов и помех в потоке данных;

2) сжатие потока данных;

3) анализ потока данных с целью автоматического определения порога шума и диапазона частот «сильной» помехи (в режиме определения карты помех);

4) формирование команд на переключение частотных каналов и поляризации;

5) обнаружение информативных сигналов в потоке данных и идентификация параметров: центральной частоты, полуширины спектра и мощности;

6) анализ обнаруженных сигналов с целью исключения возможности ошибочного принятия сигнала помехи за информативный сигнал;

7) передача параметров информативных сигналов на другой компьютер;

8) регистрация сжатого потока данных;

9) реконструкция спектров и сигналов по сжатым данным.

Процедура обработки состоит из предварительной обработки входного потока мгновенных спектров (кадров) и расчетов, производимых в соответствии с выбранным режимом работы.

На этапе предварительной обработки производится выделение сигнала из шума (п. 1) и формирование 32-битных отсчетов, содержащих амплитуду сигнала, индекс в кадре и номер кадра для исключения из дальнейшей обработки неинформативных данных (п. 2). На практике не более пяти отсчетов в мгновенном спектре превышают уровень шума. В этом случае предварительная обработка уменьшает объем данных почти в 10 раз: размер кадра данных = 128*12 бит = 1536 бит; объем обработанных данных = 32 бит*5 = 160 бит. Предварительная обработка данных требует высокой скорости выполнения, поэтому реализована в ПЛИС.

Параметры фильтрации определяются в автоматическом режиме из анализа фона в отсутствие информативного сигнала и передаются в ПК для визуального контроля и дальнейшего повторного использования (п. 3).

Известный способ обнаружения информативных сигналов в потоке спектров основан на детектировании превышения амплитудой дискретных значений порогового уровня – уровня шума. Установлено, что оптимальный уровень шума может быть определен автоматически при условии, что максимально возможная ширина полосы частот ЛЧМ-сигнала может быть предварительно оценена. Изучение большого количества реальных спектров, полученных с помощью комплекса аппаратуры приема и регистрации спутниковых сигналов, показали, что фоновый шум в любом из мгновенных спектров (кадров), независимо от того, присутствует или нет в нем ЛЧМ-сигнал или какая-либо помеха, занимает не менее 90 % от общего спектрального диапазона кадра.

Предлагаемая методика автоматического определения порога шума основана на регистрации шумового сигнала в секторе наблюдения до момента пролета спутника, в последующем построении амплитудной гистограммы Q кадров и определения порога шума как уровня отсечения 90 % площади амплитудной гистограммы. В общем случае уровень отсечения должен быть установлен на уровне (100-К) %, если ЛЧМ-сигнал в совокупности с сигналом помехи большой амплитуды, соизмеримой с амплитудой ЛЧМ-сигнала, занимает К % от общего спектрального диапазона кадра.

На рис. 2 приведен пример амплитудной гистограммы, построенной в результате статистической обработки 100 последовательных кадров, и показан определенный автоматически порог шума.

Удаление шумовых сигналов, превышающих автоматически установленный уровень шума, производится при последующей обработке. В процессе последующей обработки сжатого потока данных производится накопление S кадров, начиная с момента, когда входной сигнал превысит определенный автоматически установленный порог шума. В результате будет получен ЛЧМ-сигнал. В этом накопленном сигнале могут присутствовать не только ЛЧМ-сигнал, но и отдельные помехи, превышавшие уровень шума. В ходе цифровой обработки накопленного сигнала фрагменты кадра, имеющие ширину полосы частот меньшую, чем минимально возможная у обнаруживаемого ЛЧМ-сигнала, обнуляются. Этим обеспечивается исключение ложного обнаружения.

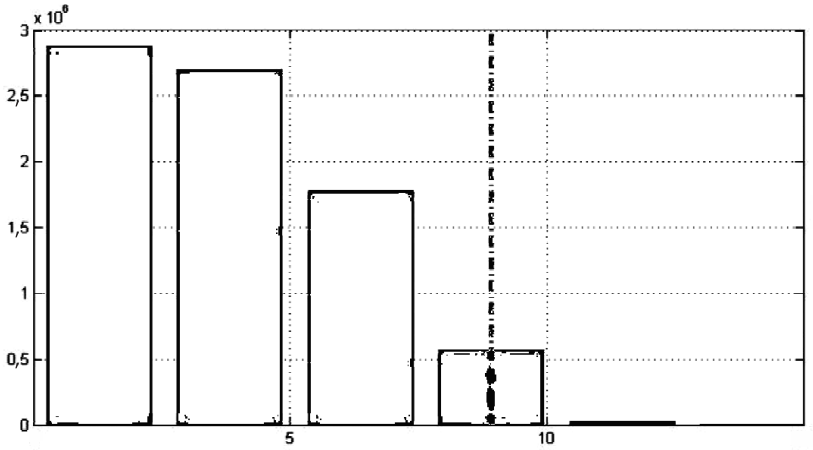


Рис. 2. Пример амплитудной гистограммы 100 последовательных кадров
Штрих-пунктирная линия показывает автоматически определенный порог шума

Программа ЦОС, выполняющаяся на процессоре модуля, осуществляет загрузку из ПК конфигурационных параметров модуля, режима работы и данных, необходимых для функционирования в заданном режиме.

В зависимости от режима работы осуществляется расчет параметров сигнала и выдача ПК уведомлений о соответствии параметров сигнала определенным критериям (п. 5), либо данные передаются в ПК где они сохраняются для последующего анализа(п. 8, 9).

Состав программной части СРЦОД

Программная часть СРЦОД состоит из четырех компонент.

1. Прошивка ПЛИС модуля. Предоставляет функции управления субмодулем и содержит алгоритмы предварительной обработки сигналов.

2. Программа процессора модуля. Управляет аппаратными средствами посредством библиотеки, поставляемой производителем, осуществляет обработку данных и передает результаты в ПК. Библиотеки для процессора ЦОС реализуют основные функции библиотеки С. При этом вызовы функций, работающие с потоками вывода и файлами, посредством системы сообщений, доставляются в управляющую программу ПК. Это позволяет осуществлять загрузку конфигурационных файлов из программы ЦОС с файловой системой ПК и выводить сообщения посредством обычного вызова printf, что делает очень удобным процесс отладки.

3. Драйвер модуля и библиотеки, предоставляющей средства управления модулем.

4. Программа пользователя, управляющая работой модуля.

Принцип функционирования СРЦОД

Выходной сигнал акустооптического приемника формируется в устройстве съема информации с ПЗС-фотоприемника и имеет вид аналогового сигнала в диапазоне от нуля до 2,048 В, развернутого во времени. Сигнал во времени представляет собой непрерывную последовательность кадров. Каждый кадр содержит 128 информативных значений сигнала, количество значений соответствует количеству элементов ПЗС-фотоприемника. Кроме аналогового сигнала устройство съема формирует импульсные синхросигналы сопровождения (кадровые и элементные синхроимпульсы), необходимые для работы системы обнаружения, запоминания и отображения сигналов акустооптического приемника DMA

Субмодуль ADM212X100M осуществляет преобразование аналогового сигнала в 12-битный код, проходящий предварительную обработку в ПЛИС. Если карта помех не определена, то все элементы спектра помещаются в FIFO, реализованное в стандартной прошивке ПЛИС ADM. В противном случае в FIFO попадают только информативные элементы спектра. Карта помех представляет собой набор регистров, хранящих уровни шума каждого канала и битовые массивы, индексируемые номером элемента спектра, определяющие информативность этого элемента.

Перед записью в FIFO данные преобразуются в 32 разрядные отсчеты, содержащие номер кадра, номер элемента в спектре и код АЦП. Мож-

но заметить, что в том случае, когда фильтрация не применяется, объем данных увеличивается почти в три раза. Но это не является проблемой, поскольку подобная ситуация возникает только в режиме определения параметров карты помех. Пропускная способность интерфейсов модуля и вычислительные возможности процессора модуля обеспечивают обработку данных такого объема. В ПК передаются только результаты обработки.

Предварительная обработка не требует вычислительных ресурсов процессора модуля.

Программа ЦОС модуля последовательно, в соответствии с заданной конфигурацией, переключает частотные каналы акустооптического приемника. Команды управления передаются через порт PIOX, обеспечивающий необходимо высокую (500 кБ/с) скорость обмена данными. После переключения канала производится запуск АЦП субмодуля, и данные из FIFO по каналу DMA передаются в память, доступную процессору модуля. В зависимости от установленного режима работы в программе ЦОС производятся следующие расчеты.

• Определение карты помех. Производится подсчет частоты появления в спектре амплитудных значений и на основе задаваемого квантиля определяется уровень шума. Элементы спектра, превышающие уровень шума, отмечаются в карте помех. Карта помех передается в ПК для визуального анализа оператором и может быть сохранена для последующего использования.

• Определение параметров сигнала и принятие решения об обнаружении ЛЧМ-сигнала. Информация об обнаружении и характеристики сигнала передаются в ПК и могут транслироваться при необходимости на другой компьютер по протоколу syslog.

Режим работы и конфигурационные параметры программы ЦОС задаются программой ПК при запуске сеанса приема/обработки сигнала. Во всех режимах работы программы ЦОС оператор ПК может визуально наблюдать принимаемый сигнал. Пример представления информации в кадре, содержащем информативные сигналы и шумовой фон (без фильтрации помех), приведен на рис. 3.

Последовательность обработки информационного потока данных показана на рис. 4.

Загрузка ПЛИС модуля производится однократно, при загрузке операционной системы. Загрузка программы процессора ЦОС производится при запуске сеанса обнаружения.

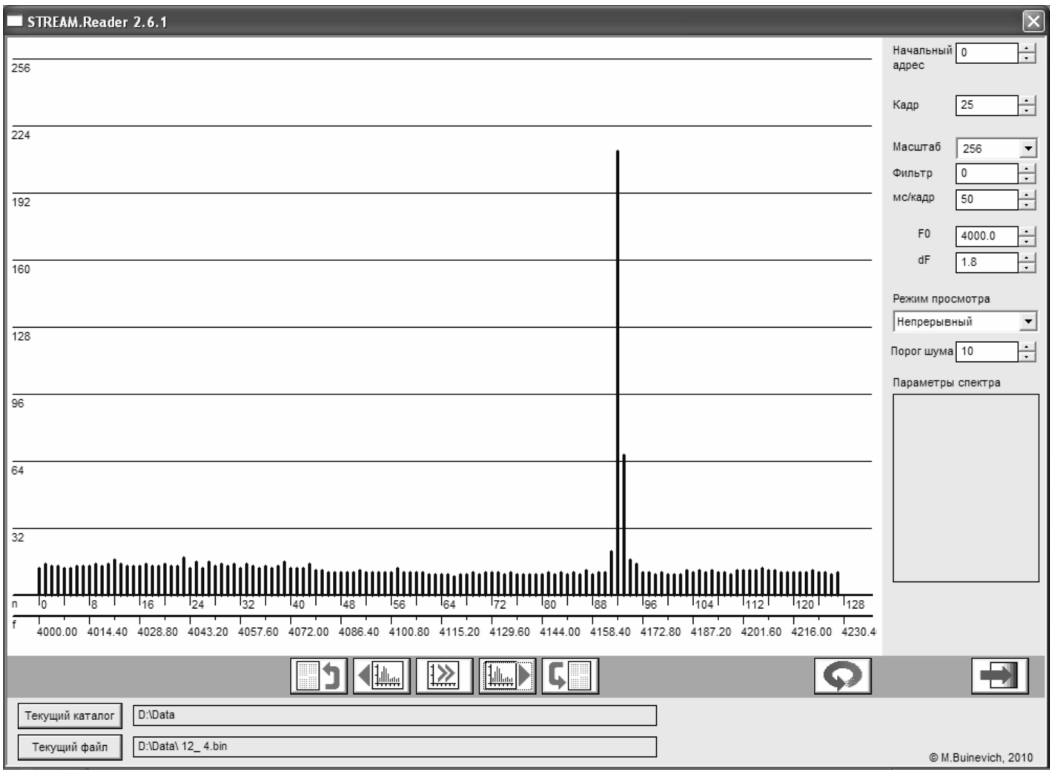


Рис. 3. Пример представления информации в кадре

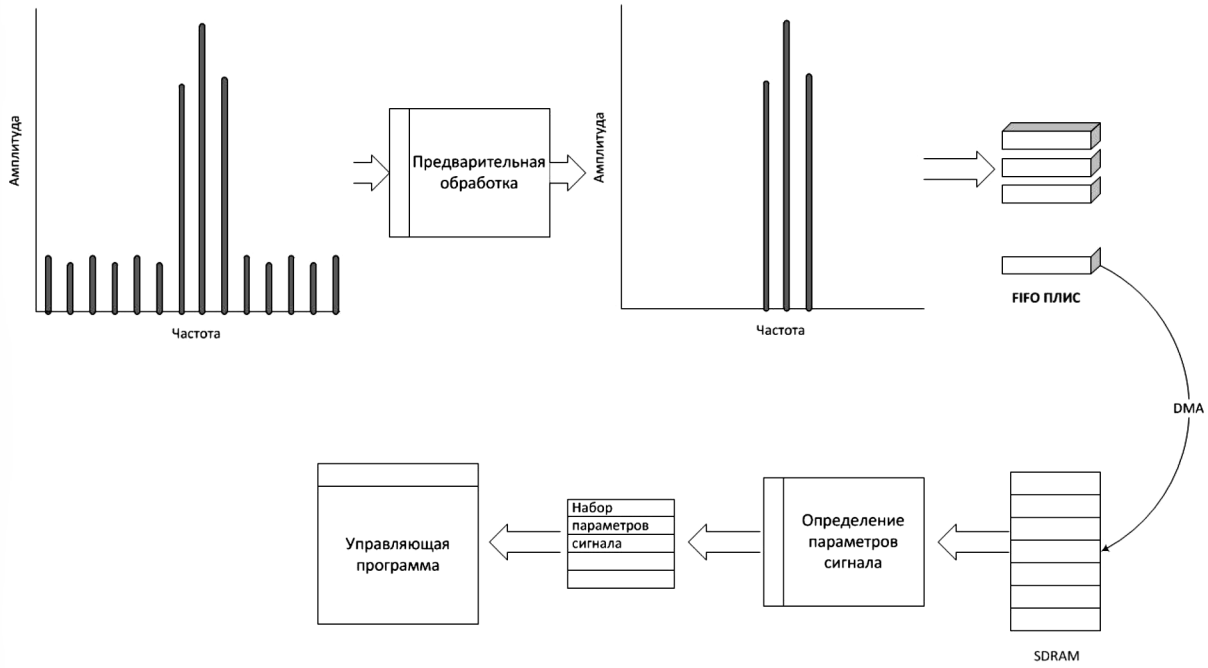


Рис. 4. Последовательность обработки информационного потока данных

Использование аппаратной цифровой обработки потоков данных акустооптического приемника с помощью модуля ADP64ZAZ2PCI позволяет обрабатывать информативную часть потока данных в течение всего сеанса связи без потерь информации и перерывов и в полном объеме.

Пропускная способность системы цифровой обработки зависит от степени сложности алгоритма обработки. При реализации упомянутого выше алгоритма пропускная способность составляет не менее 40 Мб/с.

Алгоритм цифровой обработки

Система регистрации и цифровой обработки данных (СРЦОД) проектировалась в расчете на прием и анализ сигналов в двух частотных диапазонах и двух поляризациях в каждом диапазоне. Признак поляризации (0 или 1) определялся через отношение амплитуд $A\,\max ij$ одного канала i, но разных поляризаций j, т. е. $A\max_{00}/A\max_{01}$ и $A\max_{10}/A\max_{11}$. Если, например, $1 < A\max_{00}/A\max_{01} < 10$, то считалось, что сигнал канала 0 не поляризован, иначе – поляризован. СРЦОД управляла в рельном времени подсистемой переключения каналов и поляризаций и подсистемой автоматической регулировки усиления (АРУ).

Алгоритм работы СРЦОД в режиме обнаружения, когда карта помех заполнена и установлен порого шума в каждом канале, может быть описан следующим образом.

В ПЛИС ADM, входящей в состав СРЦОД, производится сканирование каналов 0–1 и поляризаций 0–1 по 4 мс* на канал до момента обнаружения информативной линии в кадре (выше уровня помех и не совпадающей с картой помех). Номер канала выводится в цифровой порт PIOX для передачи в контроллер приемника. Цифровая информация из ПЛИС в течение 1 мс после переключения канала и в течение 1 мс после обнаружения первой информативной линии в кадре в процессор СРЦОД не передается.

В момент обнаружения первой информативной линии через порт PIOX в контроллер приемника передается признак обнаружения, на 25 мс прекращается переключение каналов и на 4 мс (на время отработки АРУ) блокируется передача данных из ПЛИС в СРЦОД. После истечения 4 мс продолжится поиск информативных линий в кадрах и с момента обнаружения первой информативной линии в течение 1 мс (это время достаточное для приема одного ЛЧМ-сигнала,

* Время может устанавливаться и другое, в пределах от 1 до 10 мс. Код номера канала включает номер канала (0, 1) и номер поляризации (0, 1) в формате NK, NP. Возможны значения 00, 01, 10, 11.

занимающего от 5 до 10 кадров) производится обнаружение кадров, содержащих информативные линии, и передача информации об обнаруженных линиях в блок цифровой обработки. Данные передаются в виде 32-разрядных слов, каждое слово содержит выходной код счетчика кадров (12 бит), выходной код счетчика данных в кадре (8 бит), выходной код АЦП (12 бит).

В режиме «Обнаружение» управляющая программа сигнального процессора реализует следующий алгоритм.

1. Ожидание появления на выходе ПЛИС информативного элемента в потоке сжатых данных.

2. Чтение текущего информативного элемента потока сжатых данных. Каждый элемент потока содержит номер кадра KN, номер информативного элемента в кадре EN и амплитуду *A* информативного элемента. Номер канала *i* и номер поляризации *j* для элемента потока формируются в ПЛИС. Если элемент с текущим номером отсутствует – переход к п. 1.

3. Чтение коэффициента усиления приемника.

4. Суммирование элементов потока сжатых данных, начиная с текущего до обнаружения признака конца пачки информативных сигналов. Признаком конца пачки является изменение номера кадра больше, чем на единицу, т. е. при $KN_{i+1} - KN_i > 1$. (Учитывая, что емкость счетчика кадров равна 4096, при переходе от номера кадра 4095 к 0, получим $KN_{i+1} - KN_i = -4095$, поэтому ошибки в определении признака конца пачки не происходит).

5. Вычисление параметров пачки информационных сигналов и формирование массива PPI_{ij} параметров пачки по *i*-му каналу *j*-й поляризации:

номера линии начала ENS;

номера линии конца ENF;

номера линии центра пачки $S = (ENS + ENF)/2$;

максимальной амплитуды информативного сигнала в пачке;

коэффициента усиления приемника KP.

6. Проверка параметра *S* ширины пачки. Если *S* меньше ожидаемой минимальной ширины пачки, инкремент текущего номера элемента потока сжатых данных, затем – переход к п. 2. Это нужно, т. к. возможно, что в момент начала приема ЛЧМ-сигнал уже передавался, и он зарегистрировался не полностью.

7. Сохранение массива PPI_{ij} параметров пачки информативных линий по *i*-му каналу *j*-й поляризации.

8. Инкремент текущего номера элемента потока сжатых данных до момента изменения номера поляризации (с 0 на 1 или с 1 на 0).

9. Проверка текущего номера поляризации *j*. Через 4 мс после изменения номера поляризации с 0 на 1 (за 4 мс уже будет зарегистрирован информативный ЛЧМ-сигнал, если он есть) проверка наличия PPI_{i0} и PPI_{i1}. Если PPI_{i0} и PPI_{i1} существуют, вычисление отношения амплитуд $A\max_{i0}/A\max_{i1}$ для определения параметра поляризации PP*i* по *i*-му каналу. Параметр поляризации PP = 1, если $A\max_{i0}/A\max_{i1} < 0{,}1$ или $A\max_{i0}/A\max_{i1} > 10$, иначе PP = 0. Если же PPI_{i0} или PPI_{i1} не существуют PP = 0. Тип поляризации TP = 0, если $A\max_{i0}/A\max_{i1} < 0{,}1$, и TP = 1, если $A\max_{i0}/A\max_{i1} > 10$.

10. Формирование пакета данных с результатами обнаружения, содержащего центральную частоту, полуширину спектра, амплитуду и признак поляризации.

11. Проверка времени работы в режиме «Обнаружение». Если время больше заданного, например, 5 мин, выход из режима Обнаружение» иначе – переход к п. 2.

Технические данные системы цифровой обработки

Основные технические характеристики разработанной системы цифровой обработки потоков мгновенных спектров спутниковых сигналов приведены в таблице.

Примеры результатов регистрации реальных спутниковых сигналов приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5 показан вид экрана монитора компьютера

Основные технические характеристики

Наименование	Значение
Максимальная длительность во времени регистрируемого входного аналогового сигнала, мин	20
Максимально возможная частота дискретизации входного аналогового сигнала, Мб/с	40
Максимальный объем обрабатываемой за один сеанс информации, Гб	48
Разрядность слова данных потока преобразованных цифровых данных, бит	12
Количество программируемых каналов – источников данных в пакете заданий на регистрацию	4
Время обнаружения и вычисления параметров информативного сигнала, не более, мс	25

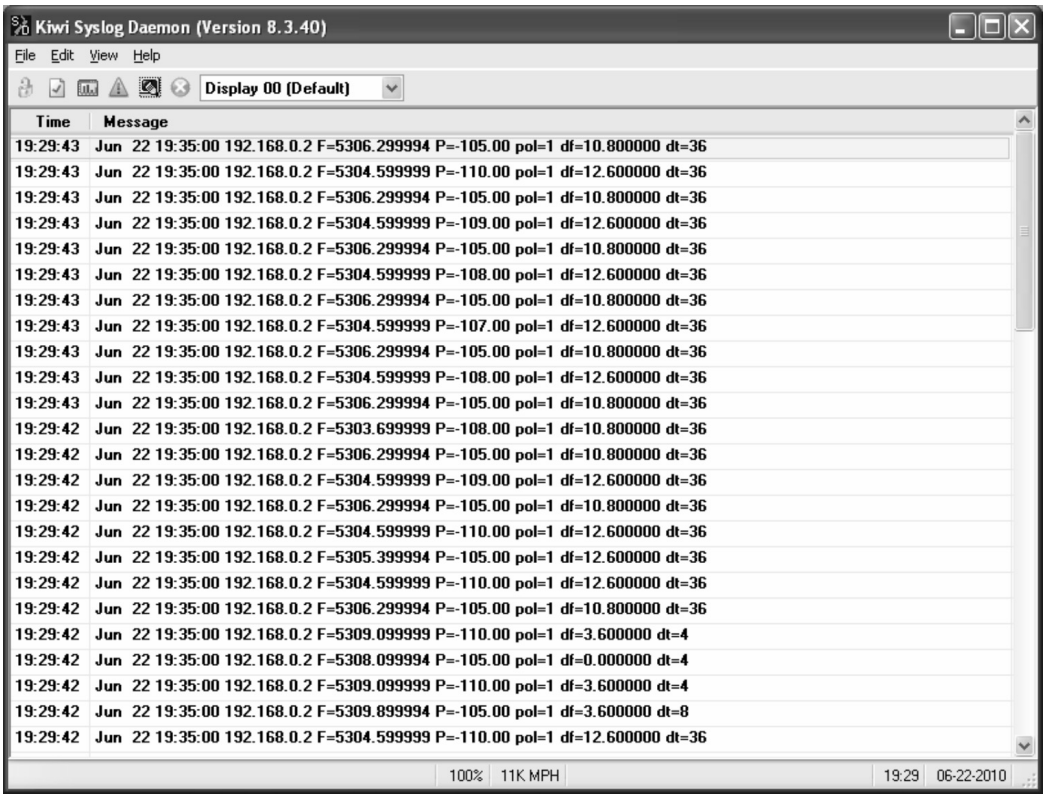


Рис. 5. Протокол результатов регистрации

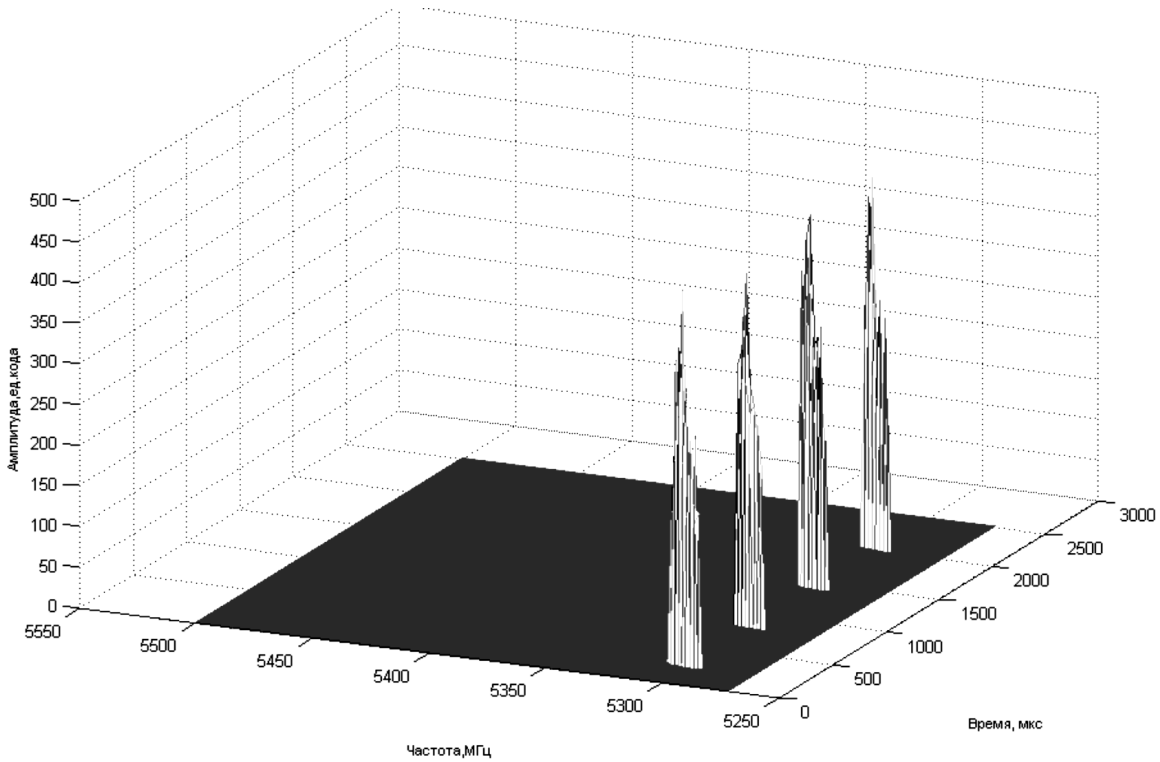


Рис. 6. 3D-представление реконструированных спектров по сжатым данным

при определении в реальном времени параметров сигналов РЛС спутника RADARSAT-1.

В каждой строке протокола, который может быть передан на другой компьютер по линиям Ethernet, содержится: время в формате чч:мм:сс (ч, мин, с); дата в формате месяц, день; центральная частота F ЛЧМ-сигнала в МГц; мощность принимаемого сигнала P в дБ; признак поляризации *pol*; ширина спектра принимаемого ЛЧМ-сигнала *df* в МГц; длительность одного ЛЧМ-сигнала во времени *dt* в мкс.

Измеренные по записи параметры сигнала совпадают с фактическими, приведенными в [9]. На рис. 6 показан фрагмент трехмерной реконструкции потока спектра сигналов РЛС спутника исследования ресурсов Земли ERS-1, восстановленный по сжатым данным.

Определенные параметры сигналов РЛС спутника ERS-1 также соответствуют приведенным в [6].

Результаты, полученные при обработке реальных сигналов спутников RADARSAT-1 и ERS-1, позволяют сделать вывод о том, что задача определения в реальном времени параметров сигналов РЛС спутников ERS-1, 2, Enivisat и RADARSAT может быть успешно решена на базе аппаратного комплекса, содержащего компьютер IBM PC с установленным в нем модулем ЦОС ADP64ZAZ2PCI производства ЗАО «Инструментальные системы» при использовании описанных в настоящей статье алгоритмов цифровой обработки, предусматривающих автоматическое определение порога шума, определение карты помех и определение параметров спутниковых ЛЧМ-сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куприянов, А.И.** Теоретические основы радиоэлектронной разведки [Текст] / А.И. Куприянов, П.Б. Петренко, М.С. Сычев. –М.:Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2010. –381с.

2. **Высоцкий, М.Г.** Многоканальный акустооптоэлектронный спектроанализатор с временным интегрированием [Текст] / М.Г. Высоцкий, В.П. Каасик, С.А. Рогов //Автометрия. –2005. –№3.

3. **Shuhua, Wei.** Research of CMLD-CFAR Detecting Algorithm in Radar Reconnaissance Receiver [Текст] / Wei Shuhua, Wang Xiaojun // Proc. of the International Conf. on Measuring Technology and Mechatronics Automation. –IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 2009. –Vol. 01. –P. 105–108.

4. Key Technologies of Radar Signal Reconnaiassance Digital Receiver, Based on FPGA [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.china-papers.com

5. **Тутыгин, В.С.** Программа обнаружения и идентификации параметров дискретизированного ЛЧМ-сигнала [Текст] / В.С. Тутыгин, С.В. Шедов // Свид. Роспатента, гос. рег. № 2009615691 от 13.10.2009.

6. **Тутыгин, В.С.** Новые алгоритмы обнаружения и определения параметров зашумленных сигналов [Текст] / В.С. Тутыгин, С.В. Шедов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2009. –№ 5 (86). –С. 64–72.

7. **Тутыгин, В.С.** Программа оптимального обнаружения ЛЧМ-сигнала [Текст] / В.С. Тутыгин, С.В. Шедов // Свид. Роспатента, гос. рег. № 2010611782 от 28.05.2010.

8. **Тутыгин, В.С.** Новые адаптивные алгоритмы обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигналов [Текст] / В.С. Тутыгин, С.В. Шедов, А.В. Южаков // Цифровая обработка сигналов. –2011. –№ 1.

9. **Лаврова, О.Ю.** Возможности спутниковой радиолокации для решения задачи обнаружения судов [Электронный ресурс] / О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, С.С. Щербак // Режим доступа: http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol2-106-112.pdf

УДК 004.942

А.Н. Скворцов

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ LVDS ПЕРЕДАТЧИКОВ

Возрастающая сложность современных электронных устройств и повышение их быстродействия требует организации разнообразных высокоскоростных каналов передачи данных между

блоками системы. Кроме того, увеличивается плотность размещения отдельных компонентов системы за счет уменьшения геометрических размеров транзисторов КМОП технологий, что приводит к необходимости минимизации энергопотребления. Уменьшить потребляемую энергию можно за счет использования эффективных интерфейсов передачи данных. Международный стандарт передачи дифференциальных сигналов LVDS (ANSI/TIA/EIA-644) наиболее хорошо приспособлен для организации высокоскоростных каналов передачи данных с минимальными энергетическими затратами. За счет использования дифференциальных сигналов стандарт обладает высокой помехозащищенностью. Существуют различные схемные реализации передатчиков сигналов стандарта LVDS, обеспечивающие передачу данных с разными максимальными скоростями и с разным энергопотреблением. Данная статья посвящена сравнению основных принципов формирования сигналов стандарта LVDS с точки зрения энергетической эффективности.

Анализ публикаций, посвященных вопросам проектирования передатчиков сигналов стандарта LVDS, показывает, что существуют три основных принципа формирования выходных сигналов [1]: без форсирования переходных процессов [2], с использованием статического форсирования [3] и с использованием динамического форсирования [4–7]. Также возможна комбинация второго и третьего способов форсирования. В настоящей статье рассматриваются возможности повышения частоты передаваемого сигнала в рамках каждого из трех принципов и изучаются связи энергопотребления и частоты работы передатчика.

Сигнал стандарта LVDS [8] характеризуется амплитудой дифференциального сигнала U_{OD} = 350 мВ, смещением центральной точки сигнала относительно нуля (уровнем синфазного сигнала) U_{OS} = 1,2 В и номиналом терминирующего резистора R_T = 100 Ом. Время переключения должно измеряться по уровням 20 и 80 % от диапазона изменения и составлять не более 30 % от битового интервала (T_{UI}). Типовая схема LVDS передатчика [1] приведена на рис 1. Следствием приведенных выше требований стандарта является то, что в установившемся режиме ток, протекающий через терминирующий резистор I_0, равен ± 3,5 мА.

Реализация принципа формирования выходных сигналов LVDS *без форсирования* переходных процессов состоит в том, что в передатчике, изображенном на рис. 1, номиналы источников тока *I*1, *I*2 не меняются во времени и составля-

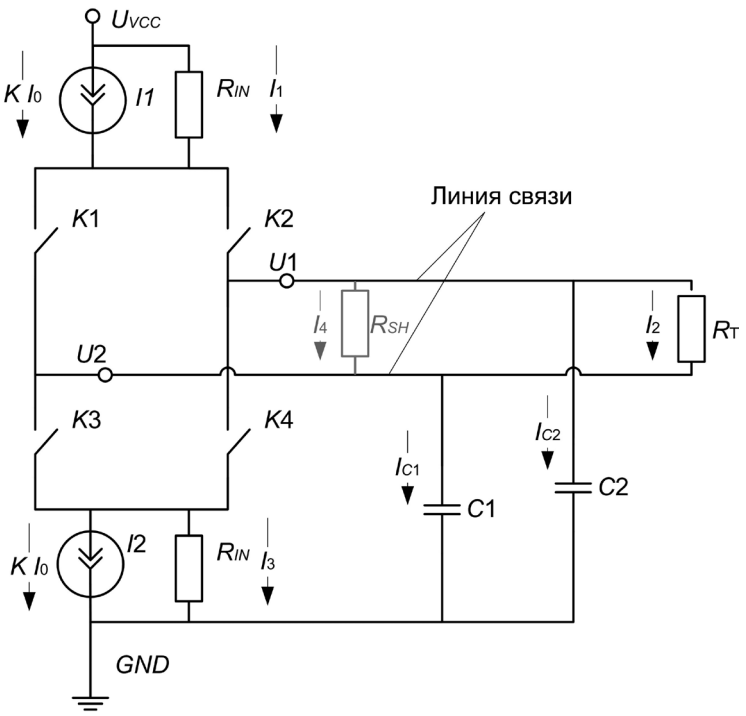


Рис. 1. Классическая структурная схема LVDS передатчика

ют величину I_0, шунтирующий резистор R_{SH} не используется. Рассмотрим процессы, происходящие при переключении выходного сигнала из состояния низкого потенциала (U_{OL}) в состояние высокого потенциала (U_{OH}). Пренебрежем переходными процессами, происходящими в ключах K1–K4. В этом случае причиной ограниченной скорости переключения являются суммарная емкостная нагрузка выходов передатчика, складывающаяся из паразитных емкостей контактных площадок кристаллов приемника и передатчика, проводников, связывающих кристаллы с внешними выводами микросхемы, и емкости внешних соединительных проводников.

Потенциалы и токи в схеме передатчика связаны системой уравнений (1):

$$\begin{cases} I_0 + I_1 = I_2 + I_{C1} \\ I_2 = I_0 + I_3 + I_{C2} \\ I_{C1} = C_1 \dfrac{dU_1(t)}{dt} \\ I_{C2} = C_2 \dfrac{dU_2(t)}{dt} \\ I_1 = \dfrac{U_{VCC} - U_1}{R_{IN}} \\ I_2 = \dfrac{U_1 - U_2}{R_T} \\ I_3 = \dfrac{U_2}{R_{IN}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_0 + \dfrac{U_{VCC} - U_1}{R_{IN}} = \dfrac{U_1 - U_2}{R_T} + C_1 \dfrac{dU_2(t)}{dt} \\ \dfrac{U_1 - U_2}{R_T} = C_1 \dfrac{dU_2(t)}{dt} + I_0 + \dfrac{U_2}{R_{IN}} \end{cases} \quad (1)$$

Решим систему (1) с начальными условиями (2), полагая, что $C_1 = C_2 = C$ и что внутреннее сопротивление источников тока R_{IN} много больше номинала R_T:

$$U_1(0) = \frac{1}{2}(U_{VCC} - U_{OD}); \quad U_2(0) = \frac{1}{2}(U_{VCC} + U_{OD}), \quad (2)$$

$$\begin{cases} U_1(t) = -I_0 \cdot R_T \cdot e^{\frac{-2 \cdot t}{C \cdot R_T}} + \dfrac{I_0 \cdot R_T}{2} + \dfrac{U_{VCC}}{2}; \\ U_2(t) = I_0 \cdot R_T \cdot e^{\frac{-2 \cdot t}{C \cdot R_T}} - \dfrac{I_0 \cdot R_T}{2} + \dfrac{U_{VCC}}{2}. \end{cases} \quad (3)$$

Отсюда получим выражение для дифференциального выходного сигнала (4):

$$U_{OD} = U_1 - U_2 = I_0 \cdot R_T - 2 \cdot I_0 \cdot R_T \cdot e^{\frac{-2 \cdot t}{C \cdot R_T}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) могут быть выведены длительность переходных процессов $T_F^{(1)}$для уровней 0,2 и 0,8 от диапазона переключения, минимальный битовый интервал $T_{UI}^{(1)}$ и соответствующая ему максимальная частота переключения выходного сигнала $F_{\text{MAX}}^{(1)} = 1 / T_{UI}^{(1)}$:

$$T_F^{(1)} = 0,69 \cdot c \cdot R_T; \; T_{UI}^{(1)} = 2,3 \cdot C \cdot R_T; \quad F_{\text{MAX}}^{(1)} = 1 / 2,3 \cdot C \cdot R_T. \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует, что предельная скорость передачи данных передатчиком с рассматриваемой структурой определяется величиной суммарной емкости нагрузки и номиналом терминирующего резистора. Например, для линии связи емкостью 10 пФ она составит 435 Мбит/с.

Основной недостаток классической структуры LVDS передатчика состоит в том, что его быстродействие принципиально ограничено суммарной (паразитной) емкостью используемых элементов системы и фиксированным значением терминирующего резистора 100 Ом.

Увеличить максимальную передачу можно введением дополнительного шунтирующего резистора R_{SH} на стороне передатчика, снижающего постоянную времени перезаряда емкостной нагрузки. Введение шунтирующего резистора требует увеличения номинальных токов источников *I*1, *I*2. Увеличенный номинальный ток позволяет быстрее выполнять перезаряд паразитных конденсаторов при переключении. Такой способ повышения быстродействия назовем *статическим форсированием*, поскольку величина дополнительного (форсирующего тока) не меняется во времени. Номинал шунтирующего резистора связан с коэффициентом увеличения номинального тока *K* формулой (6):

$$R_{SH} = \frac{U_{OD}}{(K-1)\cdot I_0}. \quad (6)$$

Повторив расчеты, описываемые уравнениями (1–4) для рассматриваемой модификации структуры, получим зависимость дифференциального выходного сигнала U_{OD} от времени:

$$U_{OD}(t) = I_0 \cdot R_T - 2 \cdot I_0 \cdot R_T \cdot e^{\frac{-2\cdot t\cdot K}{C\cdot R_T}}. \quad (7)$$

Минимальный битовый интервал и максимальная частота переключения выходного сигнала составят:

$$T_{UI}^{(2)} = \frac{2,3}{K}\cdot C\cdot R_T;\ F_{\text{MAX}}^{(2)} = \frac{K}{2,3\cdot C\cdot R_T}. \quad (8)$$

Следует отметить, что приведенные формулы справедливы для $K > 1$, а случай $K = 1$ соответствует передатчику без форсирования переходных процессов, рассмотренному выше. Для суммарной емкостной нагрузки 10 пФ при форсировании током, равным номинальному ($K = 2$), максимальная скорость передачи составит 870 Мбит/с, а при форсировании двойным током ($K = 3$) – 1,3 Гбит/с. Таким образом, передатчик со статическим форсированием позволяет повысить максимальную частоту передачи, но ценой значительного увеличения энергопотребления.

Обеспечить повышение частоты передачи с меньшими дополнительными затратами энергии можно с помощью использования принципа динамического форсирования переходных процессов. Он состоит в том, что ток, протекающий через источники *I*1 и *I*2, увеличивается только в моменты переключения выходных сигналов, а в остальное время он остается таким же, как и в классической структуре (I_0). Такой подход к управлению источниками позволяет объединить преимущество статического форсирования – быстроту переключения и классической структуры – низкое энергопотребление.

Дифференциальное уравнение описывает зависимость выходных сигналов передатчика с динамическим форсированием от времени:

$$\begin{cases} \dfrac{dU_1(t)}{dt} = \dfrac{(I_0 + I_F(t))\cdot R_T + 2\cdot(U_{OS} - U_1(t))}{C\cdot R_T} \\ \dfrac{dU_2(t)}{dt} = \dfrac{-(I_0 + I_F(t))\cdot R_T + 2\cdot(U_{OS} - U_2(t))}{C\cdot R_T}, \end{cases} \quad (9)$$

где $I_F(t)$ – ток форсирования, меняющийся во времени произвольным образом.

Решив уравнения (9) с начальными условиями $U_1(0) = U_{OH}$; $U_2(0) = U_{OL}$, получим выражение для выходного дифференциального сигнала $U_{OD} = U_2 - U_1$:

$$U_{OD}(t) = I_0 \cdot R_T - 2\cdot I_0 \cdot R_T \cdot e^{\frac{-2\cdot t}{C\cdot R_T}} + \\ + \frac{2\cdot e^{\frac{-2\cdot t}{C\cdot R_T}}}{C} \cdot \int_0^t e^{\frac{2\cdot\tau}{C\cdot R_T}} \cdot I_F(\tau)\, d\tau. \quad (10)$$

Будем считать, что форсирование переключения осуществляется прямоугольным импульсом амплитудой I_F и длительностью, равной длительности процесса переключения выходных сигналов T_F. Тогда для времени $t < T_F$ дифференциальный выходной сигнал будет равен:

$$U_{OD}(t) = I_0 \cdot R_T - 2\cdot I_0 \cdot R_T \cdot e^{\frac{-2\cdot t}{C\cdot R_T}} + \\ + I_F \cdot R_T - I_F \cdot R_T \cdot e^{\frac{-2\cdot t}{C\cdot R_T}}. \quad (11)$$

Время начала и конца переходного процесса найдем, приравняв $U_{OD}(t)$ величинам $-0,6\cdot I_0\cdot R_T$ и $0,6\cdot I_0\cdot R_T$ (диапазон переключения составляет $2\cdot I_0\cdot R_T$). Из длительности переходных процессов следуют минимальный битовый интервал и максимальная частота передачи:

$$T_{\text{MIN}}^{(3)} = 1,66\cdot C\cdot R_T \times \\ \times\left[\ln\left(\frac{I_F + 1,6\cdot I_0}{I_F + 2\cdot I_0}\right) - \ln\left(\frac{I_F + 0,4\cdot I_0}{I_F + 2\cdot I_0}\right)\right] = \quad (12) \\ = 1,66\cdot C\cdot R_T \cdot \ln\left(\frac{I_F + 1,6\cdot I_0}{I_F + 0,4\cdot I_0}\right);$$

$$F_{\text{MAX}}^{(3)} = \frac{1}{1,66\cdot C\cdot R_T \cdot \ln\left(\dfrac{I_F + 1,6\cdot I_0}{I_F + 0,4\cdot I_0}\right)}. \quad (13)$$

Следует отметить, что приведенные формулы при условии $I_F = 0$ соответствуют передатчику без форсирования переходных процессов. Для емкостной нагрузки 10 пФ при форсировании током, равным номинальному (3,5 мА), максимальная скорость передачи составит 973 Мбит/с, а для тока, равного 7 мА – 1,49 Гбит/с.

Для сравнения энергетической эффективности принципов формирования сигналов стандарта LVDS рассмотрим энергию, потребляемую каждым из трех передатчиков при передаче одного бита информации $E_{BIT} = U_{VCC}\cdot I\cdot T_{UI}$. Интерес представляет зависимость этой величины от скорости передачи данных, представленная в графическом виде на рис. 2:

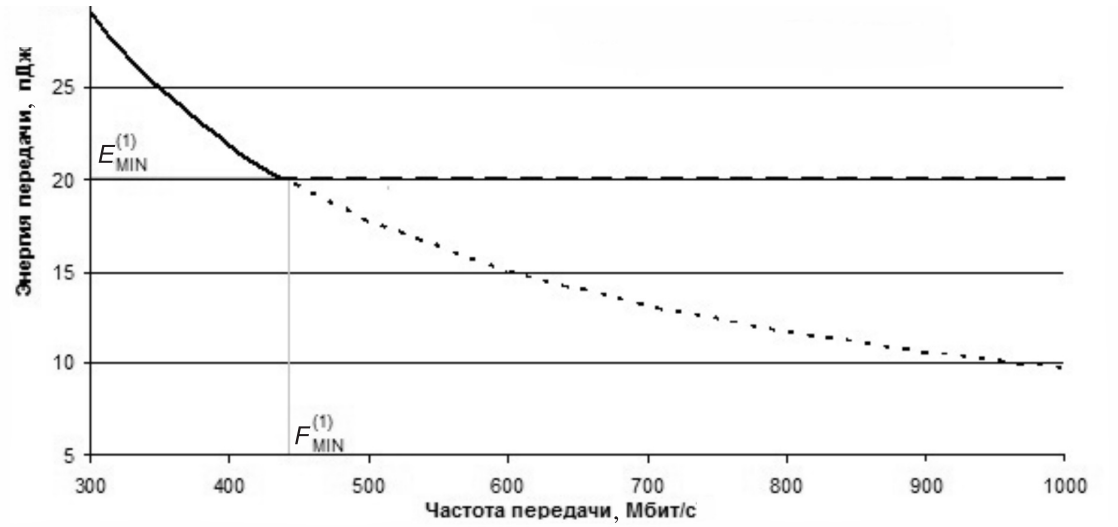


Рис. 2. Зависимость энергии, затрачиваемой на передачу бита информации, от частоты передачи (———) нет форсирования; (— —) статическое форсирование; (– – – –) динамическое форсирование

$$E_{BIT}(F) = \frac{1}{F} \cdot U_{VCC} \cdot (K \cdot I_0 + 0{,}3 \cdot I_F). \quad (14)$$

Из графика (рис. 2) следует, что энергия, затрачиваемая на передачу одного бита информации, для передатчиков без форсирования переходных процессов и с динамическим форсированием, уменьшается с ростом частоты передачи. Поэтому при проектировании систем, использующих интерфейсы стандарта LVDS, целесообразно повышать частоту их работы, насколько это позволяет технология СБИС. Передача информации пакетами на большей частоте с переводом передатчика в режим ожидания эффективнее с точки зрения энергетики, чем постоянная передача информации, но на меньшей частоте. Передатчик без форсирования переходных процессов всегда имеет граничную частоту передачи $F^{(1)}_{\text{MIN}}$, зависящую от величины суммарной емкостной нагрузки. Минимально достижимая энергия передачи одного бита информации в передатчиках такого класса $E^{(1)}_{\text{MIN}} = 2{,}3 \cdot I_0 \cdot U_{VCC} \cdot C \cdot R_T$. Для линии связи емкостью 10 пФ и напряжения питания 2,5 В минимальная энергия составляет 20 пДж.

Для повышения быстродействия передатчика может применяться статическое или динамическое форсирование переходных процессов. Применение этих методов целесообразно только в том случае, когда необходимо обеспечить частоту передачи выше $F^{(1)}_{\text{MIN}}$. Статическое форсирование реализуется более простыми схемотехническими приемами, но не позволяет уменьшить энергию, затрачиваемую на передачу бита информации.

Обеспечить энергопотребление меньше $E^{(1)}_{\text{MIN}}$ позволяет динамическое форсирование переходных процессов. В этом классе передатчиков минимальная теоретически достижимая энергия ограничена снизу величиной $E_{\text{MIN2}} = 0{,}6 \cdot I_0 \cdot U_{VCC} \cdot C \cdot R_T$. Чтобы получить эту оценку следует решить уравнение (13) относительно переменной I_F, подставить результат в формулу (14) и найти предел полученного выражения при $F \to \infty$. Из графика (см. рис. 2) видно, что передатчик с динамическим форсированием позволяет обеспечить меньшее, чем передатчик со статическим форсированием, энергопотребление при равной скорости передачи данных.

При проектировании передатчиков с динамическим форсированием важной задачей является расчет оптимальной величины форсирующего тока. При неточном выборе этого параметра не только увеличивается энергопотребление, но и возрастает максимальная амплитуда выходного сигнала. Рассмотренная в статье математическая модель позволяет рассчитать номинал и длительность форсирующего тока для обеспечения заданного быстродействия для заданного значения емкостной нагрузки. Для этого следует зафиксировать требуемую частоту передачи данных $F^{(3)}_{\text{MAX}}$ и разрешить уравнение (13) относительно I_F:

$$I_F = 0{,}4 \cdot I_0 \frac{4 - e^{\frac{0{,}6}{F_{\text{MAX}} \cdot C \cdot R_T}}}{e^{\frac{0{,}6}{F_{\text{MAX}} \cdot C \cdot R_T}} - 1}. \quad (15)$$

Полученные теоретические оценки для предельной частоты работы и минимально дости-

жимой энергии передачи одного бита информации позволяют определить границы применения трех основных принципов построения LVDS передатчиков. Рассмотренная математическая модель может использоваться на системотехническом уровне проектирования систем обработки данных для быстрой оценки необходимых энергетических ресурсов в зависимости от выбранной частоты передачи данных и их разрядности. Модель позволяет на ранних этапах проектирования выполнить ранжирование конкурирующих структур, упростив тем самым поиск эффективного решения задачи структурного синтеза. Полученное соотношение для расчета оптимального номинала форсирующего тока при заданных требованиях к скорости работы передатчика может применяться в инженерных расчетах при проектировании конкретных реализаций передатчиков.

Результаты работы имеют как научную, так и практическую ценность и будут использованы в качестве теоретического базиса при исследовании схемотехнических особенностей построения LVDS передатчиков, а также в исследовании вопроса выбора оптимальной формы форсирующего импульса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chen, M.** Low-voltage low-power LVDS drivers [Text] / M. Chen, J. Silva-Martinez, M. Nix [et al.] // IEEE J. of Solid-State Circuits. –2005. –Vol. 40. –№ 2. –P. 472–479.

2. **Michimasa Yamaguchi.** LVDS driver circuit and driver circuit [Текст] / Yamaguchi Michimasa // Пат. 7038502 США, H03K 3/00 от 29.09.04.

3. **Boni, A.** LVDS I/O Interface for Gb/s-per-Pin Operation in 0.35-um CMOS [Text] / A. Boni, A. Pierazzi, D. Vecchi // IEEE J. of solid state circuits. –2001. –Vol. 36. –№ 4. –P. 706–711.

4. **Kim, S.** A 6-Gbps/pin half-duplex LVDS I/O for high-speed mobile DRAM [Text] / S. Kim, B. Kong, C. Lee // Asian Solid-State Circuits Conf. –Nov. 2005. –P. 53–56.

5. **Chien-Chung, Chen.** Low voltage differential signaling transmitter and transmitting method [Text] / Chen Chien-Chung // Пат. 7579874 США, H03K 17/16 от 18.02.05.

6. **Kim, Ju-Hyung.** Pre emphasis apparatus, low voltage differential signaling transmitter including the same and pre emphasis method [Text] / Ju-Hyung Kim, Yonginsi // Пат. 7586330 США, H03K 19/0175 от 11.08.06.

7. **Балтруков, Н.Н.** Передатчик дифференциальных сигналов стандарта LVDS [Текст] / Н.Н. Балтруков, Ю.И. Лыпарь, А.Н. Скворцов // Пат. 107430 Россия, H03K 17/04 от 21.02.11.

8. LVDS owner's manual, Low voltage Differential Signalling [Электронный ресурс] / 3 ed. National Semiconductors, 2004 // Режим доступа: http://www.ece.unh.edu/courses/ece711/ refrense_material/ownersmanual.pdf

УДК 004.3, 004.436.2

С.Л. Максименко

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РЕИНЖИНИРИНГ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ HDL-СПЕЦИФИКАЦИЙ

Постановка задачи создания средств реинжиниринга

Современная практика проектирования цифровых устройств основывается на широком применении повторного использования кода. Данный подход позволяет разработчикам сконцентрировать большее внимание на архитектурных вопросах проектирования, а не на реализации отдельных элементов архитектуры. Как правило, повторно используемый код представляется в виде набора компонентов (IP-ядер), реализующих отдельные функциональные преобразователи либо целые узлы и устройства вычислительной системы, такие, как процессорные ядра, контроллеры ввода-вывода и т. п.

Средства автоматизации проектирования систем на кристалле явно предполагают использование библиотек компонентов с унифицированными интерфейсами.

Разработчики и «пользователи» компонентов, как правило, различные лица, внутреннее устройство компонентов обычно не документировано, в ряде случаев применяются средства криптографической защиты кода или его обфускация. Поэтому внесение изменений в готовые компоненты зачастую невозможно или чрезмерно трудоемко.

Вместе с тем актуальной является задача модификации компонентов системы без изменения их основной функциональности. Наиболее очевидны преобразования, цель которых – повышение надежности системы:

внесение структурной избыточности (резервирование элементов) на различных уровнях иерархии;

замена компонентов отказоустойчивыми аналогами;

встраивание средств самотестирования, самодиагностики и восстановления после сбоев.

Можно выделить и преобразования, направленные на увеличение производительности:

автоматизированная конвейеризация вычислений;

замена элементов структур платформенно-оптимизированными аналогами.

Решение перечисленных задач вручную трудоемко и может привести к появлению ошибок в ранее отлаженных модулях, поэтому данная процедура требует автоматизации.

Выполнение преобразований часто требует предварительного анализа, который также имеет смысл автоматизировать. Приведем примеры таких задач:

анализ надежности устройства, поиск «слабых мест», критически влияющих на надежность;

выбор оптимальной декомпозиции при структурном резервировании, выбор оптимального уровня резервирования;

поиск структурных шаблонов, т. е. фрагментов структур, которые можно заменить отказоустойчивыми или оптимизированными модулями.

В настоящее время существует ряд программных средств, решающих отдельные «фрагменты» поставленной задачи. Данные средства можно разделить на два типа. Средства первого [1, 2] типа обычно ориентированы на преобразование языковых конструкций, решая в первую очередь задачи рефакторинга исходного кода. Однако в работе [6] описано средство, решающее задачи реинжиниринга на уровне модификации элементов VHDL-описания RTL-уровня, позволяющее заменять элементы устройства отказоустойчивыми структурами, встраивать средства имитации отказов. Указывается, что средство, созданное при поддержке аэрокосмического подразделения фирмы Alcatel, доведено как минимум до состояния прототипа и опробовано на реальных проектах.

Средства второго типа [3–5] оперируют элементами структуры устройства после выполнения логического синтеза, решая задачи, входящие в состав перечисленных. Так, Xilinx TMRTool [3] выполняет замену триггеров в устройстве на структуры из трех триггеров с обратными связями, устойчивые к отказам типа SEU и SET. Mentor Graphics Precision Rad-Tolerant [4] предлагает средства троирования элементов и отказоустойчивого кодирования конечных автоматов. Некоторая попытка извлечения структурной модели из нетлистов сделана в работе [5], хотя информация об ее успешном завершении отсутствует.

Указанные средства направлены на решение частных задач и являются закрытыми, не предоставляя возможности расширять состав методов анализа и трансформации. Таким образом, поставленная выше задача реинжиниринга в настоящий момент не решена.

Разработка методики реинжиниринга

Разработка методики и инструментальных средств автоматизированного реинжиниринга включает следующие задачи.

1. Выявление видов преобразований, реализующих перечисленные выше задачи, и составление базиса элементарных преобразований (операций), к которым они сводятся.

2. Построение структурной модели, над которой можно выполнять преобразования и анализ. Существует два ключевых требования к модели: она должна автоматически строиться по исходному HDL-коду и по ней должен автоматически строиться исходный код без потери первоначальной функциональности (возможно, с добавлением новой).

3. Определение метода интеграции средств, выполняющих преобразования, в цикл проектирования с использованием существующих САПР.

4. Разработка программных средств, реализующих построение модели, генерацию исходного кода, базовые операции преобразований и анализа. Должен быть разработан язык, позволяющий описывать сложные преобразования на основе базовых операций, реализована интерпретация данного языка.

Необходимым условием успешного применения средств автоматизации реинжиниринга является то, что они должны использоваться в рамках маршрута проектирования имеющихся САПР, т. е. совместно с существующими средствами логического синтеза, разводки, анализа и моделирования. Для того чтобы выполнить условие, необходимо проанализировать информационные потоки в САПР и определить, на каком этапе лучше всего выполнять преобразования.

Современные языки описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemC) позволяют в рамках описания одного модуля сочетать структурное и поведенческое описание. При структурном описании разработчик явно указывает используемые компоненты и связи между ними. При поведенческом описании САПР сама синтезирует структуру, реализующую указанное поведение. При этом порождаемая структура зависит от заложенных в САПР алгоритмов и ее настроек. Настоящее исследование предполагает преобразование структур с сохранением поведения, поэтому поведенческое описание само по себе непригодно для рассматриваемых методов реинжиниринга. Следует сделать оговорку: по поведенческому описанию можно построить структурное, что и делают САПР в ходе логического синтеза, но данная операция слишком сложна, чтобы ее рассматривать в рамках данного исследования.

Учитывая сказанное выше, ограничимся обработкой чисто структурных описаний. Проблема общности подхода решается просто: все основные САПР имеют возможность экспорта результата логического синтеза в виде «нетлиста», т. е. файла, содержащего структурное описание устройства на уровне элементарных преобразователей (логических элементов). Более того, нетлист может порождаться на том же языке (VHDL), что и исходное описание, с сохранением иерархии компонентов.

На рис. 1 представлена схема взаимодействия средств реинжиниринга с системой проектирования на СБИС ПЛ Quartus II фирмы Altera. Из схемы видно, что средства реинжиниринга встраиваются в цепочку инструментов Quartus следующим образом. Сначала из исходного описания устройства порождается VHDL-нетлист. Далее выполняются преобразования, возможно, с использованием библиотеки дополнительных компонентов, включающей, например, модули тестирования, мониторинга, исправления ошибок. Преобразованный VHDL-код повторно подается на вход VHDL-компилятора, при этом может выполняться логический синтез новых компонентов. Результаты компиляции используются «штатным» образом: выполняется размещение элементов на кристалле, трассировка, извлечение временной модели и необходимый анализ.

Предлагаемая схема разомкнута. Она не предполагает использования кодов, полученных в результате реинжиниринга, разработчиками для дальнейшего развития. Данный выбор сделан по следующей причине: решение перечисленных задач реинжиниринга, в первую очередь, встраивание средств тестирования или повышения отказоустойчивости, значительно усложняет структуру устройства, что затрудняет его развитие и сопровождение. Предположим, что разработка и отладка устройства ведется независимо с использованием непреобразованных кодов, а применение автоматизированного реинжиниринга выполняется при каждой «сборке» проекта. Пример применения такого подхода – встраиваемый логический анализатор SignalTap из набора средств отладки пакета Quatrus II фирмы Altera. Разработчик оперирует исходным проектом, но при необходимости наблюдения за некоторыми сигналами в реальной микросхеме в проект прозрачно для него в ходе компиляции добавляются необходимые средства сбора информации.

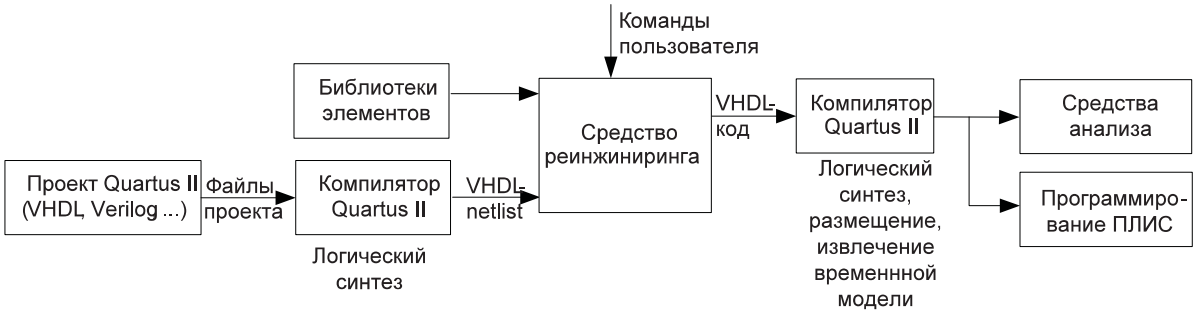


Рис. 1. Схема совместной работы программы и среды Quartus II

Для реализации преобразований предлагается методика, основные элементы которой представлены на рис. 2. Методика включает в себя следующие основные шаги.

Генерация структуры. На этом шаге с помощью существующих САПР из исходного проекта порождается структурное VHDL-описание с той или иной степенью выполнения логического синтеза. Это не обязательно сеть библиотечных примитивов в заданном элементном базисе. Главное требование – явное выделение всех компонентов и связей между ними. Состав компонентов может определять доступные преобразования.

Синтаксический разбор. По VHDL-описанию проекта строится абстрактное синтаксическое дерево в соответствии с грамматикой языка. При необходимости избыточные для последующего анализа поддеревья сворачиваются в узлы. Дерево содержит всю информацию об исходном коде, и по нему исходный код может быть восстановлен с точностью до разметки. Само по себе дерево не содержит информации об иерархии проекта: оно лишь содержит описания каждого компонента, которые нужно связать между собой.

Преобразования могут включать в себя добавление в проект дополнительных модулей. Они также представляются в виде VHDL-описаний. Но, поскольку их код не подлежит преобразованиям, нет необходимости в анализе их устройства. Достаточно проанализировать их интерфейс.

Извлечение иерархической структуры. На этом этапе из синтаксического дерева извлекается информация обо всех имеющихся в проекте компонентах, их интерфейсах, внутреннем устройстве и вложенности. Строится иерархическая модель устройства, сохраняющая ссылки на синтаксическое дерево.

Существуют два подхода к выполнению преобразований. В первом случае каждое структурное преобразование модели, например, добавление подкомпонента вызывает соответствующую трансформацию синтаксического дерева. По итогам преобразования синтаксическое дерево формально транслируется в HDL-описание.

Рис. 2. Методика автоматизированного реинжиниринга

Данный подход позволяет получить на выходе HDL-описание, максимально приближенное к исходному.

Во втором случае синтаксическое дерево используется только для построения модели, из которой непосредственно генерируется выходной код. Последний вариант позволяет сделать модель независимой от языка исходного описания, значительно упростив структуру модели и реализацию операций над ней.

В настоящей работе выбран второй вариант, поскольку не предполагается использование выходного кода человеком.

Интерпретация сценариев преобразования. Каждое преобразование описывается как набор элементарных преобразований над моделью. Набор элементарных преобразований может расширяться в процессе анализа задач реинжиниринга. Поэтому имеет смысл говорить о создании расширяемой библиотеки элементарных преобразований. Сами преобразования задаются в виде сценариев на языке, оперирующем элементарными преобразованиями. Собственно сам язык преобразований определяется набором элементарных операций над моделью и порядком их применения, а в качестве текстовой формы записи преобразований может быть использовано расширение некоторого интерпретируемого объектно-ориентированного языка, например, Python.

Генерация и последующая обработка VHDL-кода. Данная процедура достаточно проста и заключается в генерации для каждого компонента и связи в модели соответствующей языковой конструкции. Последующая обработка включает те же шаги, которые выполнялись бы над исходным проектом до преобразования: логический синтез, размещение на кристалле, извлечение временных и других характеристик, формирование файлов для программирования СБИС ПЛ или изготовления БМК.

Структура модели

Проведенные эксперименты показали, что описывать преобразования в терминах модели, основанной на языковых конструкциях HDL, по ряду причин крайне неудобно. Предлагаем полностью абстрагироваться от синтаксиса VHDL и представлять устройство в виде иерархической древовидной структуры. При этом элементы структуры могут сохранять ссылки на исходное синтаксическое дерево для упрощения последующей генерации HDL-кода.

Основным элементом структуры является *компонент*. Компонент представляет элемент структуры устройства, имеющий набор портов ввода-вывода и, возможно, некоторую внутреннюю структуру. Структура компонента представляет собой сеть соединений между портами данного компонента и портами вложенных компонентов, включая связи портов вложенных компонентов между собой.

Отдельная проблема при описании связей внутри компонента – использование сигналов составных типов: массивов и структур. Если порт имеет составной тип, то отдельные его элементы могут иметь различную коммутацию внутри компонента. Поэтому при задании связи между портами могут дополнительно указываться связанные элементы составного типа.

Устройство может содержать множество одинаковых компонентов. Имеет смысл ввести понятие «тип компонента». Все компоненты одного типа имеют одинаковый набор портов и одинаковую структуру. Введение типов не только позволяет сделать представление устройства более компактным, но и позволяет при реинжиниринге учитывать свойства данного типа, явно не заданные структурой: функциональные свойства, параметры надежности, быстродействия и т. п. Более того, типичные задачи реинжиниринга требуют выполнения одних и тех же преобразований над всеми экземплярами компонента одного типа. Примером может служить замена элемента памяти отказоустойчивым аналогом. Если требуется над некоторым экземпляром данного типа выполнить особое преобразование, для него необходимо завести новый тип, «клонировав» существующий.

На нижнем уровне вложенности находятся компоненты, структура которых не определена. Элементы с неопределенной структурой применяются в двух случаях. В первом случае компонент является элементом одной из подключаемых библиотек: это может быть примитив логического синтеза или некоторый функциональный модуль, структура которого не участвует в реинжиниринге. Во втором случае речь идет о вспомогательных компонентах, для которых задано их поведенческое описание. Наличие поведенческого описания не противоречит поставленному ранее ограничению. Компоненты с поведенческим

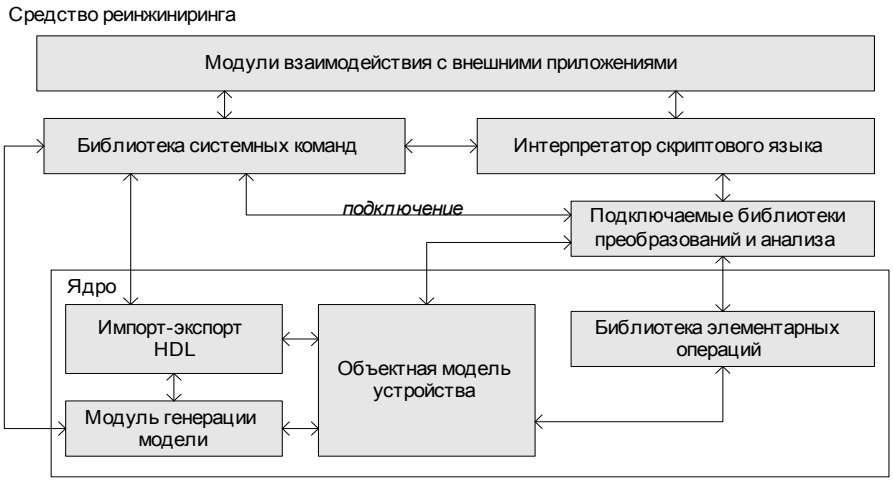


Рис. 3. Архитектура средства реинжиниринга

описанием в рамках данного подхода просто не подвергаются реинжинирингу «по частям». Они включаются в устройство или изымаются из него только целиком.

Существует три причины использования таких компонентов. Во-первых, они могут неявно порождаться существующими САПР при логическом синтезе. Это происходит, когда в нетлисте присутствуют логические операции над сигналами. Во-вторых, подобные компоненты удобно порождать для решения некоторых задач реинжиниринга, например, объединять по «ИЛИ» сигналы об ошибке, выработанные элементами голосования. Форма представления поведения неважна для данной модели, главное, чтобы по этому представлению можно было сгенерировать синтезируемое HDL-описание. И, в-третьих, для оперирования составными типами иногда удобно использовать компонент с единственным портом данного типа, реализующий понятие signal в VHDL.

Инструментальные средства реинжиниринга

Для практического применения предложенной методики реинжиниринга в настоящее время ведется разработка программных средств. Основные идеи опробованы на макете, в основу которого лег VHDL-парсер собственной разработки. Схема интеграции макета в цикл разработки представлена на рис. 1. Основными требованиями к архитектуре разрабатываемого программного средства (рис. 3) стали открытость и расширяемость. Изначально закладывается возможность работы с VHDL-нетлистами и генерация VHDL-кода. Тем не менее, архитектура средства и языковая независимость модели устройства предполагают возможность использования других языков.

Расширяемость предполагается не только по составу языков ввода-вывода, но и по составу процедур преобразования и анализа. Для этого в архитектуре выделено ядро, выполняющее построение модели устройства, элементарные операции над моделью и экспорт HDL-кода. Ядро предоставляет программный доступ к объектной модели устройства и к библиотеке элементарных операций, что позволяет строить произвольные процедуры преобразования и анализа.

Управление средством реинжиниринга ведется посредством интерпретации набора команд, состав которых определяется набором подключенных библиотек. Данное решение позволяет выполнять цикл преобразований в «пакетном» режиме и прозрачно интегрировать средства реинжиниринга в цикл проектирования существующих САПР.

Предложен новый подход к автоматизации реинжиниринга цифровых устройств, основанный на использовании структурной модели, независимой от языка описания. Реализация данного подхода позволит автоматизировать решение таких задач, как синтез отказоустойчивых структур, оптимизация производительности, перевод проекта на другой элементный базис, встраивание средств тестирования и диагностики и многих др. Показан способ интеграции средств реинжиниринга с существующими САПР, опробованный на реальных проектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The DMS Software Reengineering Toolkit [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.semdesigns.com/Products/DMS/DMSToolkit.html

2. Sigasi HDT [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.sigisi.com

3. Xilinx TMRTool [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.xilinx.com/ise/optional_prod/tmrtool.htm

4. Mentor Graphics Precision Rad-Tolerant [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.mentor.com/precision

5. Bhaduri, Debayan. An Automated Reliability Enhancement Tool for Defect-Tolerance [Электронный ресурс] / Debayan Bhaduri, Deepak A. Mathaikutty, Sandeep Shukla // Technical Report № 2004-16. –Режим доступа: http://fermat.ece.vt.edu/Publications/pubs/techrep

6. **Berrojo, L.** An industrial environment for high-level fault-tolerant structures insertion and validation [Text] / L. Berrojo, F.Corno, L.Entrena [et al.] // VLSI Test Symp. (VTS 2002). Proc. 20th IEEE. –2002. –P. 229–236.

УДК 681.514

Н.И. Беляева, А.Д. Курмашев

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТУРНЫХ РЕЖИМОВ ДВУХКООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ДВИЖЕНИЯ

Актуальность работы. Основная задача, стоящая перед промышленностью, – повышение производительности труда и качества выпускаемой продукции. Производительность труда повышается интенсификацией технологического процесса за счет увеличения рабочих скоростей перемещения исполнительных органов. Но это приводит к резкому возрастанию динамических ошибок следящих приводов, а, значит, ошибок воспроизведения заданных программных траекторий, что, в конечном счете, отражается на качестве выпускаемой продукции.

Таким образом, задача повышения качества продукции и производительности труда сводится к задаче повышения динамической точности контурных систем числового программного управления при повышении скорости перемещения исполнительных органов металлорежущих станков и промышленных роботов. Решение задачи предлагается искать на основе алгоритмов согласованного управления электроприводами исполнительных органов многокоординатных технологических объектов.

В данной статье изучается синтез базового алгоритма согласованного управления электроприводами степеней подвижности двухкоординатной системы воспроизведения программных траекторий (СВПД), построение модели СВПД в программном пакете MatLab и исследование ее контурных режимов.

Синтез базового алгоритма управления двухкоординатной системой осуществляется при следующих условиях: воспроизводится плоская траектория – окружность радиуса R с постоянной скоростью V_k. Объект управления системы – два идентичных ортогональных привода координат x и y. Уравнение движения по каждой координате имеет вид:

$$L(*) = T^2 \frac{d^3(*)}{dt^3} + 2\xi T \frac{d^2(*)}{dt^2} + \frac{d(*)}{dt}, \qquad (1)$$

где (*) – это x или y, что соответствует математическому описанию разомкнутого по положению следящего привода координаты с математической моделью контура скорости, динамика которого аппроксимирована колебательным звеном. Тогда математическая модель двухкоординатной СВПД примет вид:

$$\begin{cases} L(x) = U_x, \\ L(y) = U_y, \end{cases} \qquad (2)$$

где U_x, U_y – управляющие воздействия, которые необходимо найти.

На основании метода функционального регулирования, разработанного В.М. Бойчуком [1], получены базовые алгоритмы управления СВПД следующего вида:

$$\begin{cases} U_x = U_x^{\tau} + U_x^{n} = \dfrac{V_k}{R} \cdot y + \varepsilon_k K_T \dfrac{x}{r}, \\ U_y = U_y^{\tau} + U_y^{n} = -\dfrac{V_k}{R} \cdot x + \varepsilon_k K_T \dfrac{y}{r}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь ε_k – контурная ошибка, r – действительный радиус воспроизводимой окружности.

Достоинство этого метода синтеза в том, что в результате синтеза получаем не только алгоритм, но и структуру системы управления: первые слагаемые алгоритма (3) обеспечивают движение вдоль траектории, а вторые – стабилизацию движения перпендикулярно к траектории, поэтому они названы *регулятором траектории* (РТ). Далее, внося коррективы в полученный РТ, можно улучшать качество системы. В нашем случае таким улучшением является замена пропорционального РТ (П-РТ) на пропорционально-интегральный (ПИ-РТ). А также использование нечеткого регулятора добротности приводов координат совместно с ПИ-РТ.

Моделирование двухкоординатной СВПД. В работе сравниваются свойства СВПД, структуры которых соответствуют параметрической и неявной форме математического описания траектории [2, 3].

Рассмотрим пример воспроизведения дуги центральной окружности радиусом R со скоростью V_k. На рис. 1 *а* представлена модель системы, соответствующая параметрической форме задания траектории [2, 3] (в дальнейшем – структура 1). В ней возбуждаются автоколебания вида

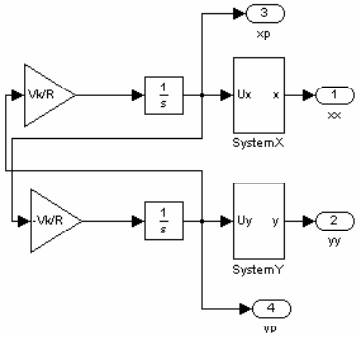
$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt} x = \omega_n \cdot y, \\ \dfrac{d}{dt} y = -\omega_n \cdot x, \quad \omega_n = \dfrac{V_k}{R}, \end{cases} \quad (4)$$

определяющие желаемое поведение координат:

$$\begin{cases} x_n(t) = R \cdot \cos\left(\dfrac{V_k}{R} \cdot t\right), \\ y_n(t) = -R \cdot \sin\left(\dfrac{V_k}{R} \cdot t\right). \end{cases} \quad (5)$$

Блоки System*X* и System*Y*, изображенные на рис. 1 *а*, являются цифровыми моделями следящих электроприводов; *xp*, *yp* – программные зна-

а)



б)

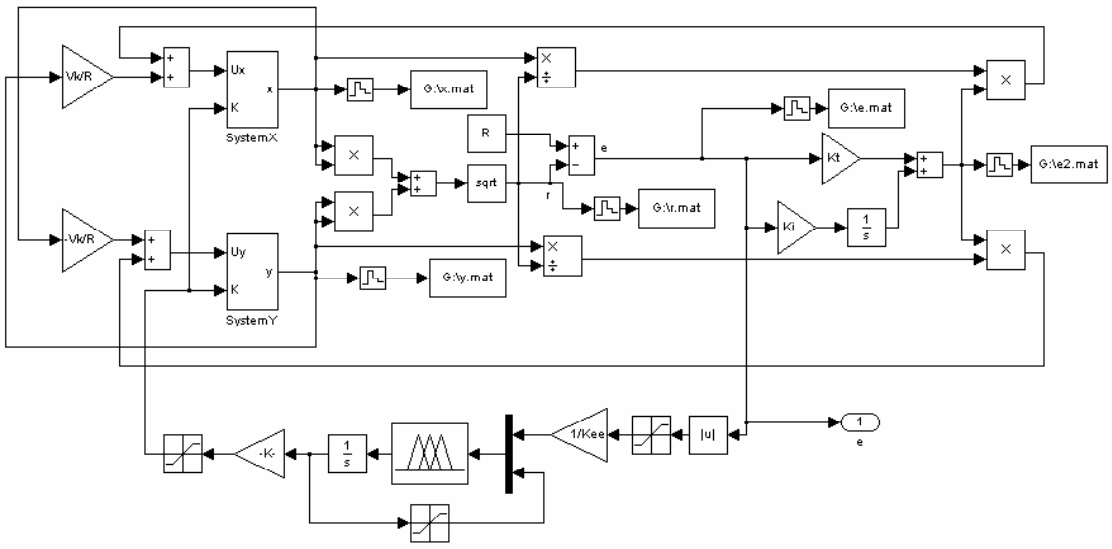


Рис. 1. Модель системы управления

чения координат, полученные от интерполятора положения на основе заданных значений контурной скорости V_k и радиуса окружности R.

В структуре 2, соответствующей неявной форме математического описания траектории, блоки System$X$ и System$Y$ являются цифровыми моделями разомкнутых электроприводов (рис. 1 *б*), в соответствие с моделью (1).

В структуре 2 пропорциональная (Kt) и интегральная (Ki) составляющие РТ подобраны экспериментальным путем. Исследовано несколько значений Kt, лучшие результаты получены при $Kt = 20\ 1/\text{с}$. Для ПИ-РТ интегральная составляющая принята $Ki = 200\ 1/\text{с}$.

Совместно с ПИ-РТ использован нечеткий регулятор добротности приводов координат. Настройка нечеткого регулятора добротности произведена на основании известных данных о том, как ведет себя система при различных значениях коэффициента передачи в контуре положения. Установлена взаимосвязь между значением коэффициента передачи контура положения и величиной контурной ошибки. Разработанный нечеткий регулятор добротности имеет две входные лингвистические переменные (величина ошибки регулирования и выходное значение нечеткого регулятора) и одну выходную лингвистическую переменную (коэффициент регулятора положения приводов координат).

Основные результаты. На основе воспроизведения окружности заданного радиуса произведено сравнение полученных моделей. Так как

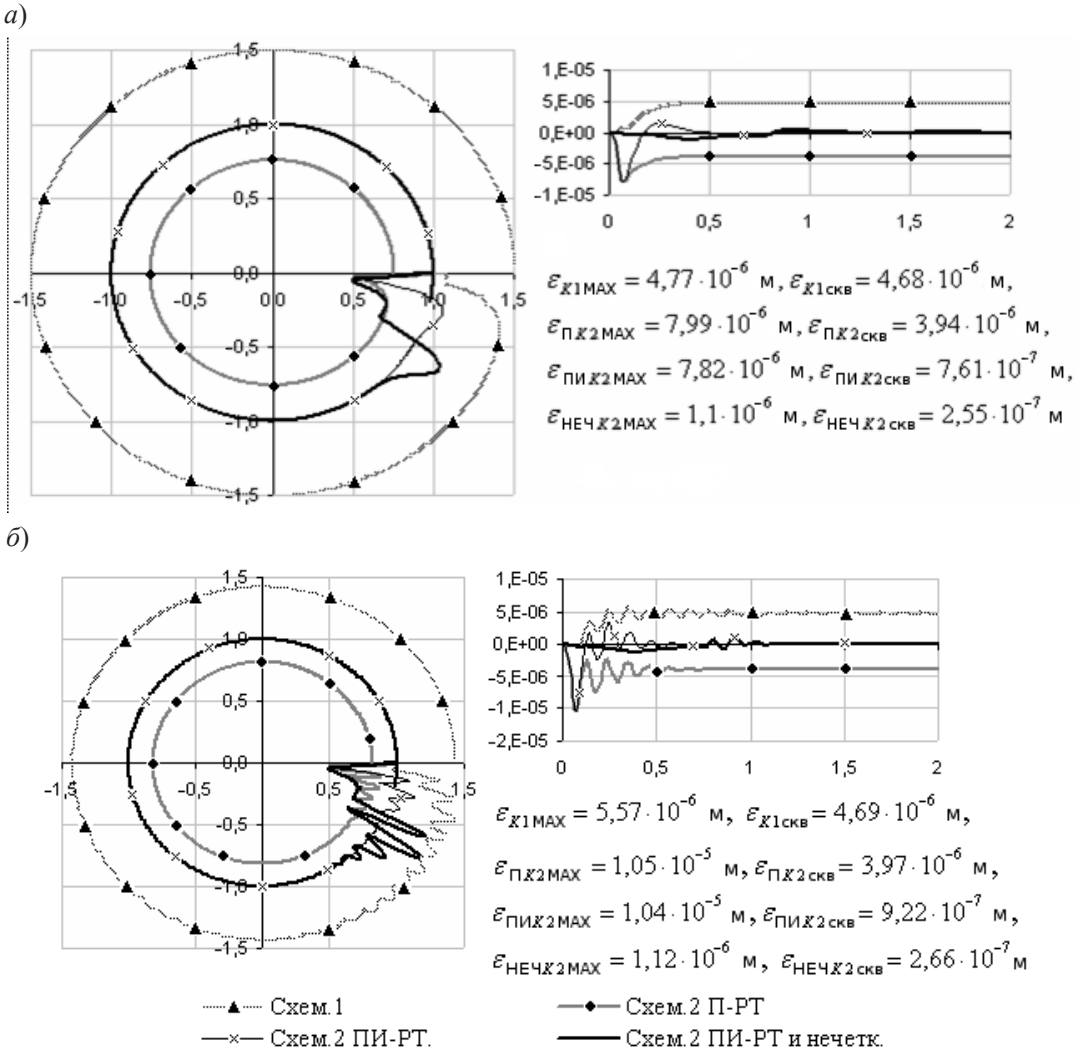


Рис. 2. Результаты моделирования:
а – идентичные приводы; *б* – изменение момента инерции двигателя $J_x = 3J_0$, $J_y = J_0$

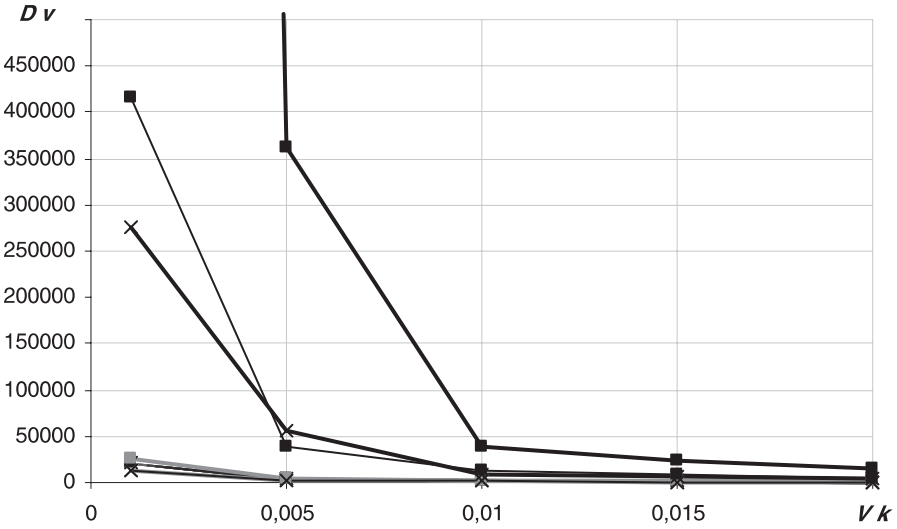


Рис. 3. Добротности по максимальным и среднеквадратичным ошибкам
(—×—) *D*max в структуре 1; (—■—) *D*скв в структуре 1;
(—×—) *D*max в структуре 2 (П); (—■—) *D*скв в структуре 2 (П);
(—×—) *D*max в структуре 2 (ПИ); (—■—) *D*скв в структуре 2 (ПИ);
(—×—) *D*max в структуре 2 (ПИ + НЕЧ); (—■—) *D*скв в структуре 2 (ПИ + НЕЧ)

значения контурной ошибки на несколько порядков меньше абсолютных перемещений, она представлена в нормированном виде. Такое представление ошибки дает возможность анализировать не только ее динамику, но и влияние параметров системы на форму воспроизводимой траектории.

Эксперименты проводились при заданном значении радиуса окружности, контурной скорости и различных значениях параметров приводов. Динамика воспроизведения окружности отражена на рис. 2. Сравнение СВПД осуществлялось также по критерию добротности воспроизведения траектории, под которой понимается отношение скорости воспроизведения траектории к контурной ошибке. На рис. 3 изображены добротности по максимальным и среднеквадратичным ошибкам при генерации окружности радиусом $R = 10$ мм и идентичных приводах.

В результате экспериментов выявлено, что система воспроизведения программного движения, соответствующая неявной форме математического описания траектории, с ПИ-регулятором траектории (ПИ-РТ) обладает лучшими показателями качества, чем с П-регулятором траектории (П-РТ) как при идентичных приводах, так и при изменении параметров привода координаты *X*. Применение ПИ-регулятора траектории позволяет устранить постоянную составляющую контурной ошибки, но практически не влияет на ее максимальное значение. Использование нечеткого регулятора добротности приводов координат совместно с ПИ-регулятором траектории позволяет уменьшить значение максимальной контурной ошибки и увеличить добротность воспроизведения траектории.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга в рамках гранта № 3.4/07-06/078.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бойчук, Л.М.** Метод структурного синтеза нелинейных систем автоматического управления [Текст]/ Л.М. Бойчук. –М.: Энергия, 1971. –113 с.

2. **Беляев А.Н.** Микропроцессорное управление программным движением взаимосвязанных электроприводов [Текст] / А.Н. Беляев, А.Д. Курмашев, О.А. Соколов // Тезисы докладов XII Всесоюзной науч.-техн. конф. по проблемам автоматизированного электропривода. –Воронеж, 15-17 сент. 1987. –С. 45–47.

3. **Беляев, А.Н.** Замкнутые системы ЧПУ технологическим оборудованием [Текст] / А.Н. Беляев, О.А. Соколов // Межвуз. сб.: Вычислительные, управляющие и измерительные системы. –Л.: ЛПИ, 1987. –С. 123–126.

УДК 681.3

М.И. Глухих, С.Л. Максименко, В.Ф. Мелехин, А.С. Филиппов

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Основные общетехнические показатели вычислительных систем (ВС) – производительность, стоимость и надежность. Показатель надежности наиболее трудно оценивать при синтезе и анализе, поскольку он зависит от большого числа факторов, многие из которых на этапе проектирования трудно оценить. В то же время от надежности зависят такие показатели систем, как качество, эффективность, безопасность, готовность, живучесть. Актуальность повышения надежности систем на этапе проектирования возрастает. Это объясняется, с одной стороны, возрастанием «цены отказа» системы, особенно в ряде специальных применений. С другой стороны, имеется ряд факторов, снижающих надежность системы. Здесь следует отметить постоянное возрастание сложности систем. Кроме того, по мере совершенствования технологии производства интегральных схем снижается энергия переключения вентиля и растет быстродействие. При этом элементы становятся все более чувствительными к воздействию элементарных частиц. Поток элементарных частиц даже при естественном фоне радиации становится весьма опасным для современных элементов, выполняемых по нанотехнологии и субмикронной технологии. Особенно это опасно при специальных применениях систем. Все это требует разработки методологии организации и проектирования ВС с учетом требований к надежности и, в частности, радиационной стойкости.

Проблема организации и проектирования высоконадежных систем связана с необходимостью выполнения большого числа противоречивых требований и учета большого числа разнородных факторов. При этом и требования, и факторы, ограничивающие возможности решений, а также средства и методы проектирования находятся в постоянном развитии. Поэтому рассматриваемая проблема относится к числу комплексных и сложных. При решении этой проблемы на передний план выдвигаются системотехнические и схемотехнические задачи, связанные с введением и использованием дополнительных функций, предназначенных именно для обеспечения безопасности и повышения надежности. Задачи анализа надежности и оценки ее показателей носят вспомогательный характер и рассматриваются как средство, позволяющее выбирать перспективное направление при синтезе системы.

Цель статьи – на основе обобщения полученного опыта и результатов исследований сформировать концептуальную модель организации и проектирования высоконадежных вычислительных систем.

Класс рассматриваемых систем. Требования к разрабатываемой методологии проектирования

Под высоконадежными будем понимать класс ВС, при организации и проектировании которых для повышения надежности использована структурная, информационная и временная избыточность. Повышение надежности системы заключается в увеличении времени непрерывного выполнения своих функций при наличии потока сбоев (восстанавливаемых отказов) и потока невосстанавливаемых отказов, а также в обеспечении требования безопасности.

Другой признак, по которому ограничим множество рассматриваемых систем, связан с назначением и условиями функционирования. Наиболее актуальна высокая надежность и безопасность ВС при их использовании для управления в технических системах. Такие системы, как правило, относятся к системам реального времени (СРВ).

Рассмотрим основные особенности процессов в таких системах. Процессы, связанные с получением информации о состоянии объекта, выполнением алгоритмов управления и формированием управляющих воздействий, циклически повторяются. Каждый цикл соответствует определенному кванту времени, предельно допустимое значение которого зависит от инерционности объекта

управления. При проектировании обеспечивается определенный временной запас в каждом цикле, что можно рассматривать как определенный ресурс временной избыточности.

Отказ ВС в СРВ может привести к аварии, если искаженная управляющая информация поступит на исполнительные органы в объекте управления. При организации и проектировании ВС необходимо учитывать требование безопасности системы, заключающееся в блокировке распространения отказа и исключении аварии. Для осуществления требования безопасности системы в ней непрерывно должны выполняться дополнительные функции контроля возникновения отказов и блокировки их распространения. Для этого при проектировании необходимо предусмотреть структурную избыточность.

Изучим архитектурные ограничения на класс рассматриваемых систем. В качестве основного прототипа при проектировании высоконадежных ВС рассмотрим наиболее распространенные в настоящее время ВС с магистрально-модульной организацией.

Информационную избыточность изучим применительно к проектированию устройств основной памяти и интерфейсов.

Технологические ограничения на класс рассматриваемых систем. Рассмотрим методологию проектирования в базисах FPGA/ASIC и систем на кристалле.

Как обязательное требование к методологии проектирования высоконадежных ВС примем возможность использования готовых выверенных решений наиболее распространенных и технологически освоенных средств и методов: IP модулей типовых процессоров (верифицированные HDL описания), типовых СБИС основной памяти, стандартных интерфейсов взаимодействия устройств и блоков.

Обязательное требование рассматриваемой методологии – возможность использования имеющихся развитых инструментальных средств автоматизированного проектирования:

Altera® QuartusII®; (FPGA Cyclone®, Stratix®);

Xilinx® ISE; (FPGA Spartan®; Virtex®);

Mentor Graphics PADS®; ModelSim®; MWO; P-SPICE®;

National Instruments LabView®;

MatLab/Simulink;

Cadence Virtuoso. Cadence GPDK.

Доменная организация структур вычислительных систем

В [1] исследованы подходы к синтезу структур высоконадежных ВС. В основу положены результаты анализа процессов распространения информационных отказов в ВС. Рассмотрены вопросы организации таких структур ВС, в которых блокируется распространение информационного отказа и обеспечивается работоспособность системы. Определен наиболее перспективный тип структур по комбинированному критерию надежности, безопасности и стоимости с учетом современного состояния технологий изготовления элементов и устройств. Такие структуры названы *доменными*. Домен – это блок, способный сдерживать процесс распространения отказов. Обоснован оптимальный состав домена с точки зрения надежности – набор независимых узлов домена с мажоритарным блоком на входе и древообразной структурой. Доказана возможность разделения структуры ВС на домены. Доменная структура обеспечивает маскирование возникающих сбоев и получение информации о сбоях и отказах. С использованием результатов, полученных в [1], проводились дальнейшие исследования, направленные на разработку методологии организации и проектирования таких систем.

Информационные отказы в ВС. Возможности восстановления

ВС представляет собой сеть логических элементов. Информационные процессы заключаются в формировании и распространении сигналов по сети. Информационный отказ (случайное изменение логического значения) может возникнуть как следствие искажения электрического уровня сигнала. Сигнал представлен уровнем напряжения. Под действием внешних факторов сигналы, распространяющиеся по сети, подвержены искажениям. Причиной может быть помеха в линии связи из-за электромагнитных, электростатических воздействий и помеха по цепям питания. Изменение сигнала может быть вызвано также изменением состояния вентиля в ЛЭ, например, из-за действия элементарных частиц на полупроводниковую структуру.

Из теории проектирования ВС известно, что наиболее защищенными от помех являются линии связи внутри кристалла интегральной схемы. Поэтому использование при проектировании систем

наиболее совершенных СБИС обеспечивает не только повышение быстродействия и уменьшение стоимости, но и повышение надежности. Однако по мере снижения проектной нормы при изготовлении СБИС и роста уровня интеграции уменьшается и энергия переключения вентилей [2]. Поэтому возрастает чувствительность ЛЭ к воздействию элементарных частиц, в частности, связанных с радиацией. При этом, судя по опубликованным результатам исследований, значительно чаще (в тысячи раз) происходит изменение информационного состояния ЛЭ (сбой), чем невосстановимый отказ элемента [3, 4].

Для изучения проблемы повышения надежности ВС существенно рассматривать возможности восстановления информационных отказов в процессе работы системы. Искажение сигнала, связанное с информационным отказом, приводит к нарушению хода вычислительного процесса, если это искажение фиксируется памятью. Это событие можно рассматривать как искажение функции перехода из одного состояния системы в другое. С таким представлением о потоке событий искажения вычислительного процесса при функционировании системы связана постановка двух задач, которые должны быть решены при проектировании отказоустойчивой ВС.

Первая задача – выявление и маскирование неправильного перехода из одного состояния в другое. Это возможно, если организовать параллельно протекающие дублирующие процессы с непрерывным контролем и управлением, зависящим от результатов контроля. Такой подход известен [5]. Требуется, как минимум, трехкратное резервирование и мажорирование результатов трех экземпляров вычислительных процессов.

Вторая задача – восстановление процесса, искаженного вследствие сбоя. Для осуществления этого имеются необходимые условия.

• Аппаратура, в которой протекает искаженный экземпляр процесса, исправна. Искажена только информация.

• Для восстановления искаженного экземпляра процесса есть ресурс времени. Это интервал времени, в течение которого с заданной вероятностью отказ не произойдет в «исправных» экземплярах процессов. Этот интервал можно оценивать с использованием известных в теории надежности методов.

• Имеется «запас» резервного времени «исправных» процессов в цикле работы, который можно использовать для выполнения исправными процессами дополнительной функции восстановления искаженного процесса (копирование состояния в определенной точке процесса, синхронизированный запуск с этой точки и др.).

Иерархическая организация и цикличность вычислительных процессов. Эффекты самовосстановления

Для решения задач, связанных с восстановлением, важно учитывать иерархическую и циклическую организацию процессов в ВС реального времени.

Рассмотрим основные уровни организации, начиная «снизу».

1. Уровень регистровых передач. На этом уровне каждый такт выполняется микрооперация (регистровая передача).

2. Уровень команд. Здесь цикл работы – это выполнение микропрограммы, соответствующей одной команде программы.

3. Уровень задач. Цикл на этом уровне связан с выполнением программы для решения некоторой задачи.

Применительно к вопросам искажения и восстановления вычислительного процесса существенно разделять рассмотрение операционной и управляющей составляющих процесса на каждом из трех уровней.

На уровне регистровых передач в организации каждой микрооперации участвуют операционный и управляющий автомат. Операционный автомат имеет дело с данными (n-разрядным кодом) и выполняет прием данных в регистры, преобразование, выдачу результата.

Результат преобразования на уровне команд передается по коммуникационной подсистеме (чаще всего шине) в память. Исправление данных в случае сбоя в операционном автомате и блокирование дальнейшего распространения ошибки выполняется при этой передаче в мажоритарном блоке. В следующем далее цикле работы на уровне команд в операционный автомат поступают новые данные и выполняются новые микрооперации. Таким образом, восстановление состояния операционного автомата (ОА) после сбоя не требуется. Применительно к рассмотрению потока сбоев можно считать, что с каждым циклом уровня команд происходит самовосстановление. В случае невосстанавливаемого отказа в ОА ошибки будут периодически повторяться. С помощью

блока мажорирования это можно выявить и организовать выполнение дополнительной функции – формирования сигнала о невосстанавливаемом отказе данного ОА.

Управляющий автомат (УА) выдает управляющие сигналы операционному автомату, принимает командную информацию от программного автомата, принимает из ОА сигналы о признаках, характеризующих результат предыдущей микрооперации. Переход УА из одного состояния в другое согласно заложенной в него функции переходов соответствует пошаговому выполнению алгоритма, соответствующего исполняемой команде. Сбой УА, зафиксированный в его памяти, приведет к искажению выполняемого алгоритма. Это проявится и в искажении результата ОА, управляемого данным УА. Искажение будет выявлено блоком мажорирования. Если сбой в УА – следствие восстанавливаемого отказа, восстановление произойдет автоматически в конце командного цикла при получении нового кода команды.

Необходимо отметить, что эффекты самовосстановления информационных процессов проявляются только на нижних уровнях организации процессов. Чем ниже уровень, тем меньше период, в конце которого происходит восстановление.

При выборе уровня структурного резервирования следует рассмотреть разные типы операционных автоматов. Кроме того, важно учитывать длительность цикла. Приведенные выше суждения о самовосстановлении характерны для АЛУ с регистровой памятью небольшого объема. Совсем иначе следует подходить к устройствам основной памяти.

Таким образом, отдельного рассмотрения к организации и проектированию требуют три основные подсистемы высоконадежных ВС: процессор, система памяти и системная шина.

Для процессора как основного устройства ВС требуется анализ цикличности процессов на нескольких уровнях организации: регистровых передач (микропрограммном), уровне команд, уровне обменов через системную шину.

Модель поведения высоконадежной вычислительной системы при потоке сбоев и отказов

Рассматривая влияние надежности аппаратного обеспечения (АО) на вычислительные процессы, будем различать сбои и отказы. Сбои связаны с искажением информации, представленной сигналами, и не связаны с возникновением неисправностей в аппаратуре. В то же время, меры по снижению влияния сбоев на вычислительные процессы следует принимать при проектировании, включая этапы системного, логического и конструкторского проектирования АО.

Сбои и отказы носят случайный характер. Из практики известно, что сбои происходят в сотни–тысячи раз чаще, чем отказы. Поэтому при повышении надежности ВС в первую очередь необходимо обеспечить работоспособность системы при потоке сбоев.

Сбои – события случайные и относительно редкие. Это можно обосновать следующим рассуждением. Пусть задержка срабатывания элемента – τ. Тогда можно считать, что на входе элемента – приемника сигнала с дискретностью $\Delta t = \tau$ проводится испытание: искажение сигнала из-за помех вызвало изменение информационного значения этого сигнала или нет. Ясно, что такие события происходят с интервалом $T >$ (десятки – сотни минут). Иначе аппаратура окажется неработоспособной. Таким образом ($\tau \le 1$нс) << T, что и означает: сбои – редкие события. На основании этого факта можно заключить, что стохастический процесс возникновения событий, заключающихся в искажении сигнала в некоторой точке сети соединенных элементов, достаточном для искажения информационного процесса, относится к классу пуассоновских процессов. Используя известную математическую модель описания пуассоновского случайного процесса, можно определить вероятность $P_{i,j}(t)$ того, что на j-м входе i-го элемента за время t не произойдет ни одного события рассматриваемого типа:

$$P_{i,j}(t) = \exp(-q_{i,j}t),$$

где $q_{i,j}$ – среднее число событий в данной точке сети элементов за ед. времени.

Не каждое событие приводит к сбою (воздействию на информационный процесс). Искажение логического сигнала под действием помех приводит к сбою (искажению информационного процесса) *в тех и только в тех случаях, когда это фиксируется элементами памяти*: триггерами, регистрами, счетчиками и др. В этих случаях происходит не предусмотренное алгоритмом работы изменение состояния системы. Следует отметить также, что ложные импульсы при передаче логического нуля, либо ложные «провалы» при

передаче логической единицы, весьма кратковременны, сравнимы с длительностью фронта, либо спада импульсов в цепи. Поэтому глубина распространения таких импульсов по цепи логических элементов ограничена не только возможным блокированием из-за состояний на других входах элемента, но и инерционностью самих элементов. В связи с этим, рассматривая процессы возникновения сбоев в аппаратуре из-за действия помех, в основном необходимо рассматривать входы элементов памяти.

При этом процесс сбоев некоторой схемы, например, домена, в соответствии с теорией надежности [5] также можно описать простейшим потоком. Домен по влиянию сбоев на вычислительные процессы можно характеризовать вероятностью $P_д(t)$ отсутствия сбоя за время t:

$$P_д(t) = \exp(-q_д t),$$

где $q_д$ – среднее число сбоев в домене за ед. времени.

На характеристики потока сбоев существенно влияет конструктивная иерархия организации ВС: кристалл СБИС, печатная плата, крейт. Особенности связаны с основными физическими процессами взаимодействия информационных процессов и внешних воздействий.

Рассмотрим особенности на уровне *кристалла*.

1. На уровне кристалла СБИС реализуется основная часть элементов и связей. По мере развития микроэлектроники эта доля все возрастает.
2. Подложка кристалла и корпус СБИС достаточно хорошо экранируют цепи связей элементов СБИС от внешних электромагнитных и электростатических воздействий.
3. Влияние перекрестных помех уменьшено за счет миниатюризации размеров связей и за счет рационального размещения элементов и трасс соединений. Это решается разработчиками топологии СБИС и разработчиками САПР.
4. Вопросы уменьшения влияния помех по цепям питания также решаются разработчиками конструкции и топологии СБИС.
5. Таким образом, основные вопросы повышения надежности за счет структурного резервирования при разработке систем на уровне кристалла связаны с процессами возникновения сбоев и отказов из-за воздействия на полупроводниковые структуры радиации и космических частиц.
6. На уровнях печатной платы и крейта основными источниками помех являются внешние электромагнитные и электростатические наводки. Причиной сбоев может быть также некорректная организация синхронизации (координации) процессов из-за задержек в линиях связи между СБИС. На данном уровне конструкции эти задержки больше, чем на уровне кристалла. Особенно сложности проявляются при использовании параллельных способов передачи данных на больших частотах.

В соответствии с современной технологией проектирования систем с использованием СБИС, на платах в качестве элементов находятся СБИС, а также некоторые вспомогательные БИС (контроллеры интерфейсов, синхронизаторы, приемопередатчики и т. п.), обеспечивающие взаимодействие СБИС между собой и связь с периферийными устройствами.

Способы организации связей на этих уровнях унифицированы и определяются стандартами интерфейсов. Разработка стандартов интерфейсов производится с учетом обеспечения помехоустойчивости. В частности, все более широко используются симметричные линии связи с дифференциальным включением нагрузки (LVDS). Они обеспечивают эффективное подавление продольных помех, к которым и относятся помехи от внешних электромагнитных и электростатических воздействий.

Применительно к проектированию высоконадежных вычислительных систем со структурным резервированием задача сводится к обоснованному выбору стандартного интерфейса.

Должны быть изучены также вопросы повышения надежности работы на рассматриваемом уровне организации за счет резервирования каналов связи, использования помехоустойчивого кодирования.

Рассмотрим модель поведения высоконадежной вычислительной системы при воздействии на нее потоков сбоев и отказов, используя изложенные выше представления об организации вычислительных процессов, а также известные положения теории надежности [5].

В качестве исходных примем следующие предположения.

• Будем рассматривать восстанавливаемые вычислительные системы со структурным резервированием и доменной организацией структур [1]. В каждом домене имеется блок мажорирования.

• В каждом домене периодически в соответствии с цикличностью его работы происходит восстановление того экземпляра из резервированных устройств, в котором произошел сбой. В

зависимости от уровня разбиения схемы ВС на домены и соответствующего уровня циклических процессов может происходить либо самовосстановление отказавшего экземпляра процесса, либо процесс восстановления должен быть организован под управлением устройства координации процессов, расположенного вне домена.

• В соответствии с известной статистикой будем считать, что сбои процессов происходят в сотни–тысячи раз чаще, чем невосстанавливаемые отказы элементов аппаратуры.

• При выявлении невосстанавливаемых отказов в результате обработки информации от блоков мажорирования периодически, в определенных состояниях вычислительных процессов, производится реконфигурация системы путем замены отказавшего блока на аналогичный блок из холодного резерва и ввод этого блока в вычислительный процесс.

• Потоки сбоев и отказов будем рассматривать как простейшие, используемые в теории надежности [5].

• При простейших потоках показателем, полностью характеризующим состояние работоспособности системы, является вероятность безотказной работы системы, домена, узла $P(t)$ [5].

На рисунке приведена качественная характеристика изменения вероятности безотказной работы в данном классе систем на примере одного домена. Рассмотрим начальные участки зависимостей $P_i(t)$ в диапазоне $P_i(t) << 0{,}9$. Здесь 1 – вероятность наработки домена до сбоя одного из элементов ($P_{1д}(t) = \exp(-q_{сд}t) \approx 1 - q_{сд}t$, где $q_{сд}$ – среднее число сбоев в домене в ед. времени); 2 – вероятность наработки домена до отказа одного из элементов ($P_{2д}(t) = \exp(-q_{сд}t) \approx 1 - q_{сд}t$, где $q_{од}$ – среднее число отказов в домене в ед. времени, $q_{од} < 0{,}001\ q_{сд}$); $P_{доп}$ – некоторая допустимая нижняя грань вероятности безотказной работы домена.

В невосстанавливаемых системах с мажорированием безопасная работа домена с вероятностью $P_{доп}$ обеспечивается в интервале $(0,\ T_1)$. При $t > T_1$ с вероятностью $P_{доп}$ один из трех процессов, результаты которых мажорируются, исказится вследствие сбоя. Дальнейшая работа домена не допускается, т. к. при возникновении сбоя во втором процессе правильное решение принять голосованием в блоке мажорирования уже невозможно.

Перепад 4 показывает изменение $P_д(t)$ при восстановлении искаженного экземпляра процесса, а 5 – при реконфигурации домена после отказа.

Восстановление происходит через интервал $\tau_в$. Как видно из рисунка, значение $\tau_в$ существенно влияет на уменьшение наработки $P_д(t)$. Повлиять на величину $\tau_в$ можно при проектировании системы способом разбиения схемы системы на домены и, соответственно, длительностью цикла процессов в домене. При этом может иметь место самовосстановление (на уровне микроопераций и операций). Наличие конвейеризации процессов на уровне регистровых передач при этом для восстановле-

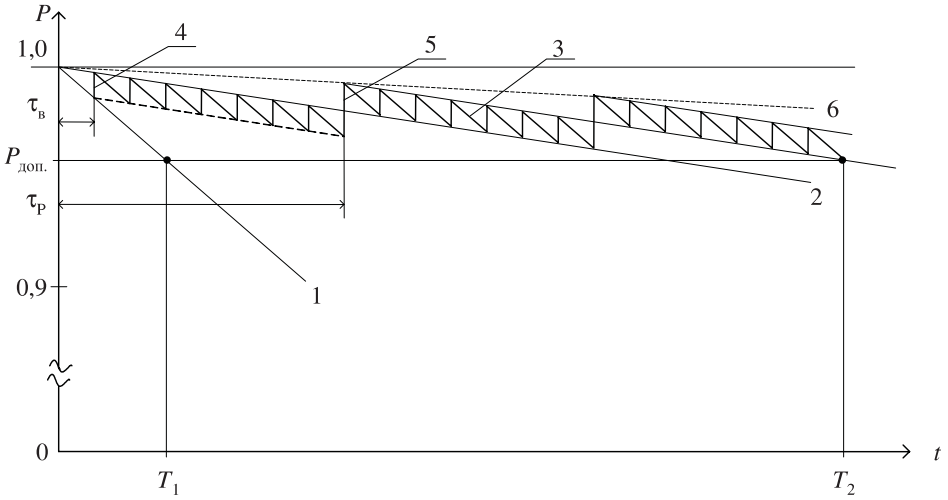


Рис. 1. Вероятность работоспособного состояния домена высоконадежной вычислительной системы
1 – вероятность работы без сбоев; 2 – вероятность работы без отказов аппаратуры; 3 – вероятность работоспособного состояния домена с учетом восстановления и реконфигурации; 4 – изменение вероятности работоспособного состояния при восстановлении; 5 – изменение вероятности работоспособного состояния при реконфигурации; 6 – вероятность работы системы с холодным резервом; $\tau_в$ – интервал восстановления при сбое; $\tau_Р$ – интервал реконфигурации при отказе

ния мало что меняет. Если домены организованы на более высоком уровне (например, на уровне процессоров), то процесс восстановления должен инициироваться извне, требует больше времени и должен предусматриваться при проектировании. Чем выше уровень цикла процесса домена в иерархии циклической организации процессов ВС, тем больше $\tau_в$, тем меньше минимальное значение наработки $P_д(t)$. Но при этом уменьшается трудоемкость проектирования ВС, т. к. упрощается использование готовых IP модулей. Таким образом, весьма актуальна проблема реинжиниринга готовых верифицированных решений. Цель реинжиниринга – введение в проект структурной избыточности и разделение схемы на домены.

Реконфигурация в сравнении с восстановлением после сбоя требует существенного усложнения коммуникационной системы и использования «холодного резерва» блоков домена. Известно, что при отсутствии питания (холодный резерв) влияние радиации не приводит к отказу [3, 4]. Реконфигурация требует затрат времени для загрузки памяти резервного блока и приведения его в некоторое предопределенное состояние, идентичное состояниям других экземпляров блоков домена. Это может быть организовано только в определенных точках вычислительного процесса, определяемых при проектировании системы.

Вследствие деградации элементов системы с течением времени, а также из-за влияния внешних факторов (радиации, температуры и др.) при восстановлениях (позиция 4 на рис.) и при реконфигурации (позиция 5) вероятность $P_д(t)$ возвращается к значению, соответствующему вероятности работоспособного состояния системы с холодным резервом. На рисунке это отражает кривая 6. Как известно из [5], система с холодным резервом имеет вероятность работоспособного состояния $P_{хр}(t) = (1 + \lambda t)\exp(-\lambda t)$. При малых значениях t вероятность $P_{хр}$ близка к единице.

Из представленной на рисунке модели следует, что время T_2 работоспособного состояния системы при использовании процессов восстановления и реконфигурации существенно больше T_1 – времени наработки резервированной системы с мажорированием, в которой восстановление и реконфигурация не предусмотрены.

Концепция многоуровневого реагирования на поток отказов в системах со структурной, временной и информационной избыточностью

В основу концепции положен учет результатов анализа сбоев и отказов в аппаратуре, создаваемой по современным технологиям, учет функционального назначения и особенностей реализации блоков структуры, а также учет ограничений, которые накладывает необходимость использования существующих САПР. Концепцию представим в виде перечня положений, которые определят подход к организации и проектированию систем.

1. Для обеспечения надежности и безопасности АО системы в условиях действия потоков внешних помех необходимо иметь средства быстрого реагирования в темпе работы аппаратуры (доли микросекунд). Реакция системы должна заключаться в маскировании сбоя и обеспечении бесперебойного выполнения основных функций системы согласно ее назначению. При исследовании структур, обладающих такими возможностями, предложены и обоснованы структуры с доменной организацией. Разработаны методы синтеза и анализа на уровне функциональной организации без учета особенностей уровня RTL и конструкторской иерархии [1]. Минимальная кратность резервирования, обеспечивающая маскирование отказов, равна трем. Это является базовым решением, пригодным в большинстве случаев создания новых систем.

2. Сбои (восстанавливаемые отказы) информационных процессов возникают, по меньшей мере, в сотни–тысячи раз чаще, чем невосстанавливаемые отказы элементов аппаратуры. Несмотря на то что при этом не выходит из строя аппаратура, требуется маскирование таких сбоев, т. к. для информационного процесса это тоже отказ. Но при этом возникает важная задача: восстанавление необходимого состояния в отказавшем узле и повторное включение его в информационный процесс. Следует отметить, что такое реагирование на отказ уже не должно быть столь оперативным, как маскирование. Появляется резерв времени, равный интервалу до возникновения следующего отказа в том же резервированном блоке. Это определяет условия и ограничения для восстановления системы. Восстановление существенно увеличивает надежность системы.

3. Невосстанавливаемые отказы требуется обнаруживать. Они возникают реже, чем восстанавливаемые. Имеется принципиальная возможность реагировать на них в некоторых точках циклических процессов исполнения функциональных программ. Можно предположить, что реакция на такие события для продления срока работоспособности – замена кристалла из «холодного» резерва. Это актуальная проблема, требующая ис-

следования. Соответствующий процесс реакции системы назван *реконфигурированием*.

4. Для повышения надежности в системах со структурным резервированием и имеющих временную и информационную избыточность, необходимо создать многоуровневую систему реагирования на возникающие сбои и отказы. Выделены три уровня: маскирование отказа, восстановление состояния отказавшего узла, реконфигурирование системы с заменой отказавшего кристалла. Временные ресурсы, выделяемые на выполнение этих функций, существенно различаются. С учетом этих ограничений часть функций необходимо реализовать аппаратно, а часть – программно. Разработка соответствующих средств и организация соответствующих процессов в системе – предмет исследований и разработки.

5. Увеличивается число параллельно протекающих процессов в рассматриваемом классе систем. Наиболее гибкий способ координации процессов – построение глобально асинхронных систем. Координация работы синхронных блоков в глобально асинхронной системе может реализовываться с помощью структурно выделенной подсистемы (синхростратума), проектирование которой может выполняться с использованием модели самосинхронных схем [6].

6. При разработке вариантов обеспечения маскирования отказов и восстановления памяти на уровне кристалла важно учитывать ограничения, накладываемые существующими САПР, а также необходимость использования готовых IP модулей для основных устройств. Поэтому актуально исследование и разработка методов и инструментальных средств автоматизированного реинжиниринга СБИС типа «система на кристалле» применительно к задаче проектирования устройств и систем с заданными показателями надежности.

7. Самовосстановление в некоторых типах функциональных узлов ФУ. Отличительный признак при классификации ФУ применительно к задаче повышения надежности систем – длительность цикла обновления внутренней памяти. Анализ функциональных узлов по этому показателю – новая актуальная задача. Важна разработка методики и средств оценки надежности узлов с учетом фактора самовосстановления за счет перезагрузки от внешнего окружения.

Рассмотрены особенности перспективного класса высоконадежных вычислительных систем. Сформулированы требования к методологии их проектирования. На основании представления об иерархической циклической организации вычислительных процессов построена модель поведения высоконадежной вычислительной системы при воздействии на нее потоков сбоев и отказов. Проанализировано влияние параметров процессов восстановления и реконфигурации на показатели надежности системы.

Предложена концепция многоуровневого реагирования на поток отказов в системах со структурной, временной и информационной избыточностью, определяющая подход к организации и проектированию таких систем.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Развитие научного потенциала высшей школы на 2009–2011 гг.», проект 12647.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глухих, М.И.** Разработка методов синтеза информационно-управляющих систем специального назначения со структурным резервированием: Дис. ... канд. техн. наук [Текст] / М.И. Глухих. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.

2. **Мелехин, В.Ф.** Вычислительные машины, системы и сети: Учебник для студ. вузов [Текст] / В.Ф. Мелехин, Е.Г. Павловский. –М.: Изд. центр «Академия», 2010. –560 с.

3. Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий [Текст] / Под ред. Ю.М. Урличич, А.А. Романов // Рос. НИИ космич. приборостроения: Тр. конф. –М.: Физматлит, 2009. –375 с.

4. **Анашин, В.С.** Обеспечение стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к естественным ионизирующим излучениям космического пространства на информационном, структурно-технологическом и методологическом уровнях [Текст] / В.С. Анашин. –С. 46–52.

5. **Allen, G.R.** Compendium of Test Results of Single Event Effects Conducted by the Jet Propulsion Laboratory [Text] / G.R. Allen // Jet Propulsion Lab. (JPL), Pasadena, CA – Radiation Effects Data Workshop, 2008 IEEE. –14–18 July 2008. –P. 21–30.

6. **Черкесов, Г.Н.** Надежность аппаратно-программных комплексов: Учеб. пособие [Текст] / Г.Н. Черкесов. –СПб.: Питер, 2005. –479 с.

7. **Мараховский, В.Б.** Проектирование средств синхронизации блоков глобально асинхронных систем с произвольной локальной синхронизацией [Текст] / В.Б. Мараховский, В.Ф. Мелехин// Информационно-управляющие системы. –2010. –№ 1 (44). –С.29–38.

УДК 004.3, 004.054, 004.432

А.В. Березкин, А.А. Федотов, А.С. Филиппов

ТЕСТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ, ЗАДАННЫХ ВЫСОКОУРОВНЕВЫМИ СПЕЦИФИКАЦИЯМИ

Этап верификации и тестирования в процессе проектирования цифровых устройств на основе ASIC, ASSP и SoC занимает более 70 % от общего объема трудозатрат по разработке проекта, тем не менее свыше 60 % проектов требуют дополнительных доработок [1]. В связи с этим необходимо разрабатывать новые подходы к функциональной верификации и тестированию. Так как функциональную верификацию проводят при помощи моделей, разработанных на разных уровнях абстракции, то естественный шаг в данном направлении – использование моделей и средств моделирования (верификации), лежащих на более абстрактном уровне, чем стандартный инструментарий языков описания аппаратуры.

Тестирование любого устройства подразумевает подачу на его входы тестовых последовательностей, получение его реакций на поданные тестовые последовательности и сравнение полученных реакций с эталонными. Эталонные реакции определяются спецификацией на тестируемое устройство, они могут быть получены либо вручную – специалистом по тестированию (исходя из анализа функционально-логической спецификации на устройство), либо от эталонной модели (ЭМ) тестируемого устройства (реализованной до процесса тестирования). Использование высокоуровневых спецификаций и средств автоматического синтеза из высокоуровневых спецификаций для формирования ЭМ позволяет получать ее за короткий срок, при этом несоответствие ЭМ спецификации практически исключено.

Разрабатываемый комплекс средств верификации аппаратно-программных встраиваемых систем включает в себя набор методик синтеза тестов из спецификаций, заданных на языках высокого уровня, инструментальных средств, поддерживающих эти методики. Разработанные методики применимы на основных этапах маршрута проектирования цифровых систем и при тестировании готовых изделий.

Реализуемый подход к верификации цифровых систем с использованием встраиваемых средств тестирования и разработанных методик представлен на рис. 1.

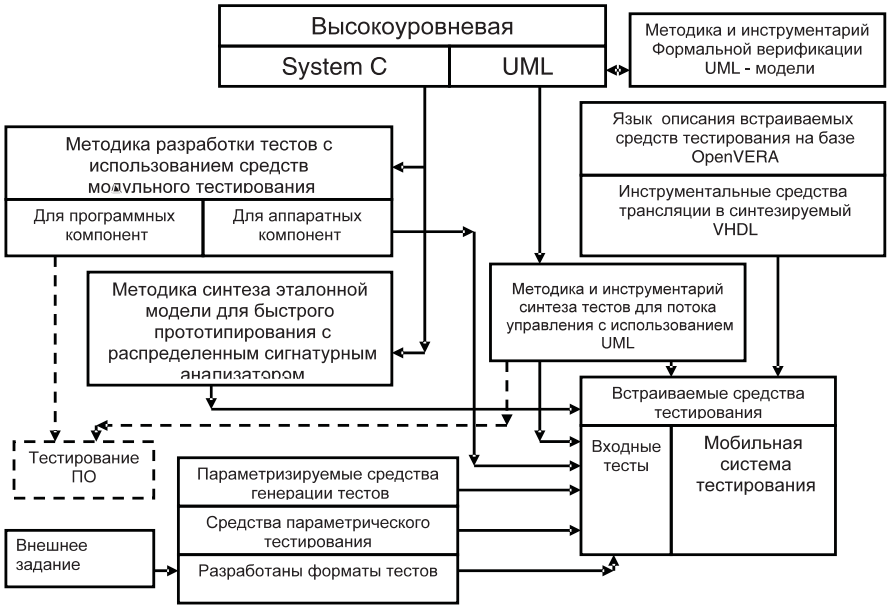


Рис. 1. Реализуемый подход к верификации цифровых систем с использованием встраиваемых средств тестирования

Общая тенденция в разработке аппаратно-программных комплексов предполагает широкое использование высокоуровневых спецификаций. Разработанные методики и инструментальные средства формального контроля UML спецификаций на полноту и непротиворечивость позволяют исключить ошибки на этапе синтеза спецификации. Созданный таким образом исходный формализм служит исходной точкой для серии средств формальной верификации при переходе к более детальным уровням описания систем и с использованием предложенных методик позволяет синтезировать тестовое окружение и встраиваемые средства тестирования.

Автоматизация процедуры синтеза тестов позволяет обеспечить требуемую глубину тестирования, существенно сокращает время на подготовку тестов, что особенно важно при внесении изменений в спецификацию, обусловленных развитием проекта в процессе его реализации. Для аппаратной поддержки верификации в процессе разработки и тестировании готовых изделий разработан комплекс аппаратных и программных средств мобильной системы тестирования.

1. Синтез тестов на основе UML спецификации

1.1 Описание и верификация управляющих сигналов. Для задания спецификации на управляющие сигналы и тесты потока управления предлагается использовать следующие диаграммы UML:

диаграмма классов – для описания интерфейсной части;

деятельности – для описания алгоритма подачи тестовых воздействий на устройство;

последовательности – для описания причинно-следственных связей между управляющими сигналами, т. е. для описания поведения устройства.

Описание компонентов аппаратуры с помощью диаграмм UML

Описание интерфейса с помощью диаграммы классов. Рассмотрим два возможных варианта использования диаграммы классов для описания интерфейса устройств

В первом варианте для отображения входов и выходов используются объекты типа «интерфейс», а параметр устройства моделируется с помощью атрибута объекта. Во втором варианте входы, выходы, а также параметры устройства моделируются с помощью атрибутов с разными нестандартными для UML типами и стереотипами. Предлагается использовать следующие стереотипы: «parameter» – для параметров устройства, «in» – для входов устройства и «out» – для его выходов. Для атрибутов со стереотипами «in» и «out» возможно также использование нестандартных типов – std_logic и std_logic_vector. Данные типы полностью соответствуют одноименным типам из библиотеки IEEE std_logic_1164 для VHDL [2], включаемой во все средства проектирования на VHDL.

Первый способ более универсален: его можно использовать для формирования структурных спецификаций устройства, соединяя входы и выходы устройств линиями ассоциации. Второй способ проще для генерации кода: все интерфейсные характеристики устройства находятся внутри одного объекта.

Использование диаграммы деятельности для описания алгоритма воздействий. Диаграммы деятельности используются для описания воздействий, подающихся на некоторое устройство в процессе его нормальной работы. Диаграмма деятельности позволяет синтезировать генерирующую часть теста, являющуюся сценарием тестирования.

Использование диаграммы последовательности для описания поведения устройства. Диаграмма последовательности используется для отображения внутреннего поведения устройства, для пояснения взаимосвязи между возникающими в нем управляющими сигналами. Пример такой диаграммы показан на рис. 2.

Прямоугольники в верхней части диаграммы использованы для отображения компонентов устройства. Вертикальные пунктирные лини – «линии жизни». Стрелками обозначены сообщения, которыми обмениваются компоненты устрой-

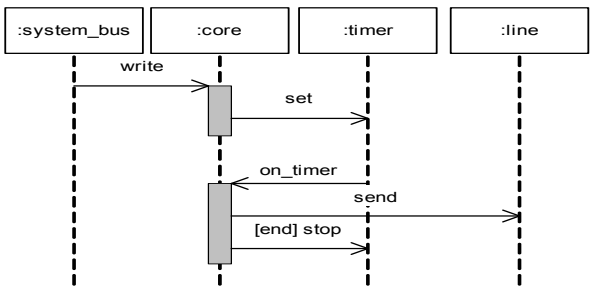


Рис. 2. Использование диаграммы последовательности для описания поведения устройства

ства. Сообщение трактуется как переход одного управляющего сигнала из неактивного состояния в активное (например, из «0» в «1»). Вертикально вытянутые прямоугольники – спецификации исполнения (execution specification). В нотации UML 2.0 данными элементами обозначаются части линии жизни объекта, представляющие целостный период его работы. В нашем случае они трактуются как элементы, объединяющие сообщения в причинно-следственные связи.

Диаграмма взаимодействия может дополняться разнообразными условиями, которые могут по-разному трактоваться (в зависимости от реализации). В рассмотренном рисунке условие сообщения `stop` записано в квадратных скобках, что является отступлением от нотации UML 2.0 (но допустимо в UML 1.x). Для обеспечения совместимости такой записи с UML 2.0 условия можно задавать как часть имени сообщения.

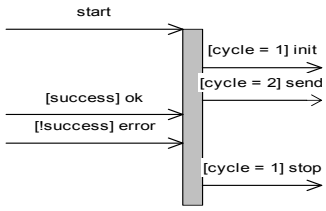
Генерация тестов аппаратуры из диаграмм UML

Генерация интерфейсной части из диаграммы классов. Для генерирования интерфейсной части testbench (описание интерфейса тестируемого устройства) используются диаграммы классов. Необходимо отметить, что, поскольку в testbench тестируемое устройство рассматривается как цельный блок, его внутренние сигналы, фигурирующие в диаграмме последовательности, недоступны. Чтобы сделать их наблюдаемыми, необходимо вынести их на интерфейсный уровень, что должно найти отражение как на диаграмме классов, так и в коде устройства.

Генерация источника тестовых воздействий из диаграммы деятельности. Рассмотрим использование диаграмм деятельности для синтеза генерирующей части теста. Поскольку диаграммы деятельности представляют собой схемы алгоритмов, их трансляция в код не представляет сложностей.

Генерация наблюдающей части теста из диаграммы последовательности. Поясним генерацию наблюдающей части теста с помощью некоторой диаграммы последовательности – спецификации исполнения, расположенной на линии жизни некоторого гипотетического управляющего устройства (рис. 3). Ниже приведен соответствующий ему код, управляющий состоянием верификатора.

Как видно из иллюстрации, вся спецификация исполнения делится на «кластеры», каждый из ко-




```
if ((state = idle) and (start = '1')) then
  cycle := 0;
  state <= after_cluster_0;
elsif ((state = after_cluster_0)
    and ((ok = '1') or (error = '1'))) then
  cycle := 0;
  state <= after_cluster_2;
elsif ((state = after_cluster_2)
    and (stop = '1')) then
  state <= idle;
else
  cycle <= cycle + 1;
end if;
```

Рис. 3. Генерация верификатора из одной спецификации исполнения

торых – это группа смежных входящих сообщений. Каждому кластеру ставится в соответствие одно состояние управляющего конечного автомата. Переход от одного состояния (кластера) к другому происходит под воздействием входящих сообщений за исключением самого последнего сообщения, которое используется для остановки верификатора независимо от того, какое это сообщение.

Верификатор может использовать ряд внутренних счетчиков-переменных. В рассматриваемом примере используется счетчик `cycle`, значение которого равно количеству тактов после последнего входящего сообщения. Также используется объект `success`, который может быть сигналом, счетчиком, внутренней переменной.

Каждое исходящее сообщение при генерации порождает одно проверяющее утверждение (`assert ... report ... severity`). Например, второе исходящее сообщение (`[cycle = 2] send`) порождает утверждение вида:

```
  if ((state = after_cluster_0) and
(cycle = 2)) then
      assert (send = '1')
      report ("send error")
      severity error;
  end if;
```

Таким образом, верификатор проверяет, что в заданное время при заданных условиях сообщение, которое должно появиться согласно спецификации, действительно появляется в устройстве.

1.2 Описание потока данных

Описание потоков данных с помощью UML

Описание алгоритма сравнения исходных и конечных данных. Алгоритм сравнения исходных и конечных данных – это ядро верификатора, именно он определяет, как произошел обмен: правильно или с ошибкой. Сложность алгоритма зависит от специфики устройства. Например, если проверяется выставление одного из битов слова в последовательном передатчике, проверка сводится к сравнению очередного разряда исходного слова с тем, который был выставлен на шину. Если проверяется более сложное устройство, такое, как сумматор, проверка сводится к самостоятельному суммированию операндов и сравнению результата, полученного на сумматоре, с результатом верификатора. Алгоритм проверки переписывания данных целесообразно описать с помощью диаграммы деятельности.

Верификатор может обращаться к специальным переменным – значениям внутренних счетчиков и задержанным информационным сигналам. Данные сигналы должны добавляться в верификатор автоматически в случае их упоминания в диаграмме деятельности. Для идентификации специальных переменных следует ввести лингвистические соглашения, например:

имя сигнала с суффиксом `_latched_n` (*n* – натуральное число) означает соответствующий сигнал, задержанный на *n* тактов;

имя управляющего сигнала с суффиксом `_counter` означает счетчик управляющего сигнала, т. е. количество активаций этого сигнала с момента последнего сброса истории.

Задание свойств управляющих сигналов

Алгоритмы проверки данных должны запускаться при появлении определенных управляющих сигналов. Привязка управляющих сигналов и алгоритмов проверки данных выполняется путем назначения управляющим сигналам определенных свойств. Некоторые параметры верификации можно задать с помощью опций сигналов, фигурирующих на диаграмме последовательности. Спецификация UML не поддерживает задания произвольных свойств сигнала напрямую, однако многие UML-редакторы позволяют назначать сигналам именованные значения, например, Tagged Values в Microsoft Visio. Для верной интерпретации этих значений необходимо принять лингвистические соглашения относительно их имен и значений, например:

• `VerificationAlg` – ассоциированный алгоритм верификации. Значение – имя диаграммы деятельности.

• `ActivePart` – рабочая часть сигнала. Значения:

`PositiveEdge`, `NegativeEdge` – положительный и отрицательный перепады;

`Edge` – любой перепад;

`Whole` – весь сигнал.

• `Latency` – количество тактов с момента активации сигнала до запуска алгоритма проверки. Значение – целое неотрицательное число.

• `ClearHistory` – очистить историю управляющих сигналов данной диаграммы последовательности. Значения: `True` или `False` (по умолчанию).

Применение разработанных принципов генерации тестов аппаратуры на основе исходной UML спецификации позволяет обеспечить полную проверку потока управления и требуемую глубину проверки потока данных.

2. Применение SystemC подобных языков для решения задач тестирования и верификации аппаратных средств

Языки класса SystemC являются попыткой упрощения процедуры проектирования цифровых устройств и предоставляют разработчику возможность моделировать, описывать и верифицировать устройство на C-подобных языках. Появление подобных языков обусловлено их универсальностью, высоким уровнем абстракции, унификацией разработки программных и аппаратных средств, существенным сокращением времени разработки за счет ускорения этапа верификации. Один из подобных языков – язык Catapult C фирмы Mentor Graphics. Catapult C – один из наиболее репрезентативных вариантов C-подобных языков проектирования аппаратуры, и наиболее полно поддержанный фирменными инструментальными средствами (Mentor Graphics Catapult C Synthesys), позволяющими получить законченный полностью функциональный результат.

Различные варианты C-подобных языков описания аппаратуры имеют следующие характеристики:

за исключением самого SystemC являются подмножествами языка программирования

C/C++, включающими в себя специальные (нестандартные) библиотеки и макросы, позволяющие симулировать параллельные процессы;

так как описание аппаратуры на С-подобном языке предполагает разработку объекта, функционирование которого имеет параллельный характер, при помощи инструментария последовательной природы, то главнейшее свойство С-подобных языков проектирования цифровых устройств – выделение параллелизма из С-кода на разных уровнях: во-первых, на уровне модулей рассматривается, какие модули могут выполняться одновременно; во-вторых, анализируются циклы в поисках итераций, чьи выполнения могут произойти параллельно;

имеют ряд ограничений, касающихся применения определенных ресурсов/свойств стандартного (ANSI) C/C++, таких, как использование указателей, рекурсивности функций, динамического размещения памяти и др.

некоторые языки разрешают определить специфическую аппаратную базу для проектируемого устройства (как правило, в случае FPGA наиболее популярны решения фирм Xilinx, Inc., Altera Corp., Actel Corp. и Lattice Semiconductor Corp.).

на их основе инструментальные средства осуществляют автоматическое формирование описания устройства на нижележащих уровнях абстракции. Например, описание на уровне регистровых передач (формируются VHDL- или Verilog-описания), формирование списка соединений из алгоритмов, разработанных в традиционной среде разработки Matlab.

Основываясь на уровне абстракции, связанном с С-подобными языками, предложены методики по автоматизации процессов тестирования и верификации с применением спецификаций системы, заданных на подобных языках.

2.1 Использование средств тестирования ПО для верификации цифрового устройства на основе высокоуровневой модели. Тестирование ПО может быть осуществлено на разных уровнях с конкретными целями при помощи различных методик [3]. Как правило, выделяют три уровня: модулей, интеграции модулей и системный. Так как алгоритмическое описание цифровых систем на Catapult C состоит, в основном, из функций, то необходимо сделать акцент на модульное тестирование. При модульном тестировании ПО принято использовать драйверы и заглушки. Драйверами являются элементы тестов, запускающие тестируемый модуль, а заглушками – заменители недостающих компонентов, вызываемые тестируемым модулем [4].

Исследованы и применяются два общеизвестных инструментальных средства тестирования ПО: инфраструктура автоматического модульного тестирования MinUnit и среда модульного тестирования C++test. Первое является свободно распространяемым продуктом, а второе – коммерческой разработкой фирмы Parasoft Corp. На рис. 4 представлена структурная схема обоих средств, по которой видно, что при использовании инфраструктуры MinUnit необходимо самостоятельно сгенерировать тестовые входные данные и заглушки, в то время как это осуществляется автоматически в среде C++test.

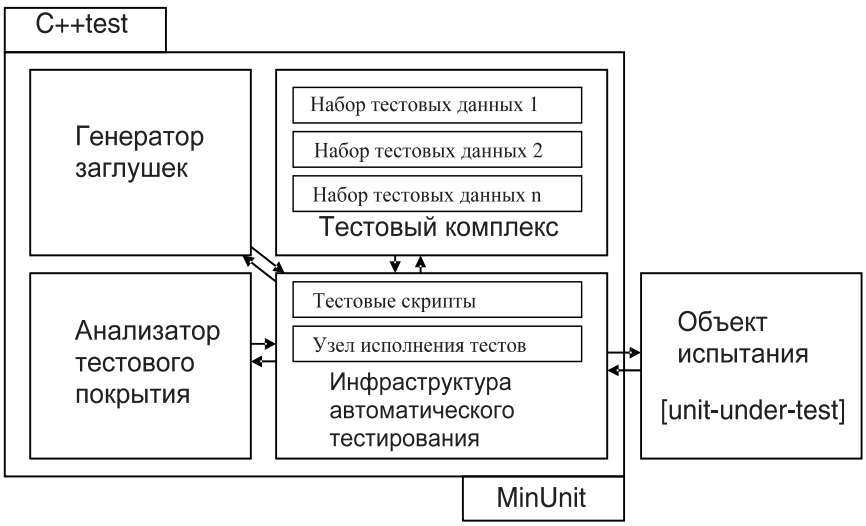


Рис. 4. Структурная схема инфраструктуры автоматического модульного тестирования MinUnit и среды модульного тестирования C++test

На основе MinUnit и C++test предложен маршрут применения средств модульного тестирования ПО к функциональной верификации цифровых устройств, заданных на Catapult C. Маршрут изображен на рис. 5. Из рисунка видно, что инструментальные средства модульного тестирования ПО предлагается использовать в двух направлениях:

во-первых, MinUnit применяется для верификации функциональности цифрового устройства при запуске тестовых входных данных, разработанных вручную в соответствии с каждым из функциональных требований, приведенных в спецификации в виде функционального теста ПО на инструментальной ЭВМ.

во-вторых, C++test используется для создания аппаратной платформы верификации цифрового устройства и, следовательно, встраиваемого тестирующего устройства. Для этого необходимо осуществить переход, обозначенный звездочкой на рис. 5, адаптируя инфраструктуру автоматического тестирования и тестовые входные данные, сгенерированные C++test для их компиляции и оптимизации в Catapult C Synthesis, чтобы получить синтезируемое VHDL-описание тестирующего устройства.

Оба направления основываются на подходе, принятом при проектировании цифровых устройств в среде Catapult C Synthesis: при разработке алгоритмического описания проектируемого устройства исходный код на Catapult C изолируется от аппаратных и временных ограничений, в нем содержится информация только о функциональности разрабатываемого модуля или системы.

Предложенные подходы позволяют быстрее и надежнее выполнить функциональную верифика-

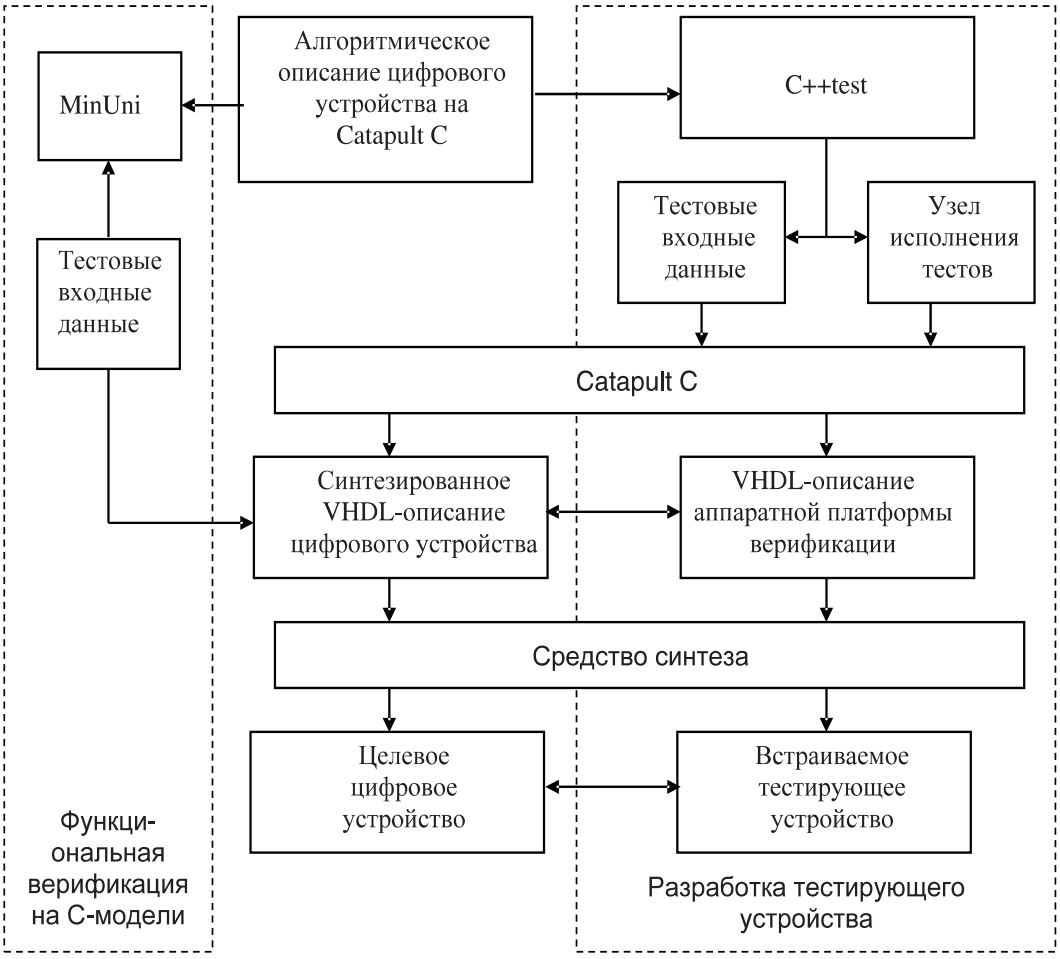


Рис. 5. Маршрут применения средств модульного тестирования программного обеспечения к функциональной верификации устройства, заданного на Catapult C

цию цифровых устройств и более эффективно создавать тесты, предназначенные для функциональной верификации разработанных на Catapult C цифровых устройств.

2.2 Использование высокоуровневых спецификаций для быстрого прототипирования цифрового устройства. Спецификация проектируемой системы – первичный и главный источник информации для разработчика конечных модулей системы. Современный подход предполагает задание подобных спецификаций, в т. ч. и на высокоуровневых языках программирования класса C и C++, что позволяет реализовать систему программно, а с привлечением современных компиляторов – и аппаратно.

Основная идея подхода – тестирование с эталонной моделью (ЭМ), синтезированной из высокоуровневой спецификации средствами Catapult C. Данный подход позволяет быстро реализовать алгоритмически верную ЭМ, из которой можно получить набор верных сигнатур, проведя для нее сигнатурный анализ, или набор верных – эталонных откликов на тестовые воздействия. Эти сигнатуры и отклики впоследствии можно использовать для обнаружения ошибок в целевом устройстве [4].

Для применения методики на практике необходимо в состав тестируемой системы встраивать тестирующую надстройку (ТН). ТН осуществляет тестирование цифрового устройства методом сигнатурного анализа с использованием ЭМ, реализованной средствами языка Catapult C. Ядром ТН является распределенный сигнатурный анализатор. Абстрактная тестовая система приведена на рис. 6.

Процесс тестирования с помощью данной тестирующей надстройки подразумевает подачу одних и тех же тестовых векторов на вход тестируемого устройства и на вход ЭМ и ожидание одинаковой ответной реакции от них (одинаковых сигнатур). Возможны два варианта совместного тестирования.

1. Тестирование с использованием памяти сигнатур для тестируемого устройства и для ЭМ. В этом режиме испытания обоих устройств могут быть разнесены по времени. Полученные при испытании устройства сигнатуры заносятся в энергонезависимую память сигнатур, подключенную к данному устройству. Это дает значительное преимущество, если тестируемое устройство находится в разработке, а высокоуровневая спецификация на него имеется в наличии. В этом случае тестировщик формирует по программе функционального тестирования целевого устройства тестовые последовательности для ЭМ, полученной из высокоуровневой спецификации. Полученные при испытании ЭМ сигнатуры заносятся в память сигнатур ЭМ. После того как целевое устройство готово, для него проводят испытания по той же программе; полученные сигнатуры заносятся в память сигнатур целевого устройства.

Сравнение содержимого памяти сигнатур целевого устройства и памяти сигнатур ЭМ позволяет делать выводы об успешности прохождения теста, однако локализовывать ошибки, выявленные при тестировании в таком режиме, неудобно.

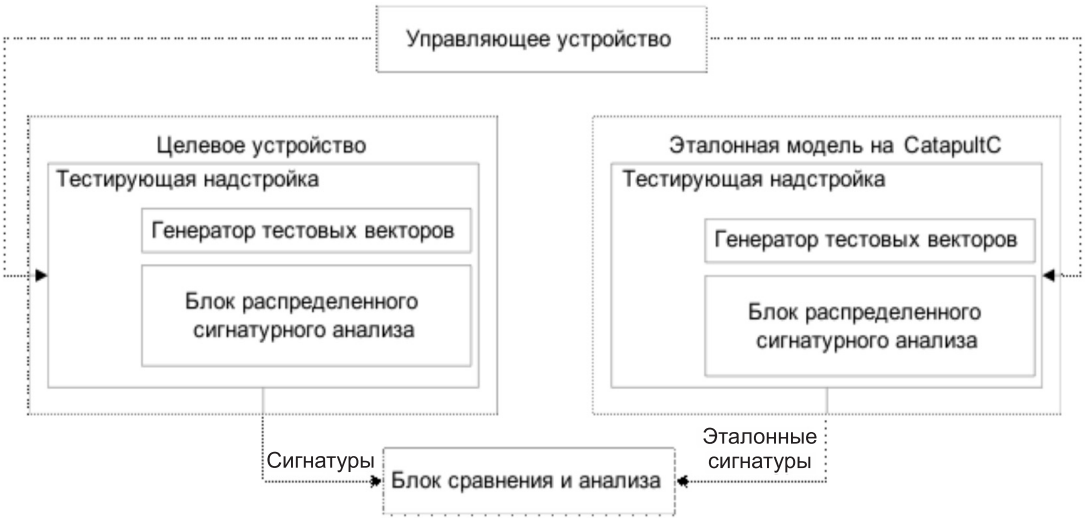


Рис. 6. Структура системы тестирования с ТН

Это связано с тем, что поиск источника ошибки по адресам в памяти сигнатур и перестройка тестирующей системы требует больших временных и аппаратных затрат. Такой вариант тестирования предпочтительнее использовать в случае если нужно не искать ошибки целевом устройстве, а убедиться в их отсутствии, например, при сдаче целевого устройства заказчику.

2. Тестирование в режиме реального времени. В этом режиме тестовые последовательности одновременно подаются на входы обоих устройств, их испытания проводятся параллельно. Полученные сигнатуры можно сравнивать в процессе тестирования и при наличии ошибки останавливать тестирование. Такой режим значительно удобнее при необходимости поиска и локализации ошибок, чем режим тестирования с использованием памяти сигнатур. При тестировании в режиме реального времени, обнаружив ошибку в выходном сигнале, можно быстро локализовать цепь, по которой прошел сбой, и перестроить тестирующую систему таким образом, чтобы протестировать блоки, входящие в эту цепь.

Отрицательной чертой тестирования в режиме реального времени является то, что несоответствие временных характеристик тестируемого устройства и эталонной модели может повлиять на результаты тестирования. Нередко, поскольку эталонная модель построена из высокоуровневой спецификации средствами автоматического синтеза, она уступает целевому устройству в производительности, и, в частности, в максимальной тактовой частоте. В связи с этим может возникнуть необходимость понижения частоты работы целевого устройства до максимальной частоты работы ЭМ. Так как тестирующая надстройка осуществляет не параметрическое тестирование, а лишь функциональное, понижение частоты работы не повлияет на результаты тестирования целевого устройства, только замедлит процесс тестирования. Согласования частоты работы целевого устройства и ЭМ можно добиться, используя устройства PLL (ФАПЧ) или счетчики-делители.

Еще одной проблемой, связанной с несоответствием ЭМ целевому устройству по временным характеристикам, является разное количество тактов синхросигнала, необходимое для срабатывания устройства. Из-за этого одни и те же сигнатуры на выходе целевого устройства и ЭМ будут формироваться в разное время, осуществлять их сравнение в таком случае затруднительно. Для решения данной проблемы необходимо либо замедлить опережающее устройство, либо ускорить отстающее, либо защелкивать значения сигнатур для обоих устройств в разные моменты времени таким образом, чтобы они оказывались равны. Для согласования устройств существует множество решений как схемотехнических (например, добавление конвейеризирующих регистров на входе или выходе опережающего устройства), так и функционально-логических, более высокоуровневых, позволяющих отталкиваться от логического времени и событий в системе, к нему привязанных.

Результаты апробации реализованных блоков ТН показали, что ее можно применять для тестирования цифровых устройств малой и средней сложности. Для сложных цифровых устройств процесс конфигурации распределенного сигнатурного анализатора в составе ТН может быть слишком сложен и длителен. Использование динамически конфигурируемого распределенного сигнатурного анализатора целесообразно именно при тестировании сложных цифровых устройств. Использование ЭМ в маршруте тестирования, особенно в режиме реального времени, предъявляет некоторые требования к ТН, которые сложно унифицировать. Для каждой системы необходимо формировать средства синхронизации тестируемого устройства с ЭМ специально, т. к. на данном этапе работы этот процесс не автоматизирован.

Предложенный подход к использованию ЭМ, получаемой из высокоуровневой спецификации, и к построению тестирующей надстройки – шаг на пути к созданию универсальной функционально законченной системы встраиваемого тестирования с эталонной моделью, синтезированной из высокоуровневой спецификации.

Разработанные подходы к тестированию цифровых систем с использованием высокоуровневых спецификаций основаны на формальных способах синтеза тестирующих последовательностей и встраиваемых средств тестирования. Предлагаемые методики применимы на основных этапах маршрута проектирования цифровых систем и при тестировании готовых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bortolami, Jerome.** Leveraging system models for RTL functional verification. Sequential logic equivalence checking provides an edge [Электронный ресурс] / Jerome Bortolami. –Режим доступа: (от 12.03.2007) http://www.eetimes.com/news/design/showArticle.jhtml?articleID=204203526

2. **Björklund D.** From UML Behavioral Descriptions to Efficient Synthesizable VHDL [Text] / D. Björklund, J. Lilius // Proc. of 20th IEEE NORCHIP Conf. (Copenhagen, Denmark, 11–12 Nov. 2002); IEEE Computer Society. –Washington DC, USA, 2007.

3. **Bertolino, Antonia.** A brief essay on software testing [Электронный ресурс] / Antonia Bertolino, Eda Marchetti. – Режим доступа: (от 17.09.2004) http://dienst.isti.cnr.it/Dienst/Repository/2.0/Body/ ercim.cnr.isti/2004-TR-36/pdf

4. **Городецкий, А.** Встроенные инструменты тестирования [Электронный ресурс] / А. Городецкий // Компоненты и технологии. –2009. –№ 3. –Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/jtag/2009_03_10.php

УДК 004.7:004.422.8

Л.К. Птицына, Н.Г. Смирнов

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ИНТЕГРАЦИИ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СРЕДСТВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ

По мере нарастания темпов конкуренции формируется стратегия ведения бизнеса, предусматривающая гибкое и оперативное реагирование на изменение рыночных условий и повышение требований заказчиков. Указанная стратегия реализуется посредством адаптации архитектуры гетерогенной сети к моделям бизнес-деятельности корпорации. В настоящее время сервис-ориентированная архитектура (Service Oriented Architecture – SOA) [1–6] признается в качестве приоритетного направления адаптации архитектуры корпоративных гетерогенных сетей к бизнес-процессам в целях обеспечения устойчивого конкурентного преимущества в сфере профессиональной деятельности. К корпоративным гетерогенным сетям относятся сложные крупномасштабные сети организаций (учреждений, предприятий, фирм), объединяющие территориально рассредоточенные разнотипные и согласованно функционирующие программные и аппаратные компоненты, созданные и действующие в соответствии с разнородными технологиями.

Сервис-ориентированная архитектура

В сфере экономики сервис-ориентированная архитектура представляется как набор бизнес-методов, методов процесса, организационных методов и методов управления, объединяемых в гибкую систему, позволяющую снизить возможность невыполнения профессиональных функций и оценить значимость информационных технологий в получении конкурентных преимуществ. В технической сфере определяются различные представления SOA. В области информационных технологий SOA трактуется как методология построения информационных систем в соответствии с моделями деятельности, учитывающими бизнес-приоритеты в рыночных условиях. В области информационных сетей сервис-ориентированная архитектура рассматривается как компонентная модель связи функциональных модулей программных приложений посредством определенных интерфейсов и соглашений между ними. Модули именуются *сервисами* (*службами* или *сервис-ориентированными средствами*).

Согласно [1, 3, 4] сервисам ставятся в соответствие следующие признаки:

1) мера связанности сервисов между собой и бизнесом отражается зависимостями в отношениях между предметом автоматизации и логикой;

2) взаимодействие сервисов подчиняется контрактным правилам, которыми в техническом контексте определяются ограничения, свойства, политика применения, приоритеты, программные интерфейсы, коммуникационные требования;

3) внутренняя логика сервисов изолируется от окружающей среды;

4) сервисами допускается композиция, которая может оформляться в виде сервиса следующего уровня;

5) любой сервис может использоваться многократно;

6) каждый сервис должен являться самоуправляемым и обнаруживаемым;

7) нейтральность сервиса по отношению к обращающимся модулям должна обеспечиваться отсутствием собственного состояния.

В корпоративных гетерогенных сетях различают три основных типа сервисов: сервисы бизнес-функций, инфраструктуры и жизненного цикла. Сервисы первого типа предназначаются для автоматизации профессиональной деятельности. Сервисами второго типа выполняется отображение сервисов бизнес-функций на платформы инфраструктуры. Сервисами третьего типа осуществляется дизайн, внедрение, управление и изменение сервисов первых двух типов.

Основные компоненты концептуальной модели интеграции и базовые стандарты сервис-ориентированных средств

Основными компонентами концептуальной модели интеграции сервис-ориентированных средств являются поставщик сервиса, потребитель сервиса и посредник сервиса. Поставщиком описывается и реализуется сервис. Потребителем выполняется с помощью вызова сервиса необходимая функция профессиональной деятельности. Описание сервиса находится в реестре. Посредником обслуживается реестр сервиса.

В настоящее время ведущие позиции среди сервисов, соответствующих концепции SOA, занимаются web-сервисами (web-службами). Подобная ситуация объясняется тем, что любой web-сервис идентифицируется строкой URI и является программной системой с общедоступными интерфейсами, определяемыми на языке XML.

Концепция SOA в гетерогенных сетях реализуется совокупностью информационных технологий различных классов, определяющих базовые стандарты для создания корпоративных приложений [5].

Модель обмена информацией между службами определяется с помощью следующих средств:

языка разметки документов XML (Extensible Markup Language), обеспечивающего структуризацию информации разного типа посредством произвольного набора инструкций;

языка XHTML, представляющего собой интеграцию языка XML и языка разметки гипертекста HTML (Hypertext Markup Language);

языка запросов к данным, структурированным в виде XML, XQL (XML Query Language);

языка описания структуры XML документа XSD (XML Schema Definition), разработанного для создания в памяти объектов, соответствующих структуре XML документов.

В качестве транспортного протокола для web-служб используется широко распространенный протокол передачи гипертекстовых документов HTTP (HyperText Transfer Protocol). Обмен сообщениями регламентируется простым протоколом доступа к объектам SOAP (Simple Object Access Protocol), который может использоваться с любым протоколом прикладного уровня. Формат сообщений, используемые протоколы и адрес, по которому находятся сервисы, регламентируется спецификацией языка описания сервисов WSDL (Web Services Description Language). Стандартом для индексирования web-сервисов является спецификация универсального описания, обнаружения и интеграции UDDI (Universal Description Discovery & Integration). В систему стандартов SOA для реализации совместной работы служб вводится спецификация языка исполнения бизнес-процессов BPEL (Business Process Execution Language).

Основные свойства языка BPEL – асинхронные взаимодействия, координация потоков и управление исключительными ситуациями. Асинхронные взаимодействия поддерживаются с целью размещения web-сервисов в сценариях интеграции, повышающего степень распределения обработки и позволяющего пользователю участвовать в реализации бизнес-процесса.

Координация потоков осуществляется на основе организации параллельных потоков выполнения и поддержки образцов соединений. Основные действия потоков складываются из индивидуальных шагов взаимодействия с сервисами, манипулирования обмениваемыми данными и обработки исключительных состояний. С помощью структурированных действий описывается создание и выполнение процесса. В реальные приложения включаются образцы сложных взаимодействий с синхронными и асинхронными сервисами. Управление исключительными ситуациями – неотъемлемый этап автоматизации профессиональной деятельности в условиях рыночных отношений. При проявлении исключительных ситуаций вызываются локальные обработчики ошибок, связанных с web-сервисами, и уведомляются асинхронные сервисы об их возникновении. Представленная взаимосогласованная совокупность стандартов служит основой для автоматизации проектирования приложений, соответствующих концепции SOA с позиций функциональности. Однако в рамках этой основы не предусматривается решение задач автоматизации проектирования рассматриваемых приложений с позиций требуемого качества. В связи с этим предлагается расширение основы, ориентированное на формирование моделей крупногранулярных процессов, соответствующих интеграции сервис-ориентированных средств, и анализ качества их выполнения. Крупногранулярным процессом считается композиция процессов, каждым из которых представляется реализация конкретной службы.

Формирование моделей интеграции сервис-ориентированных средств

Расширение основы для автоматизации проектирования приложений проводится на уровне формального описания и анализа деятельности. Первоисточником для описания моделей интеграции рассматриваемых средств является определение видов деятельности в среде сервис-ориентированной архитектуры. В системе стандартов, соответствующих концепции SOA, на этом уровне автоматизации используется язык BPEL.

Согласно [7] деятельность рассматривается как самостоятельный элемент поведения приложения, которая может включать другие деятельности или отдельные действия. Под элементарной единицей спецификации поведения понимается действие. В модели деятельности описывается последовательность действий и условий их выполнения на основе определения потока управления, а также поток объектов, необходимых для осуществления отдельных действий или соответствующих результатам их реализации. В русле объектно-ориентированного анализа информационных систем модель изображается в форме диаграммы деятельности (activity diagram).

При сопоставлении спецификаций языка BPEL и языка унифицированного моделирования UML 2.0 (Unified Modeling Language) выясняется, что на разработку каждого из них существенное влияние оказала нотация моделирования бизнес-процессов BPMN (Business Process Modeling Notation). В связи с этим в качестве основы для расширения выбирается система элементов моделирования деятельности языка UML 2.0, тем более, что расширяемость позиционируется в качестве одного из его ключевых свойств.

В концептуальную основу моделирования интеграции сервис-ориентированных средств включаются принципы определения деятельности, действия, узлов и дуг деятельности, семантики деятельности, семантики действия, потока управления, потока объектов, специальных регионов, специальных действий.

Поток управления рассматривается как прототип координации сервис-ориентированных средств, выполняющих действия деятельности в среде SOA. Он образуется из узлов, являющихся абстрактными узлами деятельности и предназначающихся для координации потоков. Узлами управления являются начальный узел, узел решения, узел слияния, узел разделения, узел соединения, узел финала деятельности и потока.

Поток объектов формируется с помощью узлов, среди которых узел объекта, узел центрального буфера и хранилища данных, узел входных контактов объекта, узел выходных контактов объекта, узел параметра деятельности.

Группа элементов моделирования, называемая *специальные регионы*, предназначается для группировки действий, относящихся к одной деятельности и имеющих некоторую общую характеристику. В такую группу включаются элементы разбиения деятельности, элементы региона прерываемой деятельности, элементы обработчика исключений.

Группа элементов, именуемая *специальные действия*, предусматривается для случаев моделирования различного поведения. К указанной группе относятся элементы создания и разрушения объектов и связей, чтения и записи переменных, передачи сигнала, приема события.

В диаграммах деятельности сервис-ориентированных средств описанные компоненты модели будут представляться в виде определенных типов графических элементов языка UML 2.0.

Вводимые расширения основы моделирования интеграции сервис-ориентированных средств касаются отображения статистических свойств действий в деятельности и потока управления, координирующего их последовательность.

В дальнейшем статистические свойства действий сервис-ориентированных средств рассматриваются во временном контексте, поскольку фактор времени – один из основных при определении качества профессиональной деятельности в среде SOA.

При отображении статистических свойств учитывается дискретность времени, являющаяся следствием цифрового характера технологий SOA.

В соответствии с изложенным выше каждое действие любого из сервис-ориентированных средств описывается плотностью вероятности $u_i(k_i), k_i = 1, 2, ..., K_i$

$$\sum_{k_i}^{K_i} u_i(k_i) = 1, i = 0, 1, 2, ..., I, \qquad (1)$$

где k_i – дискретное время выполнения i-го дей-

ствия; K_i – верхняя граница дискретного времени выполнения *i*-го действия; *i* – номер некоторого действия; *I* – общее число действий.

Плотность вероятности $u_i(k_i), k_i = 1, 2, ..., K_i$ может определяться посредством импорта результатов работы системы мониторинга в инфраструктуре гетерогенной сети либо путем анализа конечной цепи Маркова, марковского или полумарковского процесса, основные этапы которого раскрываются в [8]. Последние два пути определения плотности вероятности ориентируются на те случаи, когда рассматриваемое действие описывается в дискретном пространстве состояний, соответствующих множеству происходящих событий.

На основании определяющего признака SOA, заключающегося в нейтральности сервиса по отношению к обращающимся модулям, принимается предположение о независимости случайных времен выполнения действий, соответствующих интегрируемым сервисам.

Плотность вероятности указывается внутри графического элемента узла действия.

Вводимые расширения относятся и к потоку управления. На дугах, исходящих из каждого узла решения, указываются $p_{j,l}, j = 1, 2, ..., J; l = 1, 2, ..., L_j$ вероятности выбора альтернативных вариантов поведения в ходе деятельности, которые удовлетворяют условию полной группы несовместных событий:

$$\sum_{l=1}^{L_j} p_{j,l} = 1, j = 1, 2, ..., J, \qquad (2)$$

где *j* – номер узла решения; L_j – число альтернативных вариантов поведения после решения *j*; *J* – число узлов решения.

Предлагаемая формализация процесса формирования конкретной модели интеграции сервис-ориентированных средств представляется следующими шагами.

1. Позиционирование вида деятельности в среде SOA.

2. Выделение множества действий **D** (|**D**|=*I*) в деятельности сервис-ориентированных средств.

3. Описание каждого действия $d_i, i = 0, 1, 2, ..., I$ плотностью вероятности $u_i(k_i), k_i = 1, 2, ..., K_i$, удовлетворяющей условию (1).

4. Формирование потока управления из узлов координации действий сервис-ориентированных средств.

5. Описание каждого альтернативного варианта всех узлов решения соответствующей вероятностью $p_{j,l}, j = 1, 2, ..., J; l = 1, 2, ..., L_j$ с обязательным выполнением условия (2). Указанные вероятности могут определяться с помощью считывания соответствующих результатов работы системы мониторинга или оценки вероятности событий, происходящих при выполнении действий в деятельности сервис-ориентированных средств. Если любой из указанных путей определения считается неприемлемым, то вероятности альтернативного выбора считаются варьируемыми параметрами, принимающими случайные значения на интервале [0,1] при выполнении условия (2).

6. Формирование матрицы инциденций для узлов разъединения и узлов соединения **A** размера $(n \times n)$, где *n* – общее число узлов разъединения и узлов соединения; $a_{i,j} = 0$, если узлы не связаны через узлы действий; $a_{i,j} = 1$, если *j*-му узлу предшествуют узлы действий, следующие в последовательности узлов после *i*-го узла; $a_{i,j} = -1$, если узлы действий, предшествующие *i*-му узлу, следуют после *j*-го узла.

7. Описание спецификаций всех узлов соединений, характеризующих взаимодействие сервис-ориентированных средств.

При вариации содержания выполняемых операций представленных шагов образуется многовариантный набор моделей интеграции сервис-ориентированных средств.

Показатели качества совместной работы служб и методы их оценки

Качество совместной работы служб SOA является многопрофильной категорией. Однако в рамках данной статьи рассматриваются лишь те аспекты качества, которые касаются времени исполнения бизнес-процесса.

В соответствии с концепцией SOA принимается гипотеза о взаимной независимости времени выполнения действий в деятельности.

Стохастический профиль интеграции сервис-ориентированных средств в полной мере характеризуется плотностью вероятности времени выполнения деятельности, вследствие чего она выбирается базовым показателем качества совместной работы служб. После нахождения базового показателя качества без особых вычислительных затруднений определяются показатели, представляющие собой числовые характеристики времени выполнения деятельности в среде SOA. При выдвижении временного ограничения, обусловленного спецификой профессиональной дея-

тельности, наибольшее внимание уделяется риску срыва временного регламента. Считается, что чем ниже риск, тем выше качество совместной работы служб. По этой причине риск срыва временного регламента деятельности также включается в систему показателей качества.

Для определения выбранных показателей качества совместной работы служб предлагается метод, содержащий следующие этапы.

1. Выделение в модели интеграции сервис-ориентированных средств последовательностей узлов действий, замена каждой последовательности новым узлом более сложного действия с определением эквивалентной характеристики в виде плотности вероятности времени его выполнения по следующей формуле:

$$u(k_{0,\,1,\,...,\,m}) = \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,(m-1)}}^{\max k_{0,1,\,...,\,(m-1)}} u(k_{0,\,1,\,...,\,(m-1)}) \times \times u_m(k_{0,\,1,\,...,\,m} - k_{0,\,1,\,...,\,(m-1)}), \quad (3)$$

$$k_{0,\,1,\,...,\,m} = \min(k_0 + k_1 + ... + k_m),\ ...,$$

$$\max(k_0 + k_1 + ... + k_m),\ m = 0,1,\ ...,\ M_j,$$

$$u(k_0) = u_0(k_0),$$

где $k_{0,\,1,\,...,\,m}$ – дискретное время выполнения последовательности m действий; $u(k_{0,\,1,\,...,\,m})$ – плотность вероятности времени выполнения последовательности $(m+1)$ действий.

2. Нахождение в модели интеграции сервис-ориентированных средств группы узлов альтернативных действий, замена каждой найденной группы новым узлом более сложного действия с определением эквивалентной характеристики в виде плотности вероятности времени его выполнения согласно соотношению:

$$u(k_{1,\,2,\,...,\,l,\,...,\,L_j}) = \sum_{l=1}^{L_j} p_{j,l} u_l(k_l); \quad (4)$$

$$k_{1,\,2,\,...,\,l,\,...,\,L_j} = \min_l k_l,\ ...,\ \max_l k_l;$$

$$l = 1,2,\ ...,\ L_j,$$

где $u(k_{1,\,2,\,...,\,l,\,...,\,L_j})$ – плотность вероятности $k_{1,\,2,\,...,\,l,\,...,\,L_j}$ времени выполнения L_j альтернативных действий.

3. Выделение последовательностей узлов новых более сложных действий, замена каждой выделенной последовательности новым узлом укрупненного действия с определением по формуле (3) эквивалентной характеристики в виде плотности вероятности его выполнения.

4. Представление спецификаций узлов соединений модели интеграции сервис-ориентированных средств в базисе функций $\wedge(N), \vee(N)$, «M из N», где N – степень параллельности, M – число выполненных действий, по окончании которых завершается соединение параллельных действий.

5. Выделение в модели групп узлов параллельных действий, замена каждой группы новым узлом укрупненного действия с определением эквивалентной характеристики в виде плотности вероятности времени его выполнения по формулам (5), (6), если соединение осуществляется согласно булевой функции $\wedge(N)$, или по формулам (7), (8), если узел соединения описывается булевой функцией $\vee(N)$, или по формулам (9), (10), (11), (12), если соединение проводится в соответствии с функцией «M из N»:

$$u_\wedge(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) = \prod_{n=1}^{N} \Big(\sum_{k_n=1}^{k_{1,2,\,...,\,n,\,...,\,N}} u_n(k_n) \Big) - \quad (5)$$

$$- \prod_{n=1}^{N} \Big(\sum_{k_n=1}^{k_{1,2,\,...,\,n,\,...,\,N}-1} u_n(k_n) \Big),$$

$$k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N} =$$

$$= \max_n(\min k_1, \min k_2,\ ...,\ \min k_n,\ ...,\ \min k_N),\ ...,$$

$$,\ ...,\ \max_n(\max k_1, \max k_2,\ ...,\ \max k_n,\ ...,\ \max k_N), \quad (6)$$

$$u_\vee(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) =$$

$$= \prod_{n=1}^{N} \Big(1 - \sum_{k_n=1}^{k_{1,2,\,...,\,n,\,...,\,N}-1} u_n(k_n) \Big) - \quad (7)$$

$$- \prod_{n=1}^{N} \Big(1 - \sum_{k_n=1}^{k_{1,2,\,...,\,n,\,...,\,N}} u_n(k_n) \Big),$$

$$k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N} =$$

$$= \min_n(\min k_1, \min k_2,\ ...,\ \min k_n,\ ...,\ \min k_N),\ ...,$$

$$,\ ...,\ \min_n(\max k_1, \max k_2,\ ...,\ \max k_n,\ ...,\ \max k_N), \quad (8)$$

$$u_{M,N}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) =$$

$$= U_{M,N}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) - \quad (9)$$

$$- U_{M,N}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N} - 1),$$

$$U_{M,N}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) = \sum_{r=1}^{k_{1,2,\,...,\,n,\,...,\,N}} u_\wedge(r) \quad (10)$$

при $M = N$,

$$U_{M,N}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) = \sum_{r=1}^{k_{1,2,\,...,\,n,\,...,\,N}} u_{\vee}(r)$$
$$\text{при } M = 1, \qquad (11)$$

$$U_{M,N}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) = G(N, M, N, k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N})$$
$$\text{при } 1 < M < N, \qquad (12)$$

где

$$G(N, M, IND, k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) =$$

$$= \begin{cases} 0, \text{если } M > N; \\ \sum\limits_{r=1}^{k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}} u_{\vee}(r), \text{если } M = 1; \\ \sum\limits_{r=1}^{k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}} u_{\wedge}(r), \text{если } M = N; \\ U_{IND}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) G(N-1, \\ M-1, IND-1, k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) + \\ +(1 - U_{IND}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N})) \times \\ \times G(N-1, M, IND-1, k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}), \\ \text{если } M < N; \end{cases}$$

$$U_{IND}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) = \sum_{r=1}^{k_{1,2,\,...,\,n,\,...,\,N}} u_{IND}(r),$$
$$IND = 1,\, 2,\, ...,\, N;$$

$k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}$ – время выполнения параллельных действий; $u_{\wedge}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N})$ – плотность вероятности времени выполнения параллельных действий при соединении согласно булевой функции $\wedge(N)$; $u_{\vee}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N})$ – плотность вероятности времени выполнения параллельных действий при соединении согласно булевой функции $\vee(N)$; $u_{M,N}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N})$ – плотность вероятности времени выполнения параллельных действий при соединении согласно функции «M из N»; $U_{M,N}(k_{1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N})$ – функция распределения времени выполнения параллельных действий при соединении согласно функции «M из N».

6. Формирование последовательности узлов укрупненных действий и определение $u(k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I})$ плотности вероятности времени выполнения деятельности согласно соотношению (3).

7. Определение показателей качества совместной работы служб:

$$E[k_{0,1,\,...,\,i,\,...,\,I}] = \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,i,\,...,\,I}}^{\max k_{0,1,\,...,\,i,\,...,\,I}} k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I} u(k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I}), \qquad (13)$$

$$D[k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I}] = \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,i,\,...,\,I}}^{\max k_{0,1,\,...,\,i,\,...,\,I}} (k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I} - E[k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I}])^2 u(k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I}), \qquad (14)$$

$$R(k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I} > C) = 1 - \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,i,\,...,\,I}}^{C} u(k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I}), \qquad (15)$$

где C – верхняя граница допустимого времени выполнения деятельности; $E[k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I}]$, $D[k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I}]$ – соответственно математическое ожидание и дисперсия времени выполнения деятельности в среде сервис-ориентированной архитектуры; $R(k_{0,\,1,\,...,\,i,\,...,\,I} > C)$ – риск срыва временного регламента.

Для подтверждения корректности определения показателей качества совместной работы служб целесообразно воспользоваться модифицированным методом свертки, раскрытым в [8].

Исходный материал для применения модифицированного метода свертки – логическая модель деятельности, формирующаяся посредством преобразования диаграммы деятельности. Преобразование осуществляется путем замены узлов действий и узлов решений неузловыми вершинами ориентированного графа, а узлов разъединения и узлов соединения – узловыми вершинами. При использовании модифицированного метода вырожденный граф строится по матрице инциденций **A**, сформированной при разработке диаграммы деятельности.

Каждый из определенных выше показателей может включаться в представительное множество критериев качества совместной работы служб SOA, формируемых на основе теории исследования операций [9].

Прикладной аспект разработанных формализаций предлагается распространять, прежде всего, на типовые профили интеграции сервис-ориентированных средств, широко востребованных в профессиональной деятельности.

При подобной направленности применения формализаций обеспечивается формирование рациональных профилей услуг в зависимости от условий выполнения профессиональной деятельности.

Далее ключевые особенности определения показателей качества совместной работы служб раскрываются при анализе четырех типовых профилей интеграции сервис-ориентированных средств.

На рис. 1 приводится модель сервисной деятельности в случае, когда запрос клиента может выполняться одним из L сервис-ориентированных средств, развернутых на серверах с различными характеристиками производительности и сконфигурированных в среде исполнения крупногранулярных процессов. В рассматриваемой модели действие 0 ассоциируется с инициализацией сервисной деятельности, последующие L действий – с альтернативным выполнением сервисов, а завершающее (L+1) действие – с сохранением статуса транзакции и тарификацией. Клиентской стороной ставится цель выполнения сервисной деятельности и получения информации относительно ее качества, а администратором гетерогенной сети – балансировка нагрузки сервисного обслуживания. В соответствии с предложенным методом математическое ожидание, дисперсия времени реализации сервисной деятельности и риск срыва временного регламента определяются с помощью следующих соотношений:

$$u(k_{1,\,2,\,...,\,l,\,...,\,L}) = \sum_{l=1}^{L} p_l u_l(k_l), \qquad (16)$$

$$k_{1,\,2,\,...,\,l,\,...,\,L} = \min_l k_l,\ ...,\ \max_l k_l;\ \ l = 1,\,2,\,...,\,L;$$

$$u(k_{0,\,1,\,2,\,...,\,l,\,...,\,L}) = \qquad (17)$$

$$= \sum_{k_0}^{K_0} u_0(k_0)\,u(k_{0,\,1,\,2,\,...,\,l,\,...,\,L} - k_0),$$

$$k_{0,\,1,\,...,\,l} = \min(k_0 + k_{1,\,2,\,...,\,l}),\ ...,$$

$$,...,\ \max(k_0 + k_{1,\,2,\,...,\,l}),\ l = 1,\ ...,\ L;$$

$$u(k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,(L+1)}) =$$

$$= \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,l,\,...,\,L}}^{\max k_{0,1,\,...,\,l,\,...,\,L}} u(k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L)}) \times \qquad (18)$$

$$\times u_{(L+1)}(k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)} - k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L}),$$

$$k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)} =$$

$$= \min(k_0 + k_1 + ... + k_l + ... + k_L + k_{(L+1)}),\ ...,$$

$$,\ ...,\ \max(k_0 + k_1 + ... + k_l + ... + k_L + k_{(L+1)});$$

$$E[k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)}] =$$

$$= \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)}}^{\max k_{0,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)}} k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)} \times \qquad (19)$$

$$\times u(k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)});$$

$$D[k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)}] =$$

$$= \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)}}^{\max k_{0,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)}} (k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)} - \qquad (20)$$

$$-E[k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)}])^2 \times$$

$$\times u(k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)});$$

$$R(k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)} > C) =$$

$$= 1 - \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)}}^{C} u(k_{0,\,1,\,...,\,l,\,...,\,L,\,(L+1)}). \qquad (21)$$

В среде автоматизированной разработки программных проектов NetBeans 6.5 при реализации совместной работы служб на языке BPEL анализируемый процесс представляется в виде, представленном на рис. 2.

На рис. 3 изображена модель сервисной деятельности в случае, когда, для выполнения запроса клиента требуется реализация нескольких сервис-ориентированных средств, допускающих параллельную работу служб, которым соответствует N действий. Действия 0 и (N+1) рассматриваются в той же интерпретации, как и в модели на рис. 1.

На практике параллельная работа служб именуется *реализацией партнерских сервисов*. При вариации функциональной спецификации узла соединения образуется ряд типовых профилей интеграции сервис-ориентированных средств, среди которых базовыми являются варианты, описываемые функциями $\wedge(N), \vee(N)$, «M из N». Первые два из указанных профилей являются частными случаями третьего варианта: функция $\wedge(N)$ соответствует функции «M из N» при $M = N$, а функции $\vee(N)$ – «M из N» при $M = 1$.

Если для успешного выполнения исследуемой деятельности требуется информация от всех параллельно реализуемых партнерских сервисов, то спецификация соединения описывается булевой функцией $\wedge(N)$. В подобной ситуации партнер-

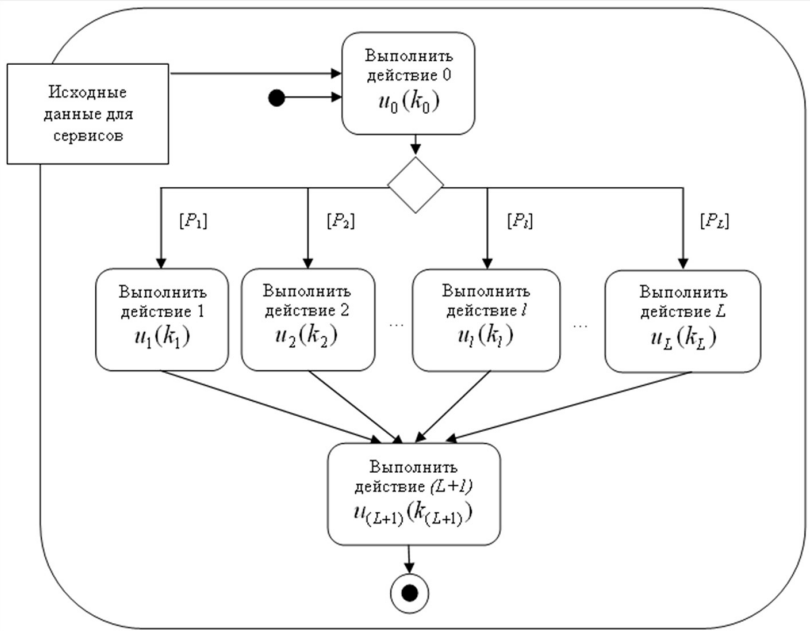


Рис. 1. Типовая модель альтернативных действий

ские сервисы сопровождаются отличающимися интерфейсами и предназначаются для выполнения различных функций, подчиненных достижению единой цели. Примером такого рода может служить широкий спектр крупно-гранулярных процессов (бизнес-процессов), в которых обработка отдельных частей входной информации проводится несколькими партнерами. Например, при оказании услуги оплаты определенных видов Интернет-контента со счета мобильного оператора проводится несколько действий, среди которых авторизация абонента, получение информации о предоставляемом Интернет-контенте (профиль услуги).

Если для успешного выполнения исследуемой деятельности требуется информация от любого первого завершенного партнерского сервиса из N реализуемых, то спецификация соединения представляется булевой функцией $\vee(N)$. Подобного рода ситуация проявляется тогда, когда среди N предусматриваемых авторизаций неудачно завершается хотя бы любая одна.

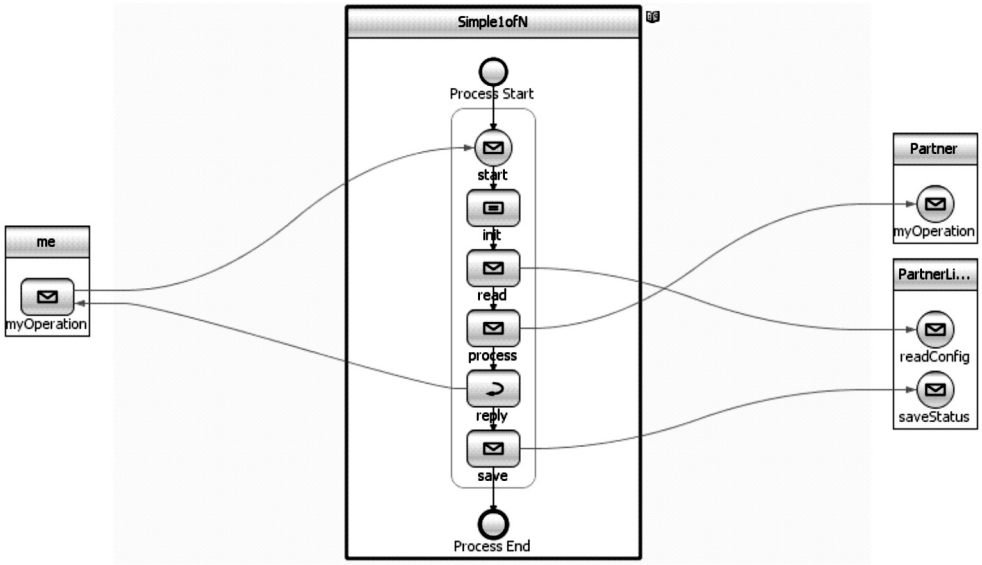


Рис. 2. Типовая модель альтернативных действий на языке BPEL

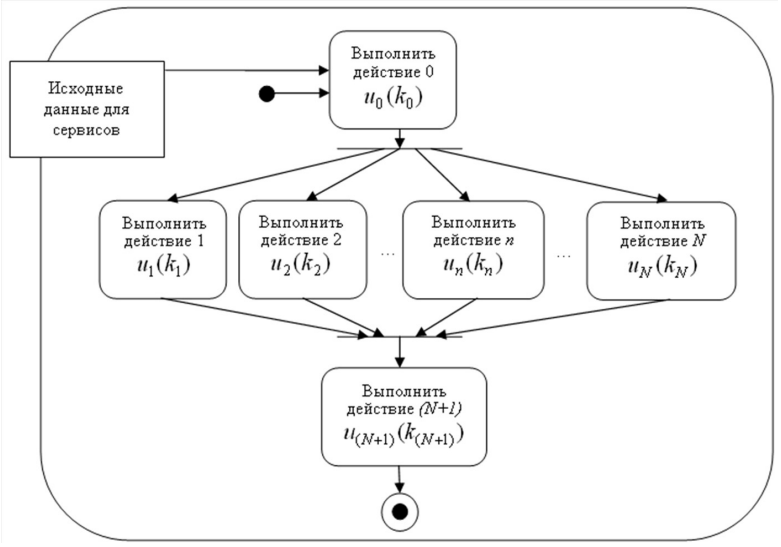


Рис. 3. Типовая модель параллельных действий

В случае, когда у партнерских сервисов одинаковые интерфейсы и для успешного выполнения исследуемой деятельности оказывается достаточным завершения M опрашиваемых средств из N параллельно реализуемых, узел соединения описывается функцией «M из N». Подобная ситуация наблюдается при поиске контента на множестве серверов. Например, в крупно-гранулярном процессе, осуществляющем поиск ссылок на видеоконтент на нескольких серверах контент-провайдеров, в параллельных потоках вызывается N партнерских сервисов поиска.

При описании узла соединения спецификацией $\wedge(N)$ математическое ожидание, дисперсия времени совместной работы служб и риск срыва регламента определяются соответственно соотношениями (5), (6), (22)–(26):

$$u(k_{0,\,1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) = \\ = \sum_{k_0}^{K_0} u_0(k_0)u_{\wedge}(k_{0,\,1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N} - k_0), \tag{22}$$

$$k_{0,\,1,\,...,\,n} = \min(k_0 + k_1 + ... + k_n),\ ...,$$
$$,\ ...,\ \max(k_0 + k_1 + ... + k_n),\ n = 0,\,1,\,...,\,N;$$

$$u(k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)}) = \\ = \sum_{\min k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N}}^{\max k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N}} u(k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N)})u_{(N+1)} \times \tag{23}$$
$$\times(k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)} - k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N}),$$

$$k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)} = \\ = \min(k_0 + k_1 + ... + k_n + ... + k_N + k_{(N+1)}),... \\ ,\ ...,\ \max(k_0 + k_1 + ... + k_n + ... + k_N + k_{(N+1)});$$

$$E[k_{0,\,1,\,...,\,n,...,N,(N+1)}] = \\ = \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)}}^{\max k_{0,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)}} k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)} \times \tag{24}$$
$$\times u(k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)});$$

$$D[k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)}] = \\ = \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)}}^{\max k_{0,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)}} (k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)} - \\ -E[k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)}])^2 \times \tag{25}$$
$$\times u(k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)});$$

$$R(k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)} > C) = \\ = 1 - \sum_{\min k_{0,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)}}^{C} u(k_{0,\,1,\,...,\,n,\,...,\,N,\,(N+1)}). \tag{26}$$

Если узел соединения характеризуется функцией $\vee(N)$, то числовые характеристики времени совместной работы служб и риск срыва регламента находятся с помощью выражений (7), (8), (27), (23)–(26):

$$u(k_{0,\,1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) = \\ = \sum_{k_0}^{K_0} u_0(k_0)u_{\vee}(k_{0,\,1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N} - k_0), \tag{27}$$

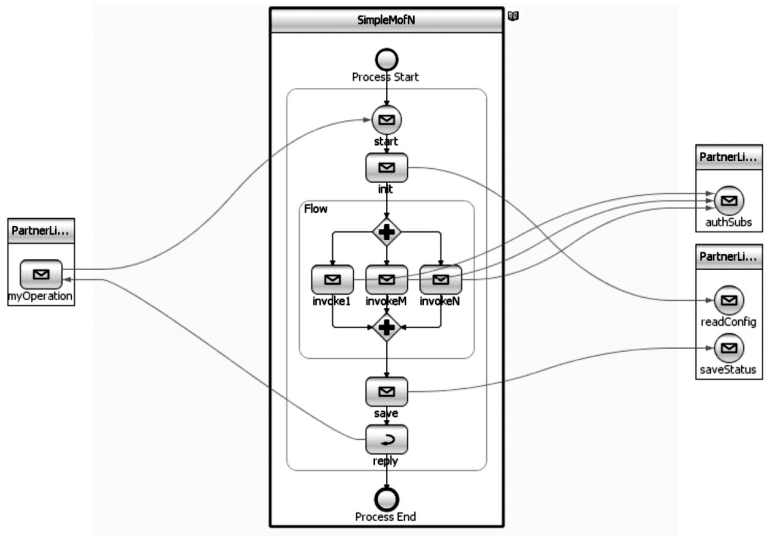


Рис. 4. Типовая модель параллельных действий на языке BPEL

$$k_{0,\,1,\,...,\,n} = \min(k_0 + k_1 + ... + k_n),\ ...,$$

$$, ...,\ \max(k_0 + k_1 + ... + k_n), n = 0,\,1,\,...,\,N.$$

Когда спецификация узла соединения представляется функцией «*M* из *N*», тогда статистические показатели времени совместной работы служб и риск срыва регламента вычисляются по формулам (9)–(12), (28), (23)–(26):

$$u(k_{0,\,1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N}) =$$

$$= \sum_{k_0}^{K_0} u_0(k_0) u_{M,N}(k_{0,\,1,\,2,\,...,\,n,\,...,\,N} - k_0), \quad (28)$$

$$k_{0,\,1,\,...,\,n} = \min(k_0 + k_1 + ... + k_n),\ ...,$$

$$, ..., \max(k_0 + k_1 + ... + k_n), n = 0,\,1,\,...,\,N.$$

При реализации совместной работы служб на языке BPEL в среде NetBeans 6.5 последние три типовых варианта крупно-гранулярных процессов формируются согласно схеме на рис. 4.

В результате развития технологических основ создания программных продуктов:

расширена система моделей SOA, обеспечивающая совмещение автоматизации разработки программного обеспечения гетерогенных сетей и оценку качества совместной работы служб;

формализовано формирование моделей интеграции сервис-ориентированных средств, предназначенных для анализа качества совместной работы служб;

разработан метод определения показателей качества совместной работы служб, раскрывающего их зависимость от динамических свойств и характеристик взаимодействия сервис-ориентированных средств;

выведены аналитические зависимости показателей качества совместной работы служб от параметров типовых моделей интеграции сервис-ориентированных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Леснова, Л.** Сервис-ориентированная архитектура: подход IBM [Текст] / Л. Леснова // Connect! Мир связи. –2008. –№ 3. –С. 104–105.

2. **Черняк, Л.** Загадка SOA [Текст] / Л. Черняк // Открытые системы. –2007. –№ 7. –С. 18–25.

3. **Thomas, Erl.** Service-Oriented Architecture (SOA): Concepts, Technology, and Design [Text] / Erl. Thomas. –Prentice Hall, 2005. –760 p.

4. **Фейгин, Д.** Концепция SOA [Текст] / Д. Фейгин // Открытые системы. –2004. –№ 6. –С. 14–18.

5. **Дубова, Н.** SOA: подходы к реализации [Текст] / Н. Дубова // Открытые системы. –2004. –№ 6. –С. 19–25.

6. **Дубова, Н.** Репетиция оркестра web-сервисов [Текст] / Н. Дубова // Открытые системы. –2004. –№ 11. –С. 30–36.

7. **Леоненков, А.В.** Самоучитель UML 2 [Текст] / А.В. Леоненков. –СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 576 с.

8. **Птицына, Л.К.** Программное обеспечение компьютерных сетей. Моделирование механизмов синхронизации параллельных вычислительных процессов в системах мониторинга и управления: Учеб. пособие [Текст] / Л.К. Птицына, Н.В. Соколова. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –213 с.

9. **Катулев, А.Н.** Исследование операций: принципы принятия решений и обеспечение безопасности [Текст] / А.Н. Катулев, Н.А. Северцев. –М.: Физматлит, 2000. –320 с.

УДК 517.958:5

А.Н. Фирсов

ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА В ДВУХ ЧАСТНЫХ СЛУЧАЯХ

Уравнение Больцмана хорошо известно как основное уравнение кинетической теории разреженных газов. Уже Л. Больцман понимал роль этого уравнения для обоснования макроскопических моделей аэродинамики. В 1916–1917 гг. Д. Энског и С. Чепмен независимо предложили формально-математический вывод макроскопических уравнений аэродинамики из уравнения Больцмана, включая естественный вывод макроскопических соотношений для коэффициентов вязкости, теплопроводности и диффузии (так называемый *метод Чепмена–Энскога*, считающийся сейчас классическим).

С другой стороны, исследование уравнения Больцмана как математического объекта (теория существования и единственности решений, анализ качественных свойств решений, корректность постановки различных задач для этого уравнения и т. п.) получило заметное развитие лишь во второй половине XX в. Причиной этому послужили, в основном, два обстоятельства.

Во-первых, реальная необходимость приоритетного использования кинетического подхода при рассмотрении практических задач аэродинамики возникла с развитием ракетной и космической техники и высотной авиации, вакуумной техники и т. п. При достаточно большой степени разрежения газа (когда средняя длина свободного пробега молекулы становится сравнимой с размерами движущегося в газе тела, что для земной атмосферы соответствует высотам более 100 км), классическая аэродинамика должна заменяться кинетической теорией газов. В основе этой теории, как уже было отмечено, лежит уравнение Больцмана. Таким образом, при решении практических инженерных задач, связанных с движением тел в высотных слоях атмосферы, появилась необходимость развития адекватных приближенных, в частности, численных методов решения уравнения Больцмана. Но для надежного использования тех или иных приближенных методов необходимо их строгое обоснование, которое нельзя получить без математически точных результатов о существовании и свойствах решений этого уравнения.

Во-вторых, математический аппарат, оказавшийся подходящим для строгого анализа уравнения Больцмана, был в достаточной степени развит лишь во второй половине XX в. Речь идет, в первую очередь, о методах функционального анализа, относящихся, в частности, к теории неограниченных операторов в банаховых пространствах, теории однопараметрических полугрупп операторов, теории обобщенных функций. При этом многие математические задачи, связанные с уравнением Больцмана, оказываются «не по зубам» даже продвинутым методам функционального анализа.

Можно констатировать, что, несмотря на серьезные успехи, достигнутые трудами не слишком многочисленных зарубежных (Т. Карлеман, Г. Грэд, К. Черчиньяни, С. Укаи и др.) и отечественных (А.А. Арсеньев, Н.Б. Маслова, А.В. Бобылев, А.Н. Фирсов и др.) исследователей, математическая теория уравнения Больцмана еще далека от сколько-нибудь завершенного вида.

С этой точки зрения даже частные результаты, относящиеся к математической теории уравнения Больцмана, могут оказаться весьма познавательными и практически полезными.

Настоящая статья посвящена двум математическим задачам, относящимся к уравнению Больцмана. Первая касается асимптотических свойств решений линеаризованного уравнения Больцмана на бесконечном промежутке времени, вторая – алгоритму построения точного решения пространственно-однородного уравнения Больцмана.

Экспоненциальная устойчивость решений задачи Коши для линеаризованного уравнения Больцмана

Рассмотрим задачу Коши для линеаризованного уравнения Больцмана кинетической теории газов [1, 2]:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\vec{u}\cdot\frac{\partial f}{\partial \vec{x}}=L[f],\quad t>0,\quad L[f]=K[f]-\nu f, \quad (1)$$

$$f=f(\vec{x},\vec{u},t),\quad \vec{x}\in\mathbf{R}^3,\quad \vec{u}\in\mathbf{R}^3,\quad t\geq 0,$$

$$f\big|_{t=0}=f_0(\vec{x},\vec{u}). \quad (2)$$

Здесь $f(\vec{x},\vec{u},t)$ – линеаризованная функция распределения молекул по координатам $\vec{x}$ и скоростям $\vec{u}$ в момент времени t; $K[f]$ – линейный ограниченный оператор, действующий на f как функцию $\vec{u}$; $\nu=\nu(u)=O(u^{\beta})$ при $u\to\infty$, $0<\beta\leq 1$, $u=|\vec{u}|$. Свойства функции $\nu(u)$ зависят от конкретной модели межмолекулярного взаимодействия, принимаемой при выводе кинетических уравнений. Подробности в [1, 2].

Известно [3, 4], что решение задачи (1), (2) – в случае «жестких» потенциалов межмолекулярного взаимодействия $U\sim r^{-k}$, $k>4$ – имеет при $t\to\infty$ в общем случае степеннýю асимптотику вида $O\left(\frac{1}{1+t^{\mu}}\right)$, $\mu>0$. Этот результат получается в предположении, что $f(\vec{x},\vec{u},t)$ при $x=|\vec{x}|\to\infty$ ведет себя в некотором смысле как функция из $L_p(\mathbf{R}^3_x)$, $p>1$.

Оказывается, что если на поведение $f(\vec{x},\vec{u},t)$ при $x\to\infty$ наложить более жесткие требования, например, потребовать, чтобы $f(\vec{x},\vec{u},t)$ удовлетворяла по $\vec{x}$ (и равномерно по $\vec{u}$, t) условию

$$f(\vec{x},\vec{u},t)=O(\exp(-\alpha|\vec{x}|^{1+\varepsilon})),\ |\vec{x}|\to\infty,\quad \alpha>0,\ \varepsilon>0, \quad (3)$$

то установление равновесия (т. е. стремление функции f к нулю при $t\to\infty$) происходит экспоненциально быстро.

Идея доказательства состоит в следующем (ниже используются обозначения из [8, 9]). Будем искать $f(\vec{x},\vec{u},t)$ в классе функций, таких, что при почти всех $\vec{u}\in\mathbf{R}^3$ и всех $t>0$ $f(\vec{x},\vec{u},t)\in\mathbb{E}'_x$, т. е. функцию f можно представить в виде [8, 9]:

$$f(\vec{x},\vec{u},t)=\sum_{r=0}^{\infty}\sum_{|q|=r}c^{(q)}(\vec{u},t)\delta^{(q)}(\vec{x}). \quad (4)$$

Подставляя это выражение в (1) и учитывая теорему 3.1 и формулу (3.3) из [9], получим для коэффициентов $c^{(q)}(\vec{u},t)$ бесконечную «зацепляющуюся» систему уравнений:

$$\frac{\partial c^{(0)}}{\partial t}=L[c^{(0)}], \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial c^{(q)}}{\partial t}=L[c^{(q)}]- \quad (5.2)$$

$$-[u_1c^{(q-I_1)}+u_2c^{(q-I_2)}+u_3c^{(q-I_3)}],\ |q|\neq 0,$$

где через I_1, I_2, I_3 обозначены мультииндексы (1, 0, 0), (0, 1, 0) и (0, 0, 1) соответственно.

Уравнения (5.2) представляют собой неоднородные уравнения вида

$$\frac{\partial c^{(q)}}{\partial t}=L[c^{(q)}]-g_q(\vec{u},t),\ |q|\neq 0,$$

где $g_q(\vec{u},t)$ – известная функция (на каждом шаге – своя). Таким образом, свойства функций $c^{(q)}(\vec{u},t)$ зависят от свойств оператора L. Последние достаточно полно изучены [1–7]. В частности, оператор L на подпространстве функций $w(\vec{u},t)$, ортогональных в смысле $L_2(\mathbf{R}^3_u)$ подпространству аддитивных инвариантов (что, по существу, эквивалентно выполнению классических законов сохранения для массы газа), порождает полугруппу $T(t), t>0$ ограниченных операторов [10], дающую решение абстрактной задачи Коши для уравнения (5.1); при этом оказывается $\|T(t)\|\leq \mathrm{const}\cdot e^{-\mu t}$, $\mu>0$. Методом, аналогичным использованному в [3–5], по индукции получаем для решений уравнений (5.2) оценку вида (норма понимается в смысле $L_2(\mathbf{R}^3_u)$): $\|c^{(q)}(t)\|\leq \mathrm{const}\cdot e^{-\gamma t}$, $\gamma>0$, где const зависит от начальной функции распределения $f_0(\vec{x},\vec{u})$ и параметров оператора L. Последняя оценка с учетом теоремы 1.8 из [8] позволяет сделать заключение об *экспоненциально быстром* (по времени) установлении равновесия в системе, описываемой задачей (1)–(2).

Точное аналитическое решение пространственно-однородного линеаризованного уравнения Больцмана

Рассмотрим задачу Коши для пространственно-однородного линеаризованного уравнения Больцмана в случае «жестких» потенциалов межмолекулярного взаимодействия $U\sim r^{-k}$, $k>4$ (обозначения и терминология здесь и далее как в [1, 2]):

$$\frac{\partial f}{\partial t}=L[f],\ t>0,\ L[f]=K[f]-\nu f, \quad (6)$$

$$f=f(\vec{u},t),\ \vec{u}\in\mathbf{R}^3,\ t>0,\quad f(\vec{u},0)=f_0(\vec{u}). \quad (7)$$

Здесь $f(\vec{u},t)$ – линеаризованная функция распределения молекул по скоростям $\vec{u}$ в момент времени t; $K[f]$ – линейный ограниченный оператор, действующий на f как функцию $\vec{u}$; $\nu=\nu(u)=O(u^{\beta})$ при $u\to\infty$, $0<\beta\leq 1$, $u=|\vec{u}|$. Свойства функции $\nu(u)$ зависят от конкретной модели межмолекулярного взаимодействия, принимаемой при выводе кинетических уравнений.

Подробности в [1, 2]. Требования «жесткости» потенциалов определяют свойства оператора $K[f]$ и функции $\nu(u)$. Эта задача хорошо изучена с математической точки зрения в отношении вопросов корректности и качественных свойств решений задачи (6)–(7), например [1, 2, 11, 12].

Однако важным не только с теоретической, но и с практической точки зрения, остается вопрос построения (хотя бы в частных случаях) точных аналитических решений этого уравнения. Это связано, в частности, с тем, что общие теоремы существования и единственности для уравнения Больцмана, ввиду его сложности, дают результаты, мало приспособленные к задачам *построения* его решений (даже приближенных). Достаточно полный обзор этих результатов можно найти в [13–15] (со времени написания этих обзоров в отношении интересующих нас вопросов мало что изменилось). Численные методы решения уравнения Больцмана основаны, как правило, на методах статистического моделирования, и далеко не всегда строго обоснованы [16, 17]. С другой стороны, наличие в запасе точных аналитических решений даже частных задач может быть полезным для анализа математических моделей более общих процессов. Настоящая статья как раз и посвящена этому, последнему вопросу – построению точного аналитического решения задачи (6)–(7).

Введем обозначение:

$$\varphi_k = \varphi_k(\vec{u}) = \left.\frac{\partial^k f}{\partial t^k}\right|_{t=0}, \; k = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots,\ \varphi_0(\vec{u}) = f_0(\vec{u}).$$

Будем искать решение в виде

$$f(\vec{u},t) = \sum_{k=0}^{\infty} (\varphi_k / k!) t^k \ . \qquad (8)$$

Если ряд (8) абсолютно и равномерно (относительно $\vec{u} \in \mathbf{R}^3$) сходится, то мы, тем самым, получаем аналитическое по t решение задачи (6)–(7). Докажем сходимость ряда (8). Перейдем в (6) к φ_k и, затем, к дискретному преобразованию Лапласа [18, гл. 8]:

$$\varphi_{k+1} = K[\varphi_k] - \nu\varphi_k \ ;$$

$$\Phi^*(q,\vec{u}) = \sum_{k=0}^{\infty} e^{-qk}\varphi_k(\vec{u}), \ \mathrm{Re}\, q > 0 \ .$$

Для $\Phi^*(q,\vec{u})$ получаем, следовательно, уравнение

$$\Phi^* = \frac{1}{\nu + e^q}(K[\Phi^*]) + \varphi_0 \equiv A_q[\Phi^*] \ .$$

Понятно, что при достаточно больших Re q оператор A_q будет сжимающим (в любом $\vec{u}$-пространстве, в котором оператор K ограничен). Отсюда следует ограниченность Φ^* по q. Но тогда существует обратное преобразование

$$\varphi_k = \frac{1}{2\pi i}\int_{s-i\pi}^{s+i\pi} \Phi^*(q,\vec{u}) e^{qk}\, dq \ ,$$

откуда следует, что

$$|\varphi_k(\vec{u})| \le \rho e^{\mu k} \ ,$$

где ρ и μ – постоянные. Отсюда немедленно получаем абсолютную и равномерную (по $\vec{u}$) сходимость ряда (8), что и требовалось. Небезынтересным является и отмеченный выше факт аналитичности решения по времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гред, Г.** Асимптотическая теория уравнения Больцмана. II [Текст] / Г. Гред // Некоторые вопросы кинетической теории газов. –М.: Мир, 1965. –С. 93–128.

2. **Черчиньяни, К.** Теория и приложения уравнения Больцмана [Текст] / К. Черчиньяни. –М.: Мир, 1978. – 480 с.

3. **Маслова, Н.Б.** Решение задачи Коши для уравнения Больцмана. I [Текст] / Н.Б. Маслова, А.Н. Фирсов // Вестн. Ленингр. ун-та. 1975. –№ 19. –С. 83–88.

4. **Маслова, Н.Б.** Решение задачи Коши для уравнения Больцмана. II [Текст] / Н.Б. Маслова, А.Н. Фирсов // Вестн. Ленингр. ун-та. –1976. –№ 1. –С. 97–103.

5. **Фирсов, А.Н.** Решение задачи Коши для нелинейного уравнения Больцмана [Текст] / А.Н. Фирсов // Аэродинамика разреженных газов. –Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1976. –Вып. 8. –С. 22–37.

6. **Маслова, Н.Б.** Математические методы исследования уравнения Больцмана [Текст] / Н.Б. Маслова // Алгебра и анализ. –Л.: 1991. –Т. 3. –Вып. 1. –С. 3–56.

7. **Maslova, N.B.** Nonlinear evolution equations. Kinetic approach [Text] / N.B. Maslova // Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences. – World Scientific Publishing Co., Inc., River Edge, NJ, 1993. –Vol. 10. –193 p.

8. **Фирсов, А.Н.** Моментное представление быстро убывающих функций и его приложения [Текст] / А.Н. Фирсов // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке: Матер. XVII Междунар. науч.-метод. конф. 11-12 февр. 2010. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –С. 114–124.

9. **Фирсов, А.Н.** Метод моментов в теории обобщенных функций и его приложения в задачах системного анализа и управления. Основы теории [Текст] / А.Н. Фирсов // Научно-технические ведомости

СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 6. –С. 74–81.

10. **Хилле, Э.** Функциональный анализ и полугруппы [Текст] / Э. Хилле, Р. Филипс. –М.: ИЛ, 1962. –830 с.

11. **Черчиньяни, К.** Математические методы в кинетической теории газов [Текст] / К. Черчиньяни. –М.: Мир, 1973. –247 с.

12. **Карлеман, Т.** Математические задачи кинетической теории газов [Текст] / Т. Карлеман. –М.: ИЛ, 1960. –124 с.

13. **Фирсов, А.Н.** Исследование решений уравнения Больцмана, близких к равновесным: Дис. ... канд. физ.-мат. наук 21.04.1976 [Текст] / А.Н. Фирсов. –Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. –129 с.

14. **Maslova, N.B.** Nonlinear evolution equations. Kinetic approach [Text] / N.B. Maslova // Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences. –Singapore: World Scientific Publishing Co., 1993. –Vol. 10. –193 p.

15. **Маслова, Н.Б.** Математические методы исследования уравнения Больцмана [Текст] / Н.Б. Маслова // Алгебра и анализ. – Л. 1991. –Т. 3. –Вып. 1. –С. 3–56.

16. Вычислительные методы в динамике разреженных газов [Текст] / Сб. статей под ред. В.П. Шидловского. –М.: Мир, 1969. –277 с.

17. **Muntz, E.R.** Rarefied gas dynamics [Text] / E.R. Muntz // Ann. Rev. Fluid Mech. –1989. –Vol. 21. –P. 387–417.

18. **Деч, Г.** Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования [Текст] / Г. Деч. –М.: Наука, 1971. – 288 с.

УДК 681.514

А.А. Шаповалов, А.Д. Курмашев

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Эффективность роботизированных технологических процессов тесно связана с точностью и скоростью операций, выполняемых промышленными роботами (ПР), и может быть повышена за счет их увеличения. Однако повышение скорости влечет за собой значительный рост динамических ошибок электроприводов координат и, как следствие, снижение качества воспроизведения программной траектории.

Оптимизацию системы управления, электроприводов или всего ПР в целом для увеличения показателей качества можно осуществить методами компьютерного моделирования. Это позволяет отказаться от проведения разносторонних многократных экспериментов на реальном оборудовании, которые могут привести к повреждениям, оказаться слишком дорогими или вовсе невозможными. Поэтому актуальна задача разработки программного обеспечения для виртуального проектирования и моделирования систем управления программным движением ПР.

Выбор программных средств компьютерного моделирования

Существует множество различных программных пакетов, предназначенных для компьютерного моделирования и исследования сложных динамических систем [9]. Их можно разделить на две основные группы (рис. 1) [7].

К первой относятся специализированные программные средства, направленные на решение конкретных прикладных задач в определенной области. Они, как правило, обладают уникальными численными методами и специальной графикой. Ко второй относятся так называемые «универсальные» программные комплексы, ориентированные на определенный класс математических моделей и способные справиться практически с любой исследовательской задачей, в которой эти модели пригодны [7].

Универсальные пакеты разделяют на математические пакеты и пакеты компонентного моделирования (см. рис. 1). В универсальных математических пакетах предполагается, что математическая модель моделируемой системы уже каким-либо образом построена и ее требуется исследовать. К этой группе можно отнести такие популярные пакеты, как MathCAD [4], Mathematica [10], MathLab, Maple, Scilab, а также любые другие, позволяющие решать системы обыкновенных

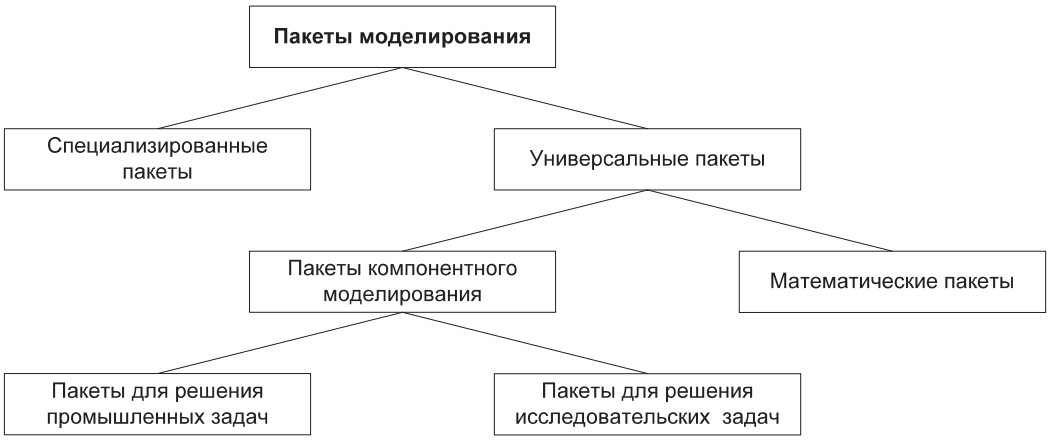


Рис. 1. Пакеты моделирования

дифференциальных и алгебро-дифференциальных уравнений. Именно такие системы, в основном, и характеризуют современные сложные динамические системы, к которым относятся, в т. ч. ПР, однако не во всех перечисленных пакетах имеется возможность их решения.

Компонентное моделирование предполагает, что описание моделируемой системы строится из компонентов как уже готовых (предоставляемые пакетом библиотеки), так и разрабатываемых пользователем. При этом совокупная математическая модель формируется пакетом автоматически.

В свою очередь пакеты компонентного моделирования по способам их применения можно также разделить на две группы [7]. К первой относятся пакеты, предназначенные для решения промышленных и исследовательских задач большими производственными коллективами, такие, как, например, CATIA. Ведущую роль здесь играет организация работ: хорошо налаженное взаимодействие между отдельными группами разработчиков, быстрый доступ к многочисленным экспериментальным данным и библиотекам компонентов, тщательное тестирование и документирование.

Основное назначение пакетов второй группы – предварительные исследования, выполняемые отдельными учеными или проектировщиками. Они уступают по количеству возможностей «промышленным» пакетам, но при этом более просты для освоения и доступны отдельному исследователю при решении относительно несложных (посильных одному разработчику) задач из практически любой прикладной области.

Анализ свойств промышленных роботов как сложных динамических систем и особенностей процесса их проектирования позволяет сформулировать к программным средствам моделирования следующие требования. Они должны:

1) быть достаточно гибкими для описания компонентов модели ПР и не приводить к появлению искусственных структурных схем, не соответствующих реальной структуре моделируемой системы;

2) позволять строить модель ПР с возможностью быстрого изменения конфигурации модели в процессе работы, например, типа и параметров системы управления или процедур решения задач кинематики и динамики;

3) осуществлять визуализацию результатов эксперимента в процессе моделирования;

4) предоставлять возможность интерактивного вмешательства в процесс моделирования;

5) предоставлять результаты моделирования в различных графических формах: диаграммы, трехмерные изображения траектории, анимация движения по траектории;

6) обеспечивать возможность интеграции в модель или среду моделирования дополнительных специализированных функций, необходимых для проведения многосторонних исследований;

7) обеспечивать возможность удобного ввода, сохранения и загрузки групп параметров, относящихся к отдельным компонентам системы;

8) обеспечивать возможность удобного ввода, сохранения и загрузки программ траекторий, их интерпретации и преобразования во входные данные для исследуемой модели;

9) быть устойчивыми по отношению к математически некорректным моделям и обеспечивать адекватную диагностику;

10) обеспечивать возможность импорта и экс-

порта результатов вычислительного эксперимента;

11) моделировать воспроизведение траектории максимально быстро;

12) предусматривать возможность легкого переноса модулей систем управления ПР на другие аппаратные средства, такие, как микроконтроллеры, а также необходимые интерфейсы для переключения с программной модели ПР на реальный экспериментальный образец ПР.

Анализ ряда известных современных программных средств автоматизации моделирования динамических систем (зарубежных, таких, как MathLab, VisSim и т. д., а также отечественных – AnyLogic [3], МВТУ [6], Stratum [8], ИСМА [13]) показывает, что ни один из этих пакетов в полной мере не отвечает этим требованиям.

Специализированное программное обеспечение для моделирования движения промышленного робота

Для решения поставленных задач разработано специализированное программное обеспечение (ПО) для компьютерного моделирования движения промышленного робота [12], удовлетворяющее перечисленным выше требованиям. ПО разработано на языке программирования C++ и является приложением Win32. Общая структурная схема ПО представлена на рис. 2.

Модули ПО по их функциональной принадлежности можно условно разделить на три основные части: модель объекта управления, система числового программного управления (ЧПУ) и интерфейс пользователя.

Разработка подробной математической модели объекта управления, учитывающей множество факторов, оказывающих влияние на динамику робота, нецелесообразна, т. к. она будет иметь низкую достоверность и приведет к увеличению времени моделирования.

С другой стороны, использование слишком простой модели, игнорирующей важнейшие свойства робота, может привести к неверной оценке возможностей алгоритмов управления. В общем случае оптимальным решением является расширение математического описания моделей в соответствии с требованиями, диктуемыми решаемой задачей.

В разработанном ПО модель ПР представлена как совокупность манипуляционного механизма и системы приводов (СП) степеней подвижности [11].

В системе ЧПУ выполняется генерирование программной траектории движения и расчет управления, подаваемого на электроприводы степеней подвижности модели ПР в соответствии с выбранными алгоритмами.

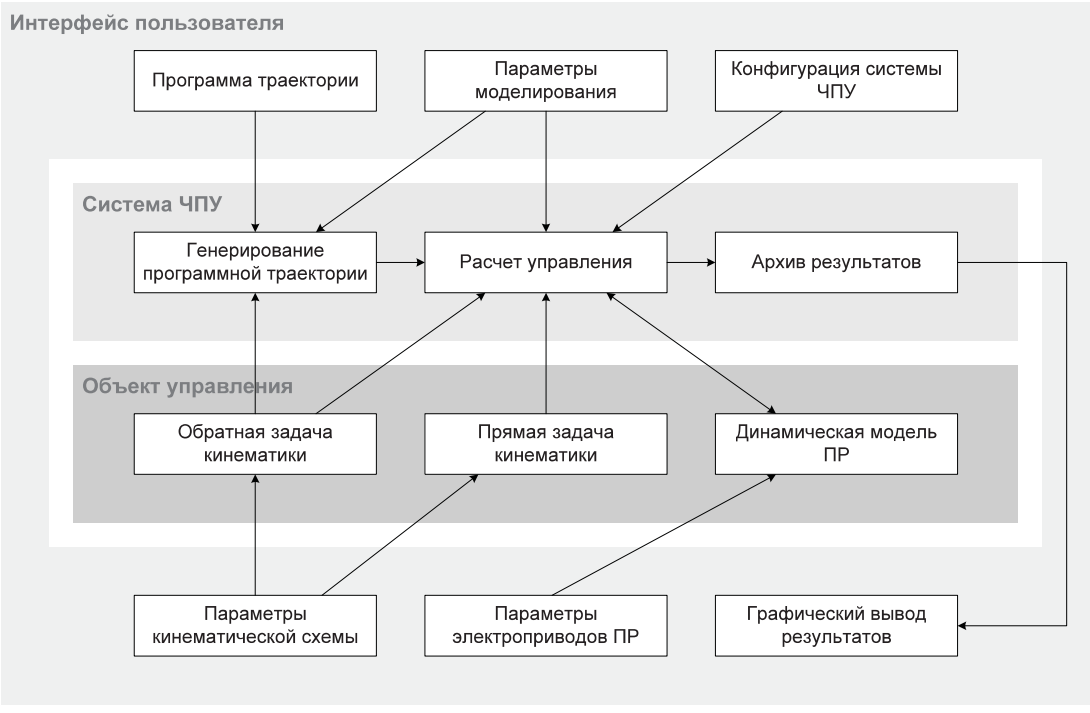


Рис. 2. Структурная схема ПО для моделирования движения ПР

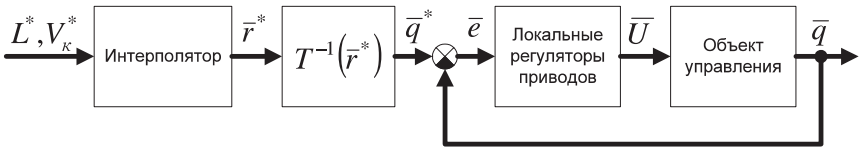


Рис. 3. Структурная схема традиционных систем ЧПУ
L^* – траектория движения; $V_к^*$ – заданная контурная скорость; $\bar{r}^*$ – вектор программных декартовых координат; $\bar{q}^*$ – вектор программных обобщенных координат; $\bar{e}$ – вектор координатных рассогласований

В ПО реализовано два типа системы ЧПУ. Первый соответствует принципу построения традиционных систем ЧПУ, использующихся для управления программным движением большинства современных промышленных роботов. В таких системах цель – воспроизведение траектории – достигается в несколько последовательных этапов (рис. 3), причем два первых этапа выполняются независимо от выполнения последних. Это делает структуру таких систем в целом разомкнутой со всеми присущими недостатками [1].

Второй тип системы управления соответствует принципу согласованного управления [11], который заключается в использовании информации об ошибке воспроизведения траектории в многосвязном общесистемном регуляторе и предусматривает согласование управляющих воздействий. Благодаря этому в системе присутствует внешний контур, делающий ее структуру замкнутой в целом. Для систем ЧПУ станков и ПР такой подход осуществляется с использованием действительных координат при решении интерполяционной задачи. Структура реализованной системы согласованного управления представлена на рис. 4.

Генерирование программной траектории движения выполняется в несколько этапов. Предварительно осуществляется интерпретация программы траектории. Текст программы преобразуется в блоки данных $L_p = \{\bar{p}_j\}$, содержащих описание каждого элемента траектории:

$$\bar{p}_j = (s, \bar{r}_0, \bar{r}_к, \bar{r}_c, d)^T, \qquad (1)$$

где s – тип элемента траектории (отрезок/дуга); $\bar{r}_0$ – декартовы координаты начальной точки элемента траектории; $\bar{r}_к$ – декартовы координаты конечной точки элемента траектории; $\bar{r}_c$ – декартовы координаты центра окружности (только для дуги); d – направление движения по окружности (только для дуги).

Далее, в зависимости от выбранного типа системы управления выполняется соответствующее преобразование траектории. В традиционной системе ЧПУ для каждого элемента траектории по методу цифрового дифференциального анализатора рассчитывается массив декартовых координат:

$$L^* = \{\bar{r} \in R^3\}: \begin{cases} x^*_{i+1} = x^*_i + V^*_{кx,i+1} T_к, \\ y^*_{i+1} = y^*_i + V^*_{кy,i+1} T_к, \\ z^*_{i+1} = z^*_i + V^*_{кz,i+1} T_к, \end{cases} \qquad (2)$$

где $T_к$ – период квантования; $V^*_к = (V^*_{кx}, V^*_{кy}, V^*_{кz})^T$. Массивы объединяются в единый блок данных. Далее, посредством решения обратной задачи кинематики вычисляется траектория в обобщенных координатах:

$$Q^* = \{\bar{q}_j \in R^3\}, \ \bar{q}_j = (q_1, q_2, ..., q_m)^T. \qquad (3)$$

В системе согласованного управления для элементов траектории «дуга окружности» к параметрам (1) дополнительно рассчитываются радиус окружности R и направляющий вектор секущей плоскости окружности $\bar{n}_п$:

$$\bar{p}_j{}' = (s, \bar{r}_0, \bar{r}_к, \bar{r}_c, d, \bar{n}_п, R)^T. \qquad (4)$$

Элементы траектории «отрезок прямой» остаются в виде (1). Расчет управления выполняется

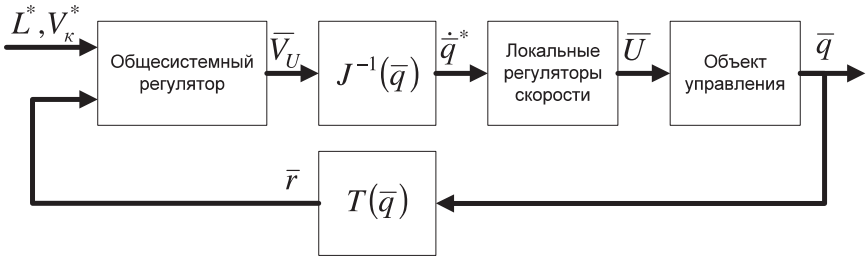


Рис. 4. Структурная схема системы согласованного управления
$\bar{V}_U$ – вектор управления движением по траектории в декартовом пространстве

согласно конфигурации системы ЧПУ. Алгоритмы программ обработки данных в традиционной системе ЧПУ и системе согласованного управления изображены на рис. 5 и 6.

На рис. 5 следующие обозначения: $\mathbf{S}_{ССУ}$ – матрица параметров системы согласованного управления; $\mathbf{S}_{мех}$ – матрица параметров кинематической схемы; $\mathbf{S}_{д}$ – матрица параметров электродвигате-

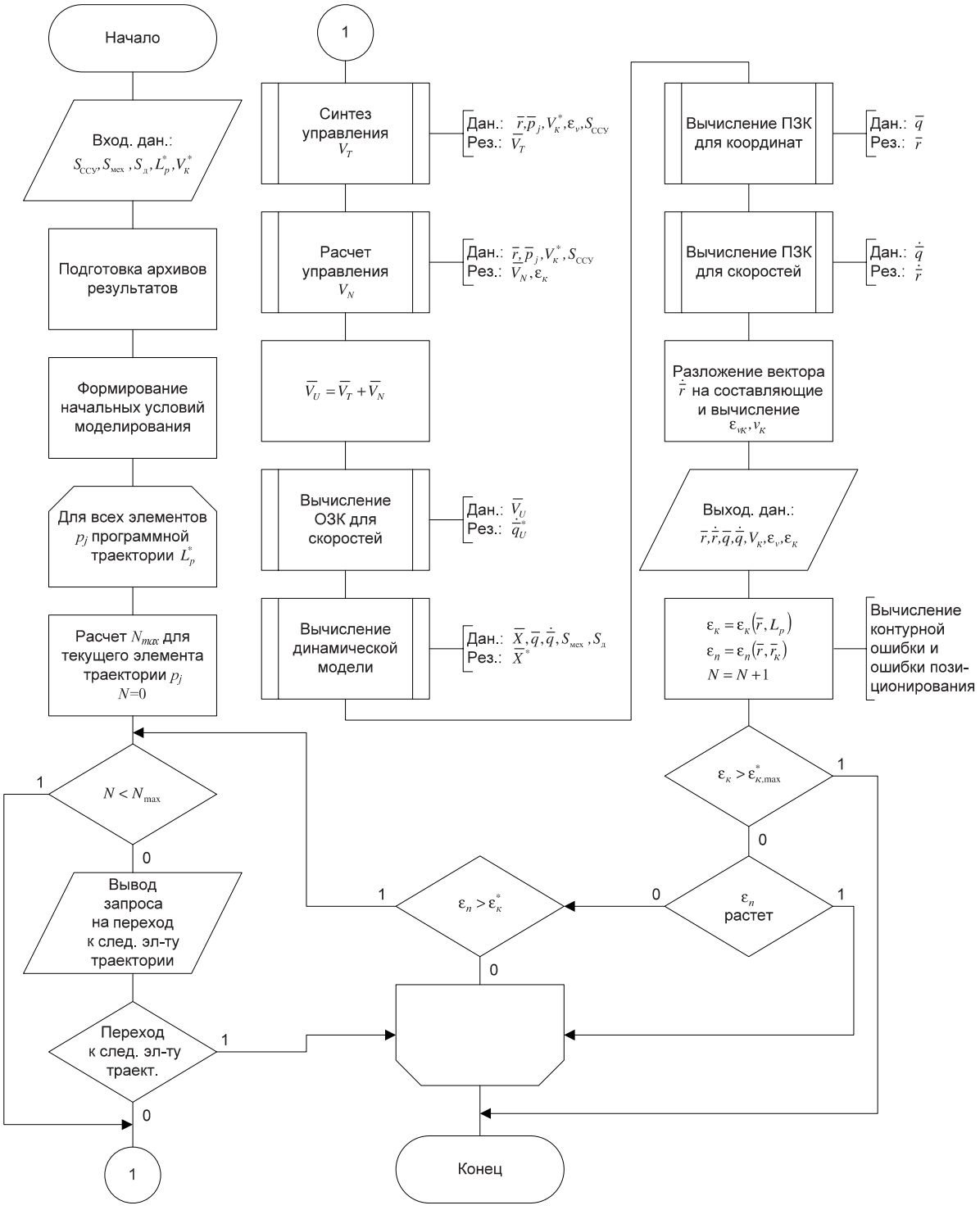


Рис. 5. Алгоритм программы обработки данных в системе согласованного управления

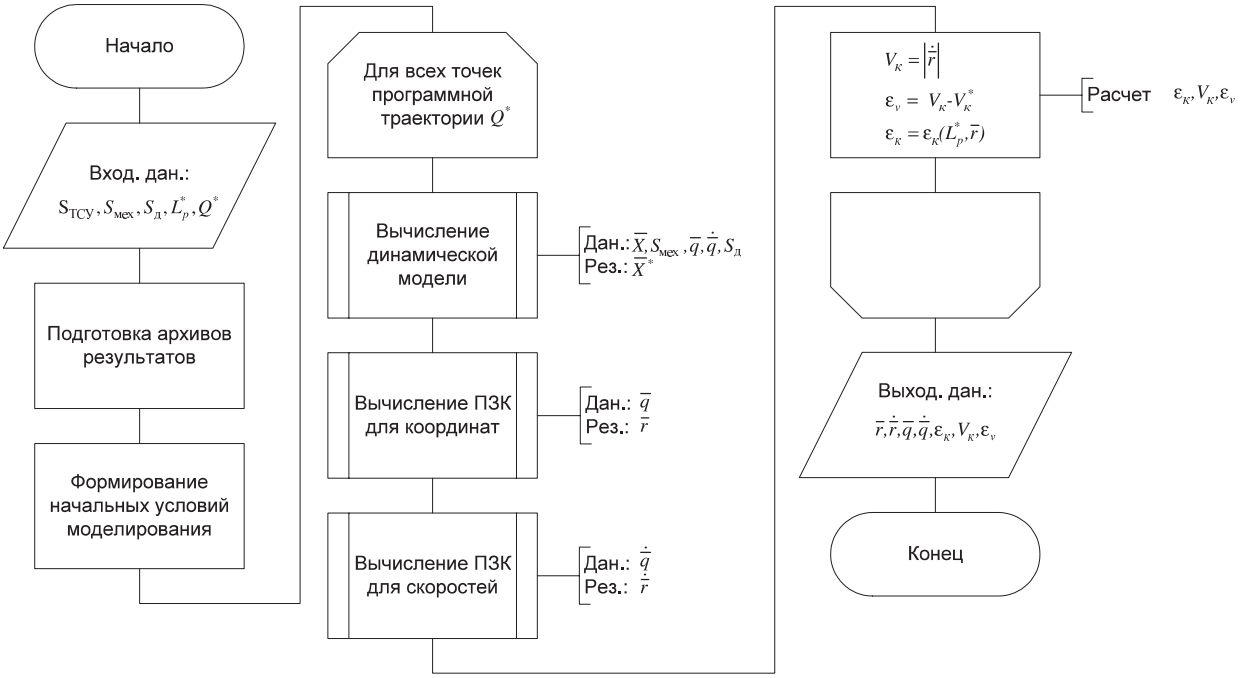


Рис. 6. Алгоритм программы обработки данных в традиционной системе ЧПУ:
$\mathbf{S}_{ТСУ}$ – матрица параметров традиционной системы ЧПУ

лей степеней подвижности; N_{max}, N – максимальное и текущее количество точек элемента траектории; $\varepsilon_к$ – контурная ошибка; $\varepsilon_к^*$ – требуемая точность воспроизведения; $\varepsilon_{кmax}^*$ – максимально допустимое отклонение от программной траектории; $\varepsilon_п^*$ – ошибка позиционирования; ε_v^* – ошибка контурной скорости

Интерфейс пользователя включает в себя графический интерфейс (рис. 7), обеспечивающий ввод и вывод данных, модули проверки и интерпретации входных данных. Для моделирования ПО требуется пять категорий данных (см. рис. 2): программа траектории, параметры кинематической схемы, параметры электродвигателей, конфигурация системы ЧПУ и параметры моделирования.

Программа траектории представляет собой текстовое описание контура, который должен воспроизвести манипулятор. В программе могут быть заданы элементы траектории отрезок пря-

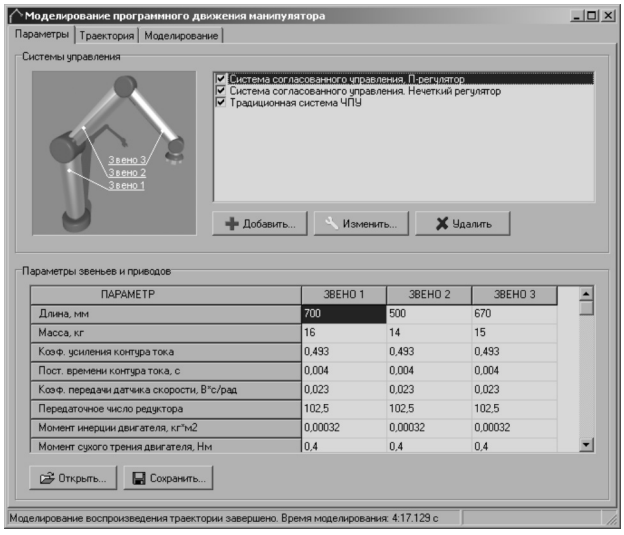


Рис. 7. Главное окно программы моделирования

мой и дуга окружности. Отрезок прямой задается соответствующей командой с координатами конечной точки (начальная точка известна – это конечная точка предыдущего элемента траектории или начальная точка траектории), дуга окружности – командой, конечной точкой, точкой центра окружности и направлением движения по окружности. Не могут быть заданы элементы дуга окружности 180° и 360°.

В качестве параметров кинематической схемы ПР задаются длины l_j и массы m_j звеньев, ограничения на перемещения q_0, $q_к$:

$$\mathbf{S}_{\text{мех}} = \{S_{\text{мех},j}\},\ S_{\text{мех},j} = (l_j, m_j, q_0, q_к),\ j = \overline{1,m}. \quad (5)$$

Для электродвигателей каждой степени подвижности ПР задается следующий набор параметров:

$$\mathbf{S}_д = \{S_{д,j}\},\ S_{д,j} = (K_т, T_{цт}, K_{дс}, J_д, M_{тр}, i, \delta)^T,\ j = \overline{1,m}, \quad (6)$$

где $K_т$ – коэффициент передачи контура тока; $T_{цт}$ – эквивалентная постоянная времени контура тока; $K_{дс}$ – коэффициент передачи датчика скорости; $J_д$ – суммарный момент инерции двигателя; $M_{тр}$ – момент сухого трения; i – передаточное число редуктора; 2δ – величина люфта.

Программный модуль «Конфигурация системы ЧПУ» позволяет выбрать структуру системы, соответствующую разным принципам управления – традиционное ЧПУ или согласованное управление, и задать параметры соответствующих регуляторов. Для традиционной системы ЧПУ это регуляторы положения и скорости. В качестве регуляторов скорости могут использоваться ПИД-регуляторы:

$$\mathbf{S}_{рс} = \{S_{рс,j}\},\ S_{рс,j} = (K_п, K_и, K_д)^T,\ \ j = \overline{1,m}, \quad (7)$$

где $\mathbf{S}_{рс}$ – матрица параметров регуляторов скорости; $K_п, K_и, K_д$ – параметры ПИД-регулятора. Но изменяя указанные параметры можно получить П-, ПИ-, ПД-регуляторы. Параметры регуляторов положения для каждой степени подвижности задаются в массиве:

$$\mathbf{S}_{ТСУ} = \{S_{ТСУ,j}\},\ S_{ТСУ,j} = (K_п, T_и)^T,\ \ j = \overline{1,m}. \quad (8)$$

В структуре системы согласованного управления регуляторы положения отсутствуют. Управление контурным движением осуществляется за счет общесистемных регуляторов траектории (РТ), позиционирования и контурной скорости (РКС). В ПО предусмотрены три типа РТ: П-регулятор по контурной ошибке, П-регулятор по отклонениям от задающих поверхностей, нечеткий регулятор. Типы и параметры регуляторов задаются вектором:

$$S_{ССУ} = (K_T, T_T, K_N, K_{N1}, K_{N2}, T_N, \mathbf{I}_f, \mathbf{O}_f, \mathbf{R}_f, \varepsilon^*_к, \varepsilon^*_{к,max}), \quad (9)$$

где K_T – коэф. усиления РКС; T_T – пост. времени интегрирования РКС; K_N, K_{N1}, K_{N2} – коэф. усиления для различных типов РТ; T_N – пост. времени интегрирования РТ; $\mathbf{I}_f$, $\mathbf{O}_f$ – матрицы описания входных и выходных лингвистических переменных нечеткого регулятора; $\mathbf{R}_f$ – матрица лингвистических правил нечеткого регулятора.

В ПО предусмотрено решение следующих задач:

моделирование движения манипулятора по программной траектории;

расчет диаграммы добротности воспроизведения программной траектории;

оптимизация параметров регуляторов систем управления.

При моделировании движения манипулятора по программной траектории в архив результатов сохраняются следующие данные:

точки программной и действительной траектории в декартовых координатах;

точки программной и действительной траектории в обобщенных координатах;

мгновенные значения контурной скорости;

мгновенные значения ошибки контурной скорости ε_v;

мгновенные значения контурной ошибки $\varepsilon_к$;

значения добротности воспроизведения траектории $D_{v\varepsilon}$;

анимационное движение манипулятора в трехмерном пространстве.

При расчете диаграммы добротности воспроизведения [1]

$$D_{v\varepsilon} = \frac{\left|\bar{V}_к(t)\right|}{\left|\bar{\varepsilon}_к(t)\right|} = \frac{V_к}{\varepsilon_к} \quad (10)$$

выполняется многократное моделирование движения манипулятора по программной траектории для заданного диапазона контурной скорости. Добротность $D_{v\varepsilon}$ может вычисляться как $D_{v\varepsilon} = V_к / \varepsilon_{кср}$ или как $D_{v\varepsilon} = V_к / \varepsilon_{кmax}$, где $\varepsilon_{кср}$ – средняя контурная ошибка по траектории, являю-

а) *б*)

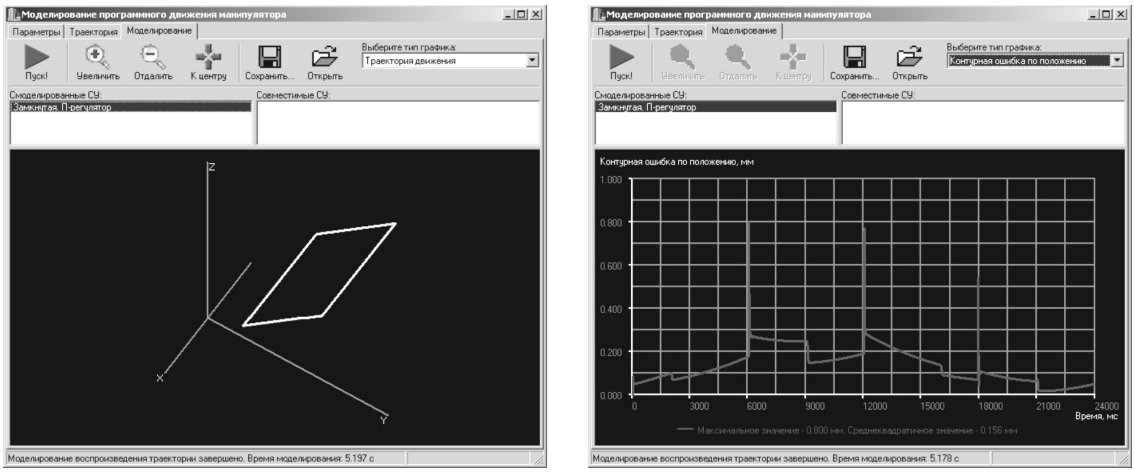


Рис. 8. Графическое отображение результатов моделирования средствами программы моделирования: *а* – траектория движения; *б* – диаграмма контурной ошибки

щаяся интегральной характеристикой качества воспроизведения гладких участков траекторий; $\varepsilon_{k\max}$ – максимальное отклонение от программной траектории, характеризующее качество воспроизведения изломов траектории. В архив результатов сохраняются значения добротности воспроизведения траектории $D_{v\varepsilon}$ и значения контурной скорости, для которых они получены.

Оптимизация параметров регуляторов может быть выполнена по методу циклического покоординатного спуска или по методу перебора. Предусмотрена возможность выбора только тех параметров, которые требуется оптимизировать. Для каждого задается диапазон и шаг оптимизации. Критерием качества является характеристика добротности на заданном диапазоне контурной скорости.

Полученные в процессе моделирования результаты могут быть отображены графическими средствами ПО или сохранены в файлы формата CSV. Координаты траектории, изменение контурных ошибок и добротности представляются в виде диаграмм и графиков, траектории – в виде трехмерных контуров с возможностью изменения углов обзора. Дополнительно с отображением траектории может быть включен режим анимированного движения манипулятора.

Результаты вычислительных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

предложенное ПО обладает высокой гибкостью и широкими возможностями выбора структур и параметров объекта и систем управления, представления результатов моделирования;

разработанное ПО может быть использовано и для управления ПР в реальном масштабе времени, это достигается переносом его на необходимые аппаратные средства и заменой программного модуля динамической модели манипулятора на реальный манипулятор;

предложенное ПО может быть расширено, например, за счет программных модулей, моделирующих структуру и параметры систем управления ПР в соответствии с требованиями исследователя;

основная цель разработки ПО достигнута: проведены сравнительные исследования различных структур систем управления электроприводами ПР;

результаты исследований показали высокую потенциальную по критерию добротности воспроизведения траектории динамическую точность системы согласованного управления электроприводами ПР по сравнению с традиционной системой ЧПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляев, А.Н.** Замкнутые системы ЧПУ роботами [Текст] / А.Н. Беляев, А.Д. Курмашев, О.А. Соколов // Системы управления и электроприводы роботов: Межвуз. сб. науч. тр. –Воронеж: Изд-во Воронеж. политехн. ин-та, 1989. –С. 66–73.

2. **Джон, Г. Мэтьюз.** Численные методы. Использование MATLAB [Текст] / Мэтьюз Джон Г., Куртис Д. Финк; 3-е изд. –М.: Вильямс, 2001. –720 с.

3. **Карпова, Ю.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст] /

Ю. Карпова. –СПб.: BHV, 2006. –400 с.

4. **Кирьянов, Д.В.** Mathcad 14 [Текст] / Д.В. Кирьянов. –СПб.: BHV, 2007. –704 с.

5. **Козлов, В.В.** Динамика управления роботами [Текст] / В.В. Козлов, В.П. Макарычев, А.В. Тимофеев, Е.И. Юревич; Под ред. Е.И. Юревича. –М.: Наука, 1984. –336 с.

6. **Козлов О.С.** Цифровое моделирование следящих приводов. [Текст] / О.С. Козлов, В.С. Медведев; Под ред. Б.К. Чемоданова // В кн.: Следящие приводы. В 3-х т. –М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. –Т.1. –С. 711–806.

7. **Колесов, Ю.Б.** Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем [Текст] / Ю.Б. Колесов. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. –239 с.

8. **Мухин, О.И.** Универсальная инструментальная среда «Stratum Computer» – программный продукт нового поколения [Текст] / О.И. Мухин // Проблемы информатизации высшей школы: бюллетень Госкомвуза РФ. –М.: Изд-во ГосНИИ СИ, 1995. –Вып.2. –С. 10-1–10-4.

9. **Рыжиков, Ю.И.** Имитационное моделирование. Теория и технологии [Текст] / Ю.И. Рыжиков. –СПб.: Корона Принт; М.: Альтекс, 2004. –384 с.

10. **Чарльз Генри Эдвардс.** Дифференциальные уравнения и проблема собственных значений: моделирование и вычисление с помощью Mathematica, Maple и MATLAB [Текст] / Эдвардс Чарльз Генри, Дэвид Э. Пенни; 3-е изд. –М.: Вильямс, 2007.

11. **Шаповалов, А.А.** Согласованное управление электроприводами промышленного робота [Текст] / А.А. Шаповалов, А.Д. Курмашев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. –№3 (59). –С.257–264.

12. **Шаповалов, А.А.** Система моделирования воспроизведения программного движения промышленного робота [Текст] / А. А. Шаповалов, А. Д. Курмашев // Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2010611720. –М.: Роспатент, 2009.

13. **Шорников, Ю.В.** Моделирование сложных динамических и гибридных систем в ИСМА [Текст] / Ю.В. Шорников // Научный вестник НГТУ. –2007. –№ 1(26). –С. 79–88.

УДК 681.3.06(075.8)

Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков

ОТ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДО ПРОМЫШЛЕННОЙ ВЕРСИИ: НА ПРИМЕРЕ СРЕДЫ ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ RAND MODEL DESIGNER

Воспользуемся случаем и отчитаемся за пятнадцать лет работы над средой визуального моделирования сложных динамических систем, которая из чисто научной разработки, «сама собой», постепенно превратилась в среду промышленного проектирования сложных технических устройств на базе математического моделирования.

Термин «проектирование на базе моделирования» был, видимо, впервые введен сотрудниками корпорации MathWorks в начале XXI в., когда они представили новую технологию проектирования встроенных систем [1], использующую Matlab, Simulink, StateFlow и другие компоненты. Эта технология позволяет большому коллективу так работать с постепенно усложняющейся визуальной компьютерной моделью («исполняемой спецификацией») и добиваться такого соответствия спецификации, что на выходе технологической цепочки появляется опытный образец, практически не требующий доработки (так утверждают специалисты MathWorks). Подчеркнем, что речь идет о проектировании устройств, в которых исполняемая компьютерная модель используется как компонент, поставляющий необходимую информацию остальным программно-аппаратным компонентам в реальном времени (встраиваемые системы реального времени). Это действительно новая технология, и она требует решения ряда теоретических и технологических вопросов. Перефразируя академика Н.Н. Яненко [2], можно сказать, что разработка таких инновационных технологий становится сейчас предметом научных исследований.

Назначение и особенности

Rand Model Designer (RMD – www.rand-service.com) или промышленная версия

«академического» пакета MvStudium (www.mvstudium.com) – это визуальная среда объектно-ориентированного моделирования сложных природных или технических систем, использующая особые типы математических моделей – гибридные системы.

С помощью гибридных систем удобно моделировать реальные объекты, характеризующиеся многорежимным (мультимодальным), событийно-управляемым поведением. В гибридных системах различают локальные или непрерывные поведения (режимы) и дискретные действия – алгоритмы формирования данных, необходимых к переходу к иному режиму. Гибридные системы – это математические модели, позволяющие в единой форме описать локальные поведения кусочно-непрерывных динамических систем, алгоритмы смены поведений и алгоритмы обработки и формирования новых данных. Визуальная форма гибридных систем называется *гибридным автоматом*. Для описания непрерывных поведений гибридного автомата в языке моделирования MVL (Model Vision Language) используется привычная математическая форма записи систем обыкновенных дифференциально-алгебраических уравнений, не разрешенных относительно производных. Анализ корректности написанных пользователем уравнений пакет пытается выполнить автоматически. Для описания дискретных аспектов поведения используются расширенные диаграммы состояний языка UML.

Язык моделирования MVL поддерживает компонентное моделирование с направленными и ненаправленными связями между компонентами. Каждая компонента представляет собой открытую гибридную систему. Гибридная система называется *открытой*, если она содержит переменные, которые могут быть использованы в уравнениях связи. Совокупность компонент и их связи образуют топологическую схему модели. Компоненты и их собственные уравнения, дополненные уравнениями связи компонент, образуют совокупную систему или полную модель изучаемой системы. Наличие гибридных автоматов в компонентах приводит к тому, что текущая топологическая схема и текущая совокупная система зависят от происходящих событий и являются событийно-зависимыми реализациями полной топологической схемы и совокупной системы. В RMD текущая совокупная система уравнений модели формируется автоматически на этапе исполнения и преобразуется к форме, приемлемой для используемых численных методов. Преобразование системы связано также с желанием уменьшить число решаемых уравнений, понизить индекс системы, найти наиболее эффективный для конкретного случая численный или символьный «решатель».

Система RMD позволяет автоматически создавать два вида выполняемых моделей:

визуальную модель – независимое приложение Windows с широким набором возможностей интерактивной отладки и визуализации результатов моделирования;

встраиваемую модель – динамическую библиотеку Windows, взаимодействующую по определенному интерфейсу с внешним приложением.

Программные продукты семейства Model Vision отличается от других визуальных сред моделирования следующим.

1. Предпочтение отдается моделям, которые могут быть представлены в форме систем «событийно-зависимых» алгебро-дифференциальных уравнений: число, тип, форма записи уравнений зависят от режима модели. Для таких моделей термин «корректность» может трактоваться как наличие единственного решения уравнений, описывающих поведение системы. Это достаточно жесткое требование, которое и нарушается, и трудно проверяется для многих практических инженерных задач, но к этому хочется стремиться. Сравните этот тип моделей с другим полюсом такой классификации (имитационным моделированием) – алгоритмическими моделями, которые обычно используются для моделирования «трудно-формализуемых» объектов и создаются, по сути, для того, чтобы в последствии стать хорошо определенными математическим моделями.

2. Среда с самого начала ориентирована на гибридные модели [7], что позволило в рамках одной модели и одного языка моделирования рассматривать все интересующие исследователя режимы работы проектируемого устройства. Этот выбор привел к тому, что создавать текущие совокупные системы и преобразовывать их приходится на этапе исполнения.

3. Промышленные системы невозможно проектировать, не используя компонентный подход. Исторически различают две технологии компонентного моделирования: «блочное» и «физическое моделирование». В «блочной» технологии (Simulink) различают направление передачи ин-

Таблица 1

История семейства Model Vision в публикациях

Год	Название	Документация и книги авторов среды	Книги, посвященные среде	Индекс цитирования*
1990–1999	Model Vision 2.1	1. Курочкин Е.П., Колесов Ю.Б. Технология программирования сложных систем управления. –М., 1990. 2. Инихова М.А., Инихов Д.Б., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Model Vision for Windows. «MV SOFT». –М. –СПб., 1996. 3. Веселова И.Ю., Сениченков Ю.Б. Вычислительный практикум. –СПб.: Изд-во СПбПУ, 1999	1. Иванов В.Б. Компьютерное моделирование и программирование: Учеб. пособие. –Иркутск, 2003	1/2
1996–2001	Model Vision Studium 3.0	4. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Визуальное моделирование. –СПб.: Изд-во Профессионал, 2000. –241 с. 5. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.. Практическое моделирование сложных динамических систем. –СПб.: БХВ-ПИТЕР, 2002. –445 с.	2. Гончаренко Г.Г. Компьютерные технологии визуального моделирования в гироскопии и навигации: Учеб. пособие. –М.: Изд-во МАИ, 2005. –148 с.	1/2
2000–2005	Model Vision Studium 4.0	6. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. –238 с. 7. Сениченков Ю.Б. Численное моделирование гибридных систем. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. –206 с. 8. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: Учеб. пособие. –СПб.: БХВ-ПИТЕР, 2006. –224 с. 9. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход: Учеб. пособие. –СПб.: БХВ-ПИТЕР, 2006. –192 с. 10. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Практикум по компьютерному моделированию: Учеб. пособие. –СПб.: БХВ-ПИТЕР, 2007. –352 с.	3. Рукин В.Л. Исследование динамических характеристик типовых звеньев: Метод. указания. –СПб.: Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2007. – 18 с.	1/5
2006	Model Vision Studium 6.0	Беневольский С.В., Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование в задачах внешней баллистики. –СПб.: Изд-во ПУ, 2009. –126 с.		0/1
2009	Rand Model Designer		4. Баранова Е.С., Баранов В.А. Руководство пользователя. –Rand-service, 2010. (www.rand-service-com)	0/1

***** Индекс цитирования в данном случае трактуется вольно и означает, сколько сторонних публикаций было создано «в ответ» на одну нашу версию пакета.

формации в компоненте: от входа к выходу, свойственное системам управления. В чисто «физической» технологии (Omola, Dymola) это сделать невозможно, т. к. все компоненты в этом смысле равноправны – при рассмотрении электрической цепи бессмысленно ставить вопрос о передачи информации между источником питания и нагрузкой. Однако в последнее время эти различия обсуждаются чаще разработчиками сред визуального моделирования, пользователи же предпочитают иметь в своем распоряжении обе технологии, или точнее – «универсальную» технологию. Особенностью сред семейства Model Vision является то, что входной язык допускает использование обеих технологий, при этом любая компонента может содержать гибридный автомат.

История создания среды

Среда (табл. 1) Model Vision 2.1 была задумана и в первоначальном варианте создана Ю.Б. Колесовым в начале 90-х гг. XX в.

Она была реализована так же, как сегодня реализована связка Simulink-StateFlow, т. е. существовали непрерывные и дискретные компоненты, и дискретные компоненты анализировали состояние и управляли режимами непрерывной составляющей модели. В семействе Model Vision от этого подхода отказались, начиная с версии Model Vision Studium 3.0. Разработчики Simulink-StateFlow сохранили старый подход (для совместимости с ранними версиями) и добавили новые возможности, базирующиеся на машинах состояний – теперь состоянию можно «приписать» или уравнения, или модель Simulink, что разрешено «стандартом» UML.

В табл. 2 использован российский индекс цитирования: в первой колонке число работ автора Ю.Б. Сениченкова, а во второй – Ю.Б. Колесова. Учитывая, что у авторов практически все работы совместные, совпадение очень хорошее.

Таблица 2

Индекс цитирования

Российский индекс цитирования научных работ		
2003	1	0
2005	3	3
2006	7	6
2007	10	12
2008	8	12
2009	9	10
2010	8	12

Естественно задаться вопросом: а зачем приводить все эти таблицы и цифры. Ответ прост. Сейчас в мире проявляется повышенный интерес к средам моделирования различного типа. Практически все коллективы разработчиков проходят путь от «академической стадии» до «промышленной». На ранних этапах («академическая стадия») среды создаются небольшими коллективами, в основном преподавателями университетов (проект Omola, Dymola). Наличие финансовой поддержки позволяет иногда подключать к разработке несколько университетов (проект Modelica). При отсутствии таковой развитие среды также возможно, если объявить ее открытой. На ранних этапах новым «некоммерческим» средам огромную помощь оказывают конкретные пользователи, опять же их коллеги из университетов – они помогают распространению и совершенствованию пакета. Наш коллектив прошел этот путь за пятнадцать лет. Коллективы, сразу же ориентирующиеся на коммерческое распространение продукта, конечно же, выходят на рынок быстрее. Возможно, приведенные цифры помогут молодым разработчикам правильно выбрать свой путь.

Преодолеть эти организационные трудности можно пока только «снизу». В начале этого года было зарегистрировано «Национальное общество имитационного моделирования» (или на бюрократическом языке «Некоммерческое партнерство», гос. рег. № 111 78000 1065 от 21.02.2011). Президентом общества избран член-корреспондент РАН Р.М. Юсупов, председателем правления – А.М. Плотников. Первоначальные задачи общества – объединение всех специалистов как пользователей, так и разработчиков, занимающихся моделированием, в единый коллектив, что будет способствовать более успешной пропаганде моделирования в нашей стране, а также проведение российских и международных конференций. Обе задачи чрезвычайно важны: мы плохо представляем, что делается у нас в стране, а это неуважение к себе, и, как следствие, в европейском журнале «Simulation Europe News» представлены все общества моделирования стран СНГ, кроме России. Информация о первых планируемых конференциях представлена в приложении 1 и 2.

Современные среды визуального моделирования

Воспроизведем данные (табл. 3) о современных пакетах моделирования сложных динами-

Таблица 3

Сравнительное исследование средств моделирования, 2009

	MS - Model Sorting	ED -Event Description	SEH -State Event Handling	DAE - DAE Solver	IR - Index Reduction	PM-T - Physical Modelling -Text	PM-G - Physical Modelling -Graphics	VIS – 'Onlie' - Visualisation	MOD – Modelica Modelling	SC-T – State Chart – Modelling - Text	SC-G – State Chart Modelling - Graphics	SD – Structural Dynamic Systems	FA – Frequency Analysis	ENV – Extended Environment
MATLAB	no	no	(yes)	(yes)	no	no	no	(yes)	no	no	no	yes	yes	yes
Simulink	yes	(yes)	(yes)	(yes)	no	no	(no)	(yes)	no	no	no	no	yes	(yes)
MATLAB / Simulink	yes	yes	yes	(yes)	no	no	(no)	(yes)	no	no	no	yes	yes	yes
Simulink / Stateflow	yes	yes	yes	yes	no	no	(no)	(yes)	no	(yes)	yes	no	yes	(yes)
Simulink / Simscape	yes	yes	yes	yes	(yes)	yes	yes	(yes)	(no)	no	no	no	yes	(yes)
Simulink / Simscape/ Stateflow	yes	yes	yes	yes	(yes)	yes	yes	(yes)	(no)	(yes)	yes	no	yes	(yes)
ML/Simulink Simscape Stateflow	yes	yes	yes	yes	(yes)	yes	yes	(yes)	(no)	(yes)	yes	yes	yes	yes
ACSL	yes	yes	yes	yes	no	no	(no)	(yes)	no	no	no	no	yes	yes
Dymola	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	(yes)	(yes)	no	(no)	(yes)
Math Modelica	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	(yes)	yes	(no)	(yes)	no	(no)	(no)
MathModelica/ Mathematica	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	(no)	(yes)	yes	yes	yes
Mosilab	yes	yes	yes	yes	(no)	yes	yes	(no)	(yes)	yes	yes	yes	no	(yes)
Open Modelica	yes	yes	yes	yes	yes	yes	(no)	(no)	yes	(no)	(yes)	no	no	no
SimulationX	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	(no)	(yes)	no	yes	(yes)
AnyLogic	yes	yes	(yes)	(yes)	no	no	no	yes	no	yes	yes	yes	no	no
Model Vision	yes	yes	yes	yes	yes	yes	no	yes	no	yes	yes	yes	yes	no
Scilab	no	no	(yes)	(yes)	no	no	no	(yes)	no	no	no	yes	yes	yes
Scicos	yes	(yes)	yes	yes	(yes)	yes	yes	(yes)	(yes)	yes	(yes)	no	no	no
Scilab / Scicos	yes	yes	yes	yes	(yes)	yes	yes	(yes)	(yes)	yes	(yes)	yes	yes	yes
MapleSim	yes	(yes)	(yes)	yes	yes	yes	yes	yes	yes	no	no	(yes)	(yes)	yes

Availability of *Classical and Structural Features* in selected simulators;
yes / no available / not available
(yes) / (no) available, but difficult to use / yet not available, but foreseen or way around.

ческих систем [3]. Во-первых, это достаточно свежий список, а, во-вторых, и здесь уже не грех похвастаться: два пакета из числа перечисленных (Model Vision Studium и AnyLogic) имеют прямое отношение к факультету технической кибернетики. Более того, на факультете на кафедре РВКС ведутся все работы по трем направлениям современного моделирования (см. работы Р.И. Ивановского [4], Ю.Г. Карпова [5], Ю.Б. Колесова и Ю.Б. Сениченкова (табл. 3)): моделирование сложных динамических систем, и митационное моделирование, статистическое моделирование.

Строчки этой таблицы – известные в Европе пакеты моделирования. Еще раз подчеркнем, что в основном по нашей собственной вине российские пакеты представлены столь скупо. У нас богатейшая история моделирования, интересные теоретические работы, пионерские «неграфические» пакеты конца XX в. [6]. Столбцы – свойства пакетов.

Классификация сред

Глядя на табл. 3, уместно сказать о решении одной важной теоретической задачи – создании стандарта средств моделирования. Стандарт – это фиксация достижений и выбор направления развития, гарантия качества и совместимости моделей, дальнейшее успешное применение моделирования в промышленности.

Существующий стандарт для сред моделирования давно устарел [3]. Отсутствие стандарта приводит, прежде всего, к тому, что модели, созданные в различных средах, «невоспроизводимы». Недаром журнал SNE создал библиотеку «типичных моделей», разработанных в различных средах. Цель – продемонстрировать особенности технологий моделирования, а критерий правильности – совпадение результатов вычислений. В приведенной выше табл. 3 имеется графа, учитывающая наличие «конвертора» моделей. Проблема конвертирования, точнее – отсутствие конверторов, это следствие нерешенности проблемы идентичности моделей, описанных на различных языках моделирования.

Современные среды можно классифицировать по следующим признакам:

- тип модели (математические, алгоритмические);
- возможность компонентного моделирования (однокомпонентные, многокомпонентные);
- степень поддержки объектно-ориентированного подхода (классы, наследование, полиморфизм);
- поддержка возможности работать большими коллективами (исследовательский, промышленный);
- совместимость с другими средами;
- возможность работать в реальном времени с конкретными классами задач.

Разработка классификации приведет к решению еще одной важной задачи – созданию перечня и сравнительному анализу ключевых алгоритмов, использующихся в современных средах визуального моделирования, а также выработке стандартных требований к типичным составляющим (компиляторы, редакторы, средства визуализации).

Массовое использование – образование

Первый опыт массового использования продуктов семейства Model Vision связан с образованием. Образовательные учреждения нуждаются в виртуальных лабораториях по различным дисциплинам, однако как всегда возникают организационные трудности.

В начале XXI века никому и в голову не приходило покупать программное обеспечение. Именно поэтому свою первую книгу, как и все последующие, мы снабдили диском с несколько ограниченными по возможностям версиями пакета. Оказалось, что ими пользуются до сих пор, несмотря на то, что с момента выхода первой книги прошло уже десять лет. Такое решение лишило нас финансовой поддержки пользователей.

Применение пакетов моделирования в школах на уроках информатики (как пример объектно-ориентированного подхода), физики (для самостоятельной подготовки к реальным натурным экспериментам, хотя здесь возможности шире (см. сайт ассоциации CoLos, работу [8]), биологии (для демонстрации возможностей математического моделирования) натолкнулось на отсутствие:

утвержденных планов, позволяющих использовать такой вид лабораторий;

рекомендованных Министерством виртуальных лабораторных работ;

учебников (споры о книге [6] до сих пор не утихают).

Применение пакетов моделирования в университетах куда перспективнее: с формальной точки зрения препятствий нет. Но существует

другая проблема: преподавателей, ищущих различные эффективные средства обучения и самостоятельного изучения сложных явлений, единицы. Любые виды материального поощрения этой деятельности отсутствуют. Результат очевиден: если в США сотни сайтов (см. проект Physlets) с библиотеками моделей по той же физике, с десятками учебников, то мы продолжаем до сих пор обсуждать возможность использования виртуальных лабораторий. Однако лед тронулся, эти проблемы стали обсуждать на конференциях, посвященных применению компьютерных инструментов в образовании. Журнал «Компьютерные инструменты в образовании» вошел в перечень ВАК, а для получения соответствующей квалификации школьному учителю требуется журнальная публикация.

В последние годы изменилась и ситуация с продажей программного обеспечения. Для нашего научного коллектива это выразилось в том, что распространением нового продукта семейства Model Vision занялась компания Компания Rand-service (www.rand-sevice.com). Заставка ее нового сайта приведена ниже.

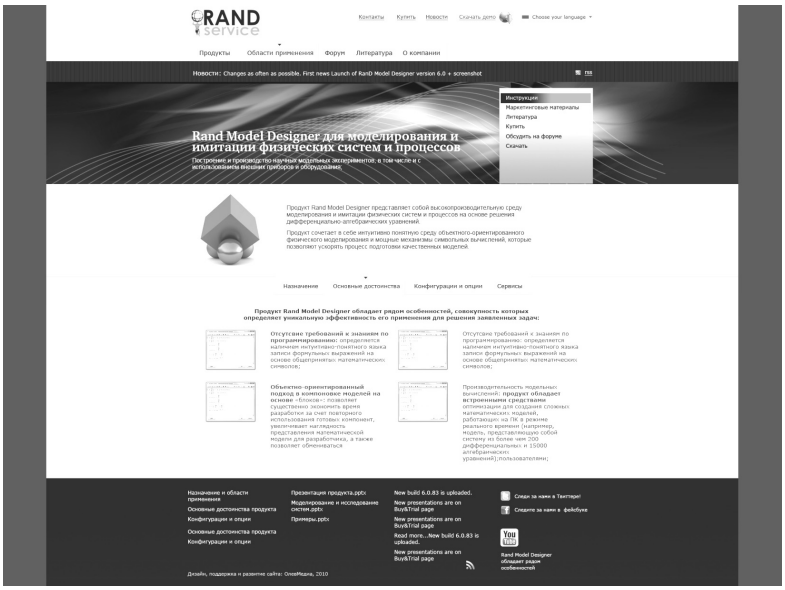
Компания Rand-service предоставляет желающим сотрудничать специальную льготную версию RMD сроком на полгода или год, в зависимости от трудоемкости конечного продукта, которую можно использовать только для выполнения указанных в договоре работ. Получая льготную версию, авторы обязуются предоставить компании разработанные модели и разрешить свободно скачивать их всем желающим для некоммерческого использования с сайта компании. Виды возможного сотрудничества называются *проектами* и приведены в табл. 4.

Промышленное использование

Использование системы моделирования, при котором пользователь ограничивается созданием визуальных моделей, будем считать исследовательским. В этом случае модель является вспомогательным средством для получения некоторых результатов, применяемых далее в научном исследовании, конструировании технической системы, обучении.

Промышленным использованием будем считать случай, когда выполняемая модель становится составляющей кода программного обеспечения разрабатываемой системы. Визуальная модель в данном случае применяется для отладки.

«Классический» пример промышленного использования – использование системы моделирования MvSudium 6 в ЗАО «Транзас Технологии» при разработке сложных тренажеров. Моделируемые технические объекты (механические, электрические, гидравлические, пневматические и др.) описываются системами нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений с размерностью до десятков тысяч уравнений и переменной структурой со сложной логикой переключений. Очевидно, что построить такую



Заставка сайта компания Rand-service

Таблица 4

Возможные формы сотрудничества

Проект «Книга»	Среды визуального моделирования обладают рядом достоинств, помогающим студентам лучше усваивать сложный (абстрактный) материал. Преподаватели, использующие эти среды, отмечают, что студенты начинают больше тратить времени на выполнение лабораторных работ. Причиной тому оказывается возможность: • самостоятельно успешно выполнить лабораторную работу за время возможно чуть большее, чем предусмотрено учебным планом (для этого необходимо сделать программный продукт доступным по локальной сети в любое время или приобрести специальные лицензии для студентов, если он «не сетевой»); • самому изменить задание (задать самому себе новый вопрос) и найти на него ответ. Среды визуального моделирования, как и любые программные среды, не позволяют выполнить работу наполовину – чтобы получить хоть какой-то ответ нужно как минимум написать работоспособную программу. Другими словами, появляется возможность в своем темпе, методом проб и ошибок, без демонстрации последних окружающим, выполнить задание, да еще и задать визуальной среде «глупые вопросы», которые обычно студенты боятся задать преподавателям. Уже одно это оправдывает следующую схему учебника – основной учебный материал иллюстрируется примерами, построенными в выбранной визуальной среде, и сопровождается заданиями, которые следует выполнить в этой среде. Для получения лицензионной версии необходимо прислать: • план-проспект новой книги и указать издательство, с которым уже заключен или планируется заключить договор; • список иллюстрационных моделей и лабораторных работ с кратким описанием; • обязательство разместить информацию о предоставленной лицензии в публикуемой книге
Проект «Электронный конспект лекций»	Частным случаем проекта 1 является разработка конспекта лекций с лабораторными работами. Для получения лицензионной версии необходимо прислать: • план конспекта лекций и разрешение автора разместить конспект лекций вместе с примерами на сайте Rand-service; • список иллюстрационных моделей и лабораторных работ с кратким описанием; • план диссертации с указанием планируемого места и времени защиты; • письмо с обоснованием необходимости получения лицензионной версии, заверенное научным руководителем; • обязательство автора во всех публикациях, связанных с использование RMD, размещать информацию о предоставленной лицензии
Проект «Виртуальная лаборатория»	Это наиболее востребованный практикой проект. Целесообразность разработки и использования в учебном процессе виртуальных лабораторий не вызывает сомнений. Виртуальные лаборатории либо предваряют натурный эксперимент, либо заменяют его. В США существует успешный и вызывающий зависть проект «Апплеты для Физики» (Physles; http://webphysics.davidson.edu/applets/applets.html), поддержанный государством. Автором проекта является Вольфганг Кристиан (Wolfgang Christian). Первые виртуальные лаборатории создавались студентами, а сейчас новые работы создаются уже преподавателями. Работы свободно распространяются и уже появилась обширная библиотека готовых работ. Привлекательность «Апплетов для Физики» в том, что инструментарий для их изготовления свободно распространяется, и если ни одна из существующих работ не удовлетворяет преподавателя, он может создать свою. В нашей стране рассчитывать пока на государственную поддержку не приходится, поэтому мы предлагаем лицензию в обмен на готовую работу, которую авторы разрешают разместить на сайте Rand-service. Для получения лицензионной версии необходимо прислать: • список иллюстрационных моделей и лабораторных работ с кратким описанием; • разрешение автора разместить созданную лабораторную работу на сайте Rand-service и свободно использовать ее всем желающим
Проект «Аспирант»	Любая деятельность, направленная на создание классификаций средств моделирования, их сравнительный анализ. Конструктивная критика только приветствуется. Мы готовы предоставить наш пакет аспирантам и докторантам. Для получения лицензионной версии необходимо прислать: • информацию об аспиранте, организации и совете, где предстоит защита; • план диссертационной работы, краткое описание предполагаемого использования пакета

модель вручную даже на математическом уровне практически невозможно. Единственный выход – создание прикладных библиотек классов, в которых определены классы типовых компонентов для данной прикладной области с иерархией наследования. Далее конкретная модель собирается из компонентов – экземпляров этих типовых классов, соединенных связями (в общем случае ненаправленными). Совокупное поведение всей модели в целом воссоздается автоматически.

Объектно-ориентированных возможностей системы MvStudium, поддерживающей создание пользователем своих собственных классов активных динамических объектов и типов данных, наследование и переопределение классов, а также независимую разработку и импорт пакетов, оказалось вполне достаточно для разработки тренажеров. Использование диаграмм состояний UML вместо специфических конструкций языка Modelica оказалось также весьма успешным.

Наиболее тяжелым оказалось требование работы автоматически сгенерированных встроенных моделей в реальном времени. Для этого должны очень быстро работать численные методы и достаточно быстро (в пределах десятой доли секунды) производиться сборка, анализ и преобразование текущей совокупной системы уравнений (использование расширенных диаграмм состояний UML – карт поведения – для описания гибридного поведения требует проведения этих действий на стадии выполнения). В значительной степени эти требования противоречивы: для достижения большой скорости численных методов необходимо проведение символьных преобразований для упрощения исходной системы уравнений, а также выявление в ней специальных структур, независимых блоков и т. д., в то же время выполнение такого анализа и преобразований весьма ограничено. В результате удалось найти приемлемый компромисс.

Опыт показал наличие существенных проблем при отладке промышленных моделей большой сложности. Возникают ситуации, когда конкретное соединение стандартных компонентов приводит к некорректной ситуации, не предусмотренной разработчиками библиотеки классов: в определенных точках совокупная система уравнений становится либо структурно некорректной (недоопределенной, переопределенной или вырожденной) или численно вырожденной. Определить, какие именно компоненты «виновны» в данной ситуации для систем большой размерности достаточно сложно. Поэтому средства отладки были дополнены возможностями визуализации матрицы Якоби и ее собственных чисел для текущей системы уравнений, а также структурной матрицы текущей совокупной системы уравнений, которые дают определенную «наводящую» информацию разработчикам модели. Для отработки логики переключений насущной является возможность интерактивной пошаговой отладки дискретных действий.

Другой пример промышленного использования – применение системы моделирования MvStudium в аппаратно-программном комплексе стратегического аудита хода и результатов социально-экономического развития страны «СТРАТЕГИЯ-СП» для Счетной палаты РФ (головной разработчик Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН). Одна из задач, решаемых этим комплексом, – определение потенциала социально-экономического развития страны или региона с помощью имитационного моделирования. Для этого необходимо провести стохастический вычислительный эксперимент с совокупной моделью портфеля проектов и мероприятий, планируемых для достижения определенных целей, и макроэкономики страны или региона.

Первая составляющая – модель портфеля проектов – никоим образом не может быть создана вручную, поскольку изначальная информация о проектах находится в базе данных специализированной системы управления проектами (например, Spider Project), размерность ее огромна и пользователи не являются специалистами по моделированию. В то же время, модель макроэкономики может быть создана заранее вручную, независимо отлажена и затем параметрически настроена на данный регион. Решение успешно находится при использовании принципов объектно-ориентированного моделирования. Модель макроэкономики разрабатывается и отлаживается в визуальной среде MvStudium как класс в пакете «Макроэкономика». Для моделирования портфеля проектов также разработаны стандартные классы («Работа», «Вычислительный эксперимент» и т. д.).

В состав интегрирующего ПО UPE&Plan Designer («Софтпром») включен специальный модуль моделирования, который по описанию портфеля проектов в базе данных автоматически создает описание модели конкретного портфеля проектов на входном языке системы MvStudium с использованием стандартных классов. Эти стандартные классы импортируются из ранее разработанных пакетов. Затем с помощью компонентов системы MvStudium модуль моделирования компилирует это текстовое описание во встроенную выполняемую модель, запускает ее, получает результаты моделирования и отправляет их для визуализации в UPE&PlanDesigner.

Эти модели являются в основном дискретными (возможно решение небольших систем уравнений и отдельных задач нелинейного программирования) и считаются достаточно быстро. Однако для достижения требуемой точности может потребоваться более десяти тысяч испытаний, что приводит к существенным временным затратам. В то же время, стохастический эксперимент естественным образом распараллеливается, поэтому весьма актуально автоматическое распараллеливание действий в модели для компьютера с несколькими процессорами.

Приложение 1

Первая международная конференция НОИМ

Тематика конференции ориентирована на следующие области морской тематики и деятельности:

- проектирование, строительство и эксплуатация судов, кораблей и изделий морской техники;
- проектирование, изготовление и эксплуатация средств оснащения и вооружения морской техники;
- морские транспортные системы, морские грузоперевозки, логистика;
- судостроительные производства и портовые хозяйства.

В программу конференции предполагается включать доклады, относящиеся, в первую очередь, к области моделирования систем с дискретными событиями и временем. Работы по моделированию непрерывных систем на базе дифференциальных уравнений будут приниматься к рассмотрению только в том случае, если они содержат результаты, относящиеся к общим методологическим и программно-техническим проблемам имитационного моделирования.

Научная программа конференции включает следующие тематические направления:

- теоретические основы и методология имитационного моделирования;
- методы оценивания качества моделей;
- методы и системы распределенного моделирования;
- моделирование глобальных процессов;
- средства автоматизации и визуализации имитационного моделирования;
- системная динамика (с обязательным наличием имитационной составляющей);
- практическое применение моделирования и инструментальных средств автоматизации моделирования, принятие решений по результатам моделирования.

Время – в период проведения Морского салона 2011 (конец июня – начало июля).

Дислокация – на территории Выставочного комплекса (Санкт-Петербург, Васильевский остров)

Длительность – 1 день.

Формат – одна секция.

Регламент – 20 мин на выступление и ответы на вопросы.

Издание к началу конференции сборника тезисов докладов.

Язык сборника – английский, с возможностью помещения дополнительно варианта тезисов и на русском языке.

Всего планируется заслушать 20 докладов.

Приложение 2

Первая российская конференция НОИМ

ПЯТАЯ (ЮБИЛЕЙНАЯ) ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЮ В НАУКЕ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ «ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА» (**ИММОД-2011**)

Санкт-Петербург, Россия 19–21 октября 2011 г.

ИЗВЕЩЕНИЕ О НАМЕРЕНИИ

Если Вы желаете участвовать в работе конференции, пожалуйста, заполните разборчиво эту форму и направьте ее факсом или электронной почтой в секретариат конференции.

Секретариат конференции ИММОД-2011
ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта»
Промышленная ул., д.7
Санкт-Петербург, 198095, Россия

Руководитель секретариата
Долматов Михаил Анатольевич
Телефон: 8-(812)-610-64-69
Факс: 8-(812)-610-64-44
E-mail: immod2011@sstc.spb.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Model-based design for control systems with Simulink [Электронный ресурс] / 2005, Mathworks, Inc.

2. **Яненко, Н.Н.** Проблемы математической технологии [Текст] / Н.Н. Яненко, В.Н. Карначук, А.Н. Коновалов // Численные методы механики сплошной среды. –Новосибирск, ВЦ АН СССР, 1979. –208 с.

3. **Breitenecker, F.** Classification and evaluation of features in advanced simulators [Text] / F. Breitenecker, N. Proper// Proc. MATHMOD-09. –Vienna, 2009.

4. **Ивановский, Р.И.** Теория вероятностей и математической статистики. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad [Текст] / Р.И. Ивановский. –СПб.: БХВ, 2008. –528 с.

5. **Карпов, Ю.Г.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст] / Ю.Г. Карпов. –СПб.: БХВ-Питер, 2005.

6. Информатика. Базовый курс. 7-9 [Текст]/ Под ред. Н.В. Макаровой. –СПб.: Питер, 2002.

7. **Сениченков, Ю.Б.** Численное моделирование гибридных систем [Текст] / Ю.Б. Сениченков. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004.

8. **Biryukov, S.V.** Visual Simulation of Physical Processes in Model Vision Studium (free) [Электронный ресурс] / S.V. Biryukov, D.N. Guskov, V.V. Fedyanin // Proc. of the Int. Conf. Informational Technology in Education, Moscow, 2005.

УДК 681.2; 62-53

Р.И. Ивановский

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ[1]

Чувствительность входит в состав характеристик любой технической системы или устройства, определяет их реакцию на изменение входной информации, структурные или параметрические вариации, на ошибки моделирования и пр.

Понятие «чувствительность» имеет двоякий смысл. Для ряда приложений, таких, как датчики и чувствительные элементы, высокое их качество ассоциируется с высокой чувствительностью как способностью чут-

[1] Статья написана по материалам доклада, сделанного автором на научном семинаре ФТК СПбГПУ в декабре 2010 г.

ко реагировать на слабые входные сигналы. В других приложениях, к которым относятся системы управления и обработки информации, высокое качество означает низкую или минимальную чувствительность к возможным изменениям условий функционирования и/или вариациям элементов системы. Анализ чувствительности как составная часть современного системного анализа используется для решения широкого круга практических задач анализа и синтеза, таких, как, например:

анализ свойств систем при вариации априорных данных;

упрощение математических моделей;

определение возможности и допустимости упрощения алгоритмов обработки информации и управления в системах;

синтез систем с малой или минимальной чувствительностью к погрешностям моделирования.

Этот список может быть продолжен, но уже и приведенный перечень характеризует актуальность анализа чувствительности при решении прикладных задач.

В рамках одной статьи не представляется возможным детально рассмотреть проблемы чувствительности даже в ограниченном спектре перечисленных выше задач. Поэтому затрагиваемые здесь темы обсуждаются весьма кратко, приводятся лишь отдельные иллюстрации.

Основные элементы теории чувствительности

Теория чувствительности во многом обязана исследованиям Р.М. Юсупова, Е.Н. Розенвассера [1–4], монографии которых [1, 2] содержат систематическое изложение теории и прикладных аспектов анализа чувствительности динамических систем.

Среди отечественных работ можно отметить также [5, 6], посвященные прикладным проблемам теории чувствительности технических систем. Отмечая вклад зарубежных ученых в развитие теории чувствительности, отметим монографию [7] Мансура Ислами, в которой излагаются вопросы анализа и синтеза динамических систем с использованием теории чувствительности. В последние годы интерес к проблемам чувствительности применительно к техническим, экономическим, химическим и другим системам продолжает нарастать. Более широкая библиография по современному состоянию и аспектам применения теории чувствительности приведена на сайте учебно-научной лаборатории ФТК СПбГПУ [8].

Прикладные задачи анализа чувствительности как задачи изучения свойств систем при наличии их параметрических и/или структурных вариаций предполагают введение понятий расчетного и действительного режимов работы, расчетной (РМ) и действительной (ДМ) моделей.

В качестве расчетных моделей выступают модели, учитывающие некие номинальные режимы функционирования системы. Эти РМ служат основой для принятия решений, разработки алгоритмов и пр. В ДМ исследователь вводит те изменения, которые отражают вероятные вариации параметров (структуры) в реальных условиях функционирования. Таким образом, РМ и ДМ отражают свойства расчетных (РУ) и действительных (ДУ) условий функционирования системы соответственно, причем РМ используется для разработки расчетных алгоритмов (функционирования, обработки информации или управления), которые будем обозначать РАлг. Тогда расчетное качество системы можно анализировать, используя пару (РМ + РАлг). Анализ действительного качества системы в реальных условиях функционирования должен опираться на пару (ДМ + РАлг).

Особое значение имеет анализ потенциально достижимого качества системы в действительных условиях. Этот анализ предполагает разработку оптимальных алгоритмов (ОАлг), учитывающих свойства ДМ. Поэтому результаты анализа пары (ДМ + ОАлг) позволяют получить наилучший вариант системы (своеобразный «отсчетный ноль»), что важно при сопоставительном анализе действительного качества системы с потенциально достижимым. На основе такого сопоставления могут быть решены многие задачи прикладного анализа, такие, как выбор вариантов упрощения РМ, упрощения РАлг, выбора состава датчиков информации, ранжирования влияющих факторов и пр.

Анализ чувствительности предполагает получение функций чувствительности (ф. ч.). Эти функции позволяют оценить качество работы системы при рассогласовании расчетных и действительных условий функционирования. Для непрерывных систем ф. ч. представляют собой коэффициенты разложения в ряд Тэйлора по степеням вариаций вида:

$$y[\mathbf{p}_0 + \Delta\mathbf{p}(k)] \approx y_0 + \sum_k f_k \cdot \Delta p_k \ + ...; \qquad f_k = \partial y(p)/\partial p_k, \tag{1}$$

где $y(\mathbf{p}_0) = y_0$ – исходное состояние переменной y; Δp_k – вариация k-го параметра; $\Delta\mathbf{p}(k)$ – вектор вариаций параметров относительно исходных (номинальных) значений $\mathbf{p}_0$, единственный ненулевой (k-й) элемент которого равен Δp_k; f_k – ф. ч. первого порядка, вычисляемая при номинальных условиях.

Для дискретных систем используются ф. ч. вида

$$f_k = \{y[\mathbf{p}_0 + \Delta\mathbf{p}(k)] - y_0\} \,/\, \Delta p_k. \tag{2}$$

Наряду с абсолютными ф. ч. f_k (1) и (2) в практике прикладного анализа удобно использовать относительные их значения:

$$r_k = f_k \cdot p_k / y_0, \tag{3}$$

позволяющие проводить не только межвариантный, но и межсистемный анализ чувствительности. В (3) p_k и y_0 выбраны в качестве одного из вариантов обеспечения безразмерности ф. ч. r_k.

Сопоставительный анализ ф.ч. при последовательной вариации элементов вектора $\mathbf{p}_0$ позволяет проводить их ранжирование, т. е. сортировку по степени влияния на результирующее качество системы. Это дает возможность исключить ряд малозначимых параметров или факторов из модели и, в результате, упростить модель и/или расчетные алгоритмы.

Чувствительность в анализе систем обработки информации

Системы обработки информации (СОИ), составляющие основу сложных информационно-измерительных систем, входят в подавляющее число систем управления различными подвижными объектами. Они содержат некоторое количество датчиков, с помощью которых собирается информация о состоянии исследуемого объекта, и используют принцип комплексирования. В задачу СОИ в таких комплексных системах входит обеспечение необходимой точности оценивания (выработки) состояний и требуемого времени готовности.

Хорошо известны традиционные СОИ, простейшая структура которых изображена на рис. 1. На вход блока обработки (БОИ) поступает смесь инструментальных погрешностей датчиков 1 и 2; на выходе БОИ формируется оценка погрешности ведущего датчика. Эффект повышения точности выработки параметров в таких схемах достигается компенсацией инструментальных погрешностей датчиков на выходе схемы; Y – измеряемый параметр. Теория таких систем достаточно известна [9–11], но проблемы анализа их чувствительности и упрощения технической реализации остаются актуальными.

Линейная модель погрешностей подобной системы имеет вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{w};\ \mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v};\quad \mathbf{y} = \mathbf{H}_0\mathbf{x};\ \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0,\quad M[\mathbf{x}(0)] = \mathbf{m}_x(0),\ \mathbf{P}(0) = \mathrm{cov}[\mathbf{x}(0)], \tag{4}$$

где $\mathbf{x}$ – n-мерный вектор состояний; $\mathbf{z}$ – m-мерный вектор измеряемых параметров; $\mathbf{y}$ – вектор выходных переменных, определяющих качество СОИ; $\mathbf{w}$ – вектор порождающих белых шумов; $\mathbf{v}$ – вектор белых шумов в канале измерений. Будем считать, что векторы $\mathbf{w}$ и $\mathbf{v}$ – независимые, а матрицы их интенсивностей обозначим $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$ соответственно.

Для схемы на рис. 1 с учетом обозначений (4) имеем:

$$\Delta_1 = \mathbf{H}_1\mathbf{x},\ \mathbf{y} = (\Delta_1 - \hat{\Delta}_1);\ \mathbf{z} = (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2)\mathbf{x} + \mathbf{v},\quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2;\ \mathbf{H}_0 = \mathbf{H}_1.$$

В блоке обработки информации (см. рис. 1) используется фильтр калмановского типа (ФКТ) [5, 9], в множество которых входят оптимальные (ОФК), редуцированные (РФК), упрощенные (УФК), стационарные (СтФ) и другие фильтры этого класса, обощенное уравнение которых имеет вид:

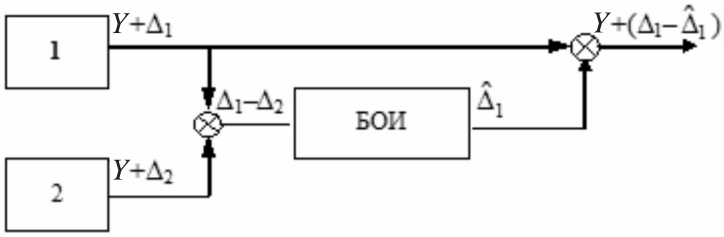


Рис. 1. Структура простейшей комплексной СОИ

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\cdot\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{K}(t)[\mathbf{z} - \mathbf{H}\cdot\hat{\mathbf{x}}];\ \hat{\mathbf{x}}(0) = \overline{\mathbf{x}}_0. \qquad (5)$$

Здесь $\hat{\mathbf{x}}$ – $(n \times 1)$ – вектор оценок состояний; $\mathbf{K}(t)$ – $(n \times m)$ – матрица коэффициентов усиления фильтра, структура которой определяет тип используемого ФКТ. Для стационарных фильтров (СтФ) $\mathbf{K}(t) = \mathbf{K}$.

Качество оценок состояний отражает вектор ошибок оценки $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$, уравнение которого при произвольной матрице $\mathbf{K}(t)$ имеет вид:

$$\dot{\mathbf{e}} = [\mathbf{A} - \mathbf{K}(t)\mathbf{H}]\mathbf{e} + \mathbf{B}\,\mathbf{w} - \mathbf{K}(t)\,\mathbf{v};\quad M[\mathbf{e}(0)] = \mathbf{0};\ \mathrm{cov}[\mathbf{e}(0)] = \mathbf{P}(0). \qquad (6)$$

Тогда ковариационное уравнение для $\mathrm{cov}[\mathbf{e}] = \mathbf{P}$ примет вид:

$$\dot{\mathbf{P}} = \mathbf{I}\cdot\mathbf{P} + \mathbf{P}\cdot\mathbf{I}^T + \mathbf{B}\mathbf{Q}\mathbf{B}^T + \mathbf{K}(t)\mathbf{R}\mathbf{K}^T(t);\quad \mathbf{I} = \mathbf{A} - \mathbf{K}(t)\mathbf{H};\ \mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0. \qquad (7)$$

Для ОФК матрица $\mathbf{K}(t)$ имеет вид:

$$\mathbf{K}(t) = \mathbf{P}\cdot\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}. \qquad (8)$$

Подстановка (8) в выражение (7) приводит к известному уравнению Риккати для ковариационной матрицы ОФК:

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A}^T(t) + \mathbf{B}(t)\mathrm{Q}\mathbf{B}^T(t) - \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t),\ \mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0. \qquad (9)$$

Расчетная и действительные модели рассматриваемой СОИ имеют уравнения вида (4), однако параметры этих моделей различаются. Учитывая, что структурные особенности РМ и ДМ можно отразить параметрически, будем считать, что РМ и ДМ имеют следующие множества параметров:

$$\chi = [\mathbf{P}_0, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{H}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}];\quad \chi_д = [\mathbf{P}_{д0}, \mathbf{A}_д, \mathbf{B}_д, \mathbf{H}_д, \mathbf{Q}_д, \mathbf{R}_д], \qquad (10)$$

причем в ДМ векторы состояний и шумов обозначим как $\mathbf{x}_д$, $\mathbf{w}_д$, $\mathbf{v}_д$.

Алгоритм обработки в СОИ, созданный на основе РМ и работающий в действительных условиях, описывает выражение

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\cdot\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{K}(t)[\mathbf{z}_д - \mathbf{H}\cdot\hat{\mathbf{x}}];\ \hat{\mathbf{x}}(0) = \overline{\mathbf{x}}_0\ . \qquad (11)$$

Учитывая, что $\mathbf{z}_д = \mathbf{H}_д\cdot\mathbf{x}_д + \mathbf{v}_д$, уравнения для действительных ошибок оценки $\mathbf{e}_д = (\mathbf{x}_д - \hat{\mathbf{x}})$ и его ковариационной матрицы $\mathrm{cov}[\mathbf{e}_д] = \mathbf{P}_д$ удобно формировать, используя составные векторы и матрицы [5]. Приведем их в окончательном виде

$$(\Delta\mathbf{A} = \mathbf{A}_д - \mathbf{A};\ \Delta\mathbf{H} = \mathbf{H}_д - \mathbf{H})$$

$$\dot{\mathbf{P}}_\Sigma = \mathbf{A}_\Sigma\cdot\mathbf{P}_\Sigma + \mathbf{P}_\Sigma\cdot\mathbf{A}^T + \mathbf{B}_\Sigma\mathbf{Q}_\Sigma\mathbf{B}_\Sigma^T;\ \mathbf{P}_\Sigma(0);\quad \mathbf{Q}_\Sigma = \mathrm{cov}(\mathbf{w}_\Sigma);$$

$$\mathbf{A}_\Sigma = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{K}\cdot\mathbf{H} & \Delta\mathbf{A} - \mathbf{K}\cdot\Delta\mathbf{H} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_д \end{bmatrix}, \qquad (12)$$

$$\mathbf{B}_\Sigma = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_д & \Delta\mathbf{A} - \mathbf{K}\cdot\Delta\mathbf{H} \\ \mathbf{B}_д & \mathbf{0} \end{bmatrix},\ \mathbf{P}_\Sigma = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_д & \mathbf{P}_c \\ \mathbf{P}_c^T & \mathbf{P}_{хд} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{хд} = \mathrm{cov}[\mathbf{x}_д];\ \mathbf{P}_\Sigma = \mathrm{cov}[\mathbf{e}_\Sigma];\ \dot{\mathbf{e}}_\Sigma = \mathbf{A}_\Sigma\cdot\mathbf{e}_\Sigma + \mathbf{B}_\Sigma\cdot\mathbf{w}_\Sigma;\quad \mathbf{e}_\Sigma = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_д \\ \mathbf{x}_д \end{bmatrix};\ \ \mathbf{w}_\Sigma = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_д \\ \mathbf{v}_д \end{bmatrix}.$$

Типовой результат анализа дополнительных погрешностей при работе расчетного алгоритма (11) в действительных условиях представлен на рис. 2 слева. Сплошная кривая соответствует дисперсии результирующей ошибки оптимальной СОИ, полученной решением уравнения Риккати (9); пунктир – дисперсия действительной ошибки, полученная интегрированием ковариационного уравнения (12).

Аналогичные кривые на рис. 2 справа характеризуют качество стационарного ФКТ, матрица коэффициентов усиления которого выбрана из равенства $\mathrm{K} = \mathrm{K}_{дорt}(\infty)$. Сопоставление кривых на каждом графике позволяет оценить потери точности при использовании расчетного фильтра

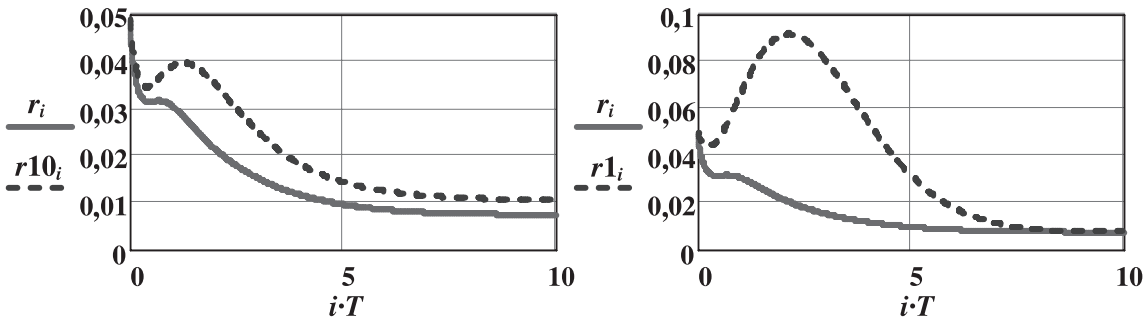


Рис. 2. Анализ дисперсии действительных ошибок

(РАлг) в действительных условиях функционирования, выбрать допустимый вариант упрощения модели и алгоритма обработки.

Чувствительность в задачах разработки алгоритмов СОИ

Кроме анализа чувствительности алгоритмов обработки в СОИ к вариациям внешних условий, параметрическим и структурным вариациям моделей, обширную область практического применения теории чувствительности занимает проблема создания алгоритмов обработки с малой чувствительностью. Остановимся на принципах применения элементов теории чувствительности при решении таких задач.

Как отмечалось выше, системы функционируют в некоторых неопределенных условиях, в лучшем случае известных с точностью до диапазонов изменения параметров. В этих условиях требуемое качество СОИ может быть достигнуто двумя путями: априорной настройкой алгоритмов на возможные вариации параметров и оперативной адаптацией алгоритмов. Практическая реализация второго подхода связана с известными трудностями, вызванными асимптотическим характером процессов оценки параметров; неопределенностью темпа изменения параметров длительностей их квазипостоянства. Эти проблемы заслуживают отдельного детального рассмотрения. Учитывая эти обстоятельства и ограничения объема материала, рассмотрим здесь подходы к снижению чувствительности алгоритмов обработки на основе априорной настройки их параметров.

Цель выбора параметров при этом – снижение чувствительности системы к вариациям факторов, наиболее сильно влияющих на качество СОИ. Это предполагает необходимость предварительного ранжирования факторов и использования критериев, включающих помимо точностных составляющих еще и ф. ч. Так, один из этих подходов основан на введении вектора ф. ч. в модель погрешностей [5] и выполнении далее обычной процедуры синтеза алгоритма по двум известным критериям (несмещенность оценок и минимум суммы дисперсий ошибок оценки). Это позволяет снизить чувствительность к выбранным параметрам, но приводит к усложнению алгоритма.

Другой подход, не требующий расширения модели, основан на минимизации критерия вида [5]:

$$I = \mathrm{sp}[\mathbf{P} + \beta \cdot \mathbf{P}_{\mu}], \qquad (13)$$

где матрица $\mathbf{P}$ удовлетворяет уравнению (7), а $\mathbf{P}_{\mu}$ – ковариационная матрица вектора $\mathbf{e}_{\mu}$, элементы которого – ф. ч. вектора ошибок оценки (6); β – весовой коэффициент; sp – обозначение следа матрицы.

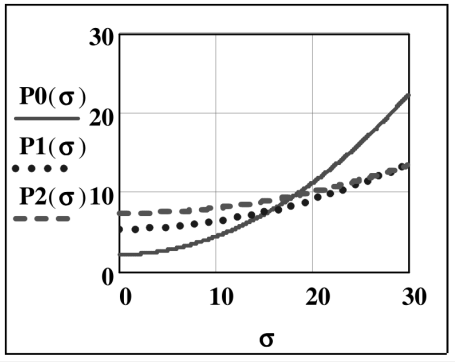
Минимизация (13) по матрице $\mathbf{K}$ дает выражение вида:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{P} + \beta \cdot \mathbf{P}_{\mu}) \cdot \mathbf{H}^{T} \cdot (\mathbf{R} + \beta \cdot \mathbf{R}_{\mu})^{-1}.$$

Рис. 3 иллюстрирует качество такой системы обработки первого порядка при $t \to \infty$. Номинальное значение параметра $\sigma_{\text{ном}} = 10$.

Большое прикладное значение имеют минимаксные подходы к синтезу алгоритмов СОИ. Обозначим множество неопределенных параметров $\chi = (\mathbf{A} \times \mathbf{Q} \times \mathbf{R} \times \mathbf{P}_0)$ и след матрицы $\mathbf{P}_{\text{д}}$ (12) как $\mathrm{sp}\,\mathbf{P}_{\text{д}} = I(\mathbf{K}, \chi)$. В правой части рис. 4 приведены несколько критериев, которые удобно использовать, если параметры известны с точностью до диапазонов.

Критерий S_1 – классический минимаксный. Этот критерий минимизирует след матрицы $\mathbf{P}_{\text{д}}$ на правой границе диапазона неопределенных пара-



$$\mathbf{P_y}(\beta, \sigma) := \frac{2 \cdot a \cdot \sigma^2 + \mathbf{K}(\beta)^2}{2 \cdot (a + \mathbf{K}(\beta))}$$

$$\mathbf{P0}(\sigma) := \mathbf{P_y}(0, \sigma)$$
$$\mathbf{P1}(\sigma) := \mathbf{P_y}(500, \sigma)$$
$$\mathbf{P2}(\sigma) := \mathbf{P_y}(1000, \sigma)$$

Рис. 3. Качество системы с локальной нечувствительностью

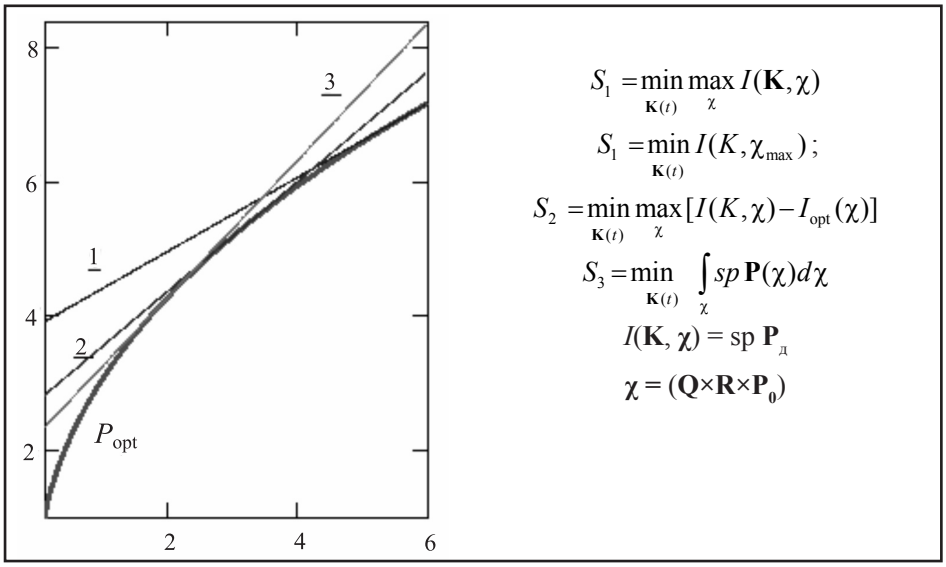


Рис. 4. Критерии минимаксного типа

метров χ, поэтому гарантированно будет обеспечено достигнутое качество системы на всем диапазоне. Критерий S_2 позволяет искать минимакс для следа разности матриц $\mathbf{P}_д$ и матрицы $\mathbf{P}_{дopt}$, удовлетворяющей уравнению Риккати (9). Критерий S_3 обеспечивает получение значений, усредненных на всем диапазоне изменения параметров.

График на рис. 4 иллюстрирует достигнутое качество при использовании критериев. Нижняя кривая соответствует оптимальным значениям дисперсии ошибки оценки для каждого из значений параметра в заданном диапазоне. Прямые линии имеют номера, соответствующие номеру критерия.

В практике создания алгоритмов СОИ распространены задачи, связанные с синтезом упрощенных фильтров (УФ) [5]. При этом рассматривается ДМ с ($n \times 1$)-вектором состояний $\mathbf{x}$ и множеством параметров $\chi_д$ (10). УФ синтезируется по упрощенной модели с ($n_1 \times 1$)-вектором состояний $\mathbf{x_1}$ ($n_1 < n$), которая в данном случае выступает в качестве РМ с множеством параметров χ (10). Минимизируя след расчетной (упрощенной) модели (sp$\mathbf{P_р}$) по $\mathbf{K_р}$, получаем фильтр структуры (11), матрица $\mathbf{K_р} = f(\chi)$ которого – ($n_1 \times m$)-матрица. Дополнительные погрешности УФ могут быть проанализированы на основе уравнений (12). Уровень этих дополнительных погрешностей можно снизить использованием модифицированного критерия вида [min (sp$\mathbf{P}_д$)] по $\mathbf{K}_м$, где матрица $\mathbf{P}_д$ удовлетворяет уравнениям (12). Полученный таким образом фильтр может быть назван модифицированным упрощенным (МУФ) Он имеет структуру и размерность УФ, но ($n_1 \times m$)-матрица его коэффициентов усиления $\mathbf{K}_м = (\mathbf{P}_д\mathbf{H}^T + \mathbf{P}_с\Delta\mathbf{H}^T) \cdot \mathbf{R}_д^{-1}$.

Модифицированные упрощенные фильтры в действительных условиях функционирования обладают более высоким (по сравнению с УФ) качеством, поскольку их коэффициенты усиления $\mathbf{K}_м$ учитывают параметры действительной модели.

Чувствительность в анализе и синтезе систем управления

Как СОИ, так и СУ являются динамическими системами, описываются дифференциальными или разностными уравнениями, создаются на основе РМ и функционируют в действительных условиях. По этой причине большая часть того, что было описано применительно к СОИ может быть повторено и для СУ. Однако для СУ в понятии «качество управления», наряду с точностью на первый план выступает устойчивость. Это определяет известную особенность анализа СУ. Поэтому, не повторяя отмеченные выше аспекты приложения теории чувствительности к СУ, остановимся здесь лишь на некоторых аспектах анализа ф. ч. для обоснования упрощения регуляторов при их технической реализации. Идеи и выводы такого анализа могут быть наиболее полно раскрыты при анализе линейных СУ, поскольку при этом возможен аналитический подход.

Далее рассмотрим линейные одномерные и многомерные системы управления. В процес-

се анализа будет определена неразрывная связь анализа чувствительности с анализом СУ на грубость.

На рис. 5 приведена традиционная структура СУ с задающими сигналами λ, возмущениями β и выходными переменными *y*; H и R – передаточные функции (одномерные системы) или передаточные матрицы (многомерные СУ) объекта управления и регулятора.

Результатом любого подхода (аналитического или численного) к синтезу многомерных или одномерных систем служат переходные характеристики (п. х) или передаточные функции (п. ф.) звеньев управляющей части СУ. Требования технической реализации вызывают необходимость упрощения полученных п. ф. и/или аппроксимации п. х. Такие упрощения неизбежно связаны с исключением некоторых звеньев из структуры регулятора, с параметрическими вариациями этих звеньев.

В общем случае необходимо обосновывать возможность и допустимость конкретных упрощений эталонных (полученных в результате синтеза) вариантов и вариаций их параметров. Предварительный анализ этих проблем показал, что такое обоснование можно получить методами теории чувствительности.

Структурные и/или параметрические вариации динамической системы вызывают дополнительное движение (типа (1)), изменение свойств системы относительно исходного (или заданного, желаемого).

При анализе вариантов регуляторов для последующей реализации в первую очередь необходимо ответить на три вопроса:

1) возможно ли структурное упрощение регуляторов, вызванное исключением отдельных звеньев и/или аппроксимацией переходных характеристик звеньев;

2) возможны ли параметрические вариации эталонных или упрощенных регуляторов (необходимые признаки грубости СУ);

3) какие алгоритмы управления могут быть реализованы.

Термин «возможно» в этих вопросах и ниже предполагает выяснение возможности изменений без потери системой устойчивости.

Рассмотрим эти вопросы для одномерных и многомерных систем, естественно предполагая, что синтезированная (исходная) СУ устойчива.

Одномерные системы. П.ф. замкнутой СУ (рис. 5) имеет вид:

$$W(p) = y(p)/\lambda(p) = \\ = [1 + H(p)\,R(p)]^{-1}\,H(p)\,R(p). \qquad (16)$$

Ее п. х. $h(p) = W(p)/p$ как реакция системы на единичное ступенчатое воздействие $\lambda^0(p) = 1/p$, служит исчерпывающей основой для анализа качества и устойчивости реакций замкнутой системы. Обозначая $W(p)$ (16) при эталонном регуляторе как $W(R)$, разложим эту функцию в ряд Тэйлора по степеням вариаций R, ограничиваясь членами первого порядка:

$$W(R + \Delta R) = W(R) + [\partial W(R)/\partial(R)](\Delta R) = \\ = W(R) + [S(R)](\Delta R). \qquad (17)$$

Выражение (17) определяет возможность структурного упрощения полученного регулятора. Действительно, если первое слагаемое $W(R)$ в этом выражении является п. ф. эталонной системы, устойчивой по условиям синтеза, то устойчивость второго слагаемого будет определяться видом ф. ч. $S(R)$ и принимаемым вариантом структурной вариации ΔR. В общем случае на основании (17) могут быть сделаны положительные выводы о возможности вариаций и структурного упрощения R, если:

- ф. ч. $S(R)$ и вариация ΔR по отдельности – передаточные функции устойчивых звеньев (далее такие п. ф. будем называть устойчивыми п. ф.);
- произведение ф. ч. $S(R)$ на ΔR, т. е. $S(R)\Delta R$ – устойчивая п. ф.

Ф. ч. $S(R)$ для рассматриваемого случая имеет вид:

$$S(R) = H(p) / [1 + H(p)\,R(p)]^2. \qquad (18)$$

В силу исходной устойчивости СУ, полюса п. ф. $W(p) = W(R)$ (т. е. нули п. ф. $[1 + H(p)R(p)]$) расположены в левой полуплоскости комплексной плоскости. Отсюда следует, что выражение (18) для ф. ч. соответствует устойчивой п. ф., поскольку эта функция имеет полюса исходной (неварьированной) системы. Это позволяет сделать несколько очевидных утверждений.

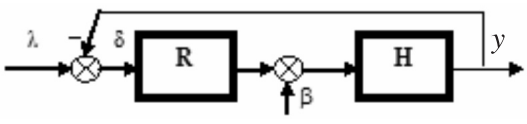


Рис. 5. Структура СУ

Утверждение 1. Устойчивость ф. ч. (18) свидетельствует, что *для любых* вариантов регуляторов R, полученных в результате синтеза, возможны упрощения путем параметрических (структурных) вариаций ΔR, касающихся устойчивых звеньев в составе эталонной п. ф. $R(p)$.

Так, например, если п. ф. регулятора $R(p)$ может быть представлена суммой нескольких апериодических (устойчивых) звеньев и интегратора (неустойчивого звена), то в силу утверждения 1 вариациям могут быть подвергнуты апериодические (устойчивые) звенья, т. е. вариация $\Delta R(p)$ должна быть устойчивой п. ф. Но в общем случае подобные вариации могут вызвать статизм замкнутой системы.

Утверждение 2. При вариации устойчивых составляющих в структуре $R(p)$ астатизм замкнутой СУ сохраняется в том случае, если полином числителя ф. ч. $S(R1)$ (18) будет иметь хотя бы один нулевой корень.

Среди звеньев, входящих в структуру эталонной п. ф. $R(p)$, могут присутствовать и неустойчивые, например, интегрирующие звенья, часто встречающиеся при синтезе астатических систем. Для ответа на вопрос, можно ли варьировать и неустойчивые звенья (например, менять коэффициент усиления интеграторов), ответа для общего случая дать нельзя, поскольку такая возможность существенным образом зависит от конкретных параметров и структуры СУ. Единственным утверждением, которое можно сделать применительно к возможности вариаций неустойчивых звеньев в структуре эталонного $R(p)$, является следующее.

Утверждение 3. Возможность вариации неустойчивых звеньев в составе $R(p)$ определяется устойчивостью п. ф. $[S(R)](\Delta R)$, образованной произведением функции чувствительности и вариации ΔR.

Подобный случай может включать, например, структуру регулятора, состоящего из суммы апериодических звеньев и интегратора k/p. Вариация Δk коэффициента усиления k интегратора возможна в том случае, если ф. ч. $S(R)$ будет иметь хотя бы один нулевой ноль. Тогда произведение $S(R)$ на вариацию $\Delta R(p) = \Delta k/p$ образует устойчивую передаточную функцию. Более того, если $R(p)$ имеет интегратор, то вариация его коэффициента не нарушает астатизм замкнутой системы. В этом легко убедиться, рассматривая полиномиальные формы представления $H(p)$, $R(p)$: $H(p) = a(p) / b(p)$; $R(p) = c(p)/d(p)$, для которых ф. ч. $S(R)$ (18) принимает вид $S(R) = a(p)b(p)[d(p)]^2 / /[b(p)d(p) + a(p)c(p)]^2$.

При наличии интегратора в $R(p)$ числитель $S(R)$ будет иметь множитель p^2, что при $\Delta R(p) = \Delta k/p$ обеспечит нулевой установившийся уровень переходной характеристике $[S(R)](\Delta R)/p$.

С примерами, подтверждающими сделанные выводы, можно ознакомиться в [12, раздел «Теория регулирования/Одномерные системы»], где размещены интерактивные ресурсы автора.

Многомерные системы. Передаточная матрица замкнутой многомерной СУ (МСУ), согласно схеме на рис. 5, имеет вид [13]:

$$\mathbf{W}(p) = \mathbf{y}(p)/\lambda(p) = \\ = [\mathbf{E}_n + \mathbf{H}(p)\,\mathbf{R}(p)]^{-1}\,\mathbf{H}(p)\,\mathbf{R}(p). \qquad (19)$$

Так же как и для одномерного случая, реакции МСУ на единичные воздействия $\lambda_{\Sigma}^{0}(p) = \mathbf{E}_n/p$ (λ_{Σ}^{0} – $(n \times n)$-матрица, $\mathbf{E}_n$ – единичная матрица порядка n, где n – число основных каналов МСУ), т. е. матрица ее переходных характеристик $\mathbf{h}(p) = \mathbf{W}(p)/p$ служит исчерпывающей основой для анализа качества и устойчивости реакций замкнутой системы. Устойчивость МСУ (19) определяется [13] числителем $s(p)$ определителя матрицы $[\mathbf{E}_n + \mathbf{H}(p)\mathbf{R}(p)]$, выступающим в роли характеристического полинома таких динамических систем. Полином $s(p)$ присутствует в выражениях для каждого элемента матрицы $\mathbf{W}(p)$. Поэтому анализ устойчивости может проводиться на основе как отдельных элементов $\mathbf{W}(p)$, так и их линейных форм, например, следа матрицы $\mathbf{W}(p)$.

При анализе чувствительности МСУ целесообразно выбрать именно вариант $\mathrm{sp}[\mathbf{W}(p)]$, поскольку аппарат дифференцирования следа матриц по вектору или матрице хорошо разработан. Известные формулы для таких преобразований следа можно найти в [14]. Эти формулы включают варианты дифференцирования следа отдельных матриц, произведений и суммы произведений матриц. Однако в данном случае для дифференцирования следа матрицы $\mathbf{W}(p)$ (19) по матрице $\mathbf{R}(p)$ требуются формулы дифференцирования следа обратных матриц. В настоящей статье вывод этих формул не приводится ввиду весьма объемных выкладок. Опуская вывод, приведем лишь одну из формул, необходимую для

анализа чувствительности МСУ (19) в данной постановке. Так, матрица ф. ч. МСУ [12] имеет вид:

$$\mathbf{S}(\mathbf{R}) = \partial \mathrm{sp}[\mathbf{W}(\mathbf{R})] / \partial(\mathbf{R}) = \\ = \{[\mathbf{E}_n + \mathbf{H}(p)\,\mathbf{R}(p)]^{-2} \cdot \mathbf{H}(p)\}^T, \quad (20)$$

где $\mathbf{W}(\mathbf{R})$ – матрица $\mathbf{W}(p)$ (19) МСУ при эталонном регуляторе $\mathbf{R}(p)$.

Учитывая (20), разложение следа $\mathbf{W}(\mathbf{R})$ в ряд Тэйлора по степеням вариаций $\mathbf{R}$, ограничиваясь членами первого порядка, примет вид:

$$\mathrm{sp}[\mathbf{W}(\mathbf{R} + \Delta\mathbf{R})] = \mathrm{sp}[\mathbf{W}(\mathbf{R})] + \\ + \mathrm{sp}[\mathbf{S}(\mathbf{R})\cdot(\Delta\mathbf{R})] = \mathrm{sp}[\mathbf{W}(\mathbf{R}) + \mathbf{W}(\Delta\mathbf{R})]. \quad (21)$$

Здесь $\mathbf{W}(\Delta\mathbf{R}) = \mathbf{S}(\mathbf{R})\cdot\Delta\mathbf{R}$ – матрица вариаций свойств МСУ (дополнительное движение, вызванное вариациями $\Delta\mathbf{R}(p)$).

Анализ матриц $\mathbf{S}(\mathbf{R})$ и $\mathbf{W}(\Delta\mathbf{R})$ показал, что возможности структурного упрощения многомерных регуляторов $\mathbf{R}(p)$ в МСУ в целом аналогичны описанным выше для одномерных систем. Это сходство опирается на очевидную. устойчивость передаточной матрицы чувствительности (20) для исходно устойчивой МСУ (19). Так же как и для одномерных систем, при анализе МСУ могут быть сформулированы утверждения, приведенные выше. При этом очевидно, что возможность вариации параметров и структуры СУ (и МСУ) тесно связано с устойчивостью соответствующих функций чувствительности.

С примерами упрощения многомерных регуляторов можно ознакомиться в [12, рубрика «Теория регулирования/Многомерные системы»]; там же приведены ресурсы, подтверждающие справедливость выводов применительно к МСУ.

Следует отметить, что рассмотренные вопросы, безусловно, не исчерпывают все области практического приложения теории чувствительности. В данной статье, составленной по темам доклада автора на научном семинаре ФТК СПбГПУ, представлены лишь отдельные вопросы практики создания и анализа СОИ и СУ с применением теории чувствительности, каждый из которых заслуживает детального рассмотрения.

Показано, что анализ чувствительности позволяет не только обогатить синтез соответствующих систем, но и обеспечить определение их свойств, возможности вариаций параметров, важных при технической реализации.

Материал подготовлен при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», грант № 2.1.2/5534

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Розенвассер, Е.Н.** Чувствительность систем автоматического управления [Текст] / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. –М.: Наука, 1981. –464 с.

2. **Yusupov, R.** Sensitivity of Automatic Control Systems [Text] / R. Yusupov, E. Rozenwasser. –CRS Press, Roca Raton, London, NY, Washington, DC, 1999. –436 p.

3. **Городецкий, В.И.** Методы теории чувствительности в автоматическом управлении [Текст] / В.И. Городецкий, Ф.М. Захарин, Е.Н. Розенвассер [и др.]. –Л.: Энергия, 1971. –345 с.

4. **Розенвассер, Е.Н.** Чувствительность систем автоматического управления [Текст] / Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. –Л.: Энергия, 1969. –208 с.

5. **Ивановский, Р.И.** Теория чувствительности в задачах управления и оценки [Текст] / Р.И. Ивановский, А.А. Игнатов. –Л.: ЦНИИ «Румб», 1986. –111 с.

6. **Фетисов, В.Н.** Теория чувствительности в задачах стохастического управления [Текст] / В.Н. Фетисов // Тезисы докл. VI Всесоюз. совещ. по теории инвариантности, теории чувствительности и их применениям. –М.: ИПУ, 1982. –С. 114–115.

Eslami, M. Theory of sensitivity in dynamic systems. An introduction [Text] / M. Eslami. –Springer-Verlag, Berlin, 1994. –600 p.

8. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://mas.exponenta.ru/literature/LSens.pdf

9. **Ривкин, С.С.** Статистическая оптимизация [Текст] / С.С. Ривкин, Р.И. Ивановский, А.В. Костров. –Л.: Судостроение, 1976. –280 с.

10. **Дмитриев, С.П.** Высокоточная морская навигация [Текст] / С.П. Дмитриев. –Л.:Судостроение, 1991. –222 с.

11. **Степанов, О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задаче обработки навигационной информации [Текст] / О.А. Степанов. –ГНЦ РФ «Электроприбор», 2009. –496 с.

12. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://mas.exponenta.ru

13. **Ивановский, Р.И.** Синтез многомерных систем управления. Проблема устойчивости [Текст] / Р.И. Ивановский, А.В. Нестеров // Тр. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2005). –СПб. –2005.

14. **Ивановский, Р.И.** Теория вероятностей и математической статистики. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad [Текст] / Р.И. Ивановский. –СПб.: БХВ, 2008. –528 с.

УДК 681.3.06(075.8)

Ю.Б. Сениченков, Цзычэнь Чжан

КОНВЕРТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Математические модели сложных динамических систем могут реализовываться в различных системах программирования (Fortran, C) или моделирования (Matlab, Modelica, Ptolemy). Смена инструмента моделирования подразумевает перевод описания уже созданных математических моделей с одного языка моделирования на другой. Сделать это рядовому пользователю трудно из-за больших объемов текстов и сложности используемых языков и систем программирования. Приходится использовать системы автоматического перевода.

К недостаткам автоматического перевода можно отнести возможное появление дополнительных ошибок и ухудшение эффективности нового кода. В то же время перевод с незнакомого пользователю языка на хорошо ему знакомый язык дает возможность разобраться с внутренним устройством компонента и модифицировать его в случае необходимости. Если возможен прямой и обратный перевод, то появляется дополнительное преимущество: часть компонентов можно разрабатывать в одной системе, а часть – в другой, в зависимости от их особенностей, и сравнивать различные реализации.

Необходимость перевода (конвертирования моделей) осознана многими разработчиками [3–10].

В этой статье речь пойдет о конвертировании моделей сложных динамических систем с языка пакета Simulink на язык пакета Rand Model Designer (RMD) [1].

Конвертирование моделей SIMULINK в модели RMD

Пакет Simulink долгие годы оставался для многих отечественных пользователей единственным средством компонентного моделирования сложных динамических систем: непрерывных, дискретных и непрерывно-дискретных, событийно-управляемых или гибридных, иерархических.

С появлением отечественных пакетов ИСМА, МВТУ, MvStudium, AnyLogic, RMD возникла необходимость перевода описаний созданных в Simulink моделей на языки отечественных пакетов.

В пакете Simulink [11] с каждым блоком связаны три вида переменных – входы u, выходы y и переменные состояния x. Каждая из указанных переменных может быть как вектором, так и скалярной переменной. Каждому блоку соответствуют уравнения:

$$\begin{gathered} x = \begin{bmatrix} x_c \\ x_d \end{bmatrix}; \\ y = f_{\text{out}}(t, x, u); \\ x_d = f_{\text{update}}(t, x, u); \\ \frac{dx_c}{dt} = f_{\text{derivate}}(t, x, u), \end{gathered} \qquad (1)$$

где $x = \begin{bmatrix} x_c \\ x_d \end{bmatrix}$ – вектор переменных состояния, включающий в себя непрерывные и дискретные x_c и дискретные x_d переменные; $y = f_{\text{out}}(t, x, u)$ – вектор выходных переменных, вычисляемый на основании входов и переменных состояния; $x_d = f_{\text{update}}(t, x, u)$ – дискретные переменные состояния, вычисляемые в заданных точках дискретного времени; $\frac{dx_c}{dt} = f_{\text{derivate}}(t, x, u)$ – дифференциальные уравнения для непрерывных переменных состояния.

В последних версиях библиотеки компонентов (блоков) пакета Simulink отдельно представлен в виде мини-библиотеки набор наиболее часто используемых блоков (рис. 1). Аналогичная библиотека блоков пакета Simulink, реализованная на языке моделирования MVL (язык моделирования пакета RMD [2]), существует в пакете RMD. Последняя библиотека – пример «ручного» перевода компонентов.

Рассмотрим автоматический перевод описаний моделей, составленных из блоков мини-библиотеки, с языка Simulink на язык MVL. Состав мини-библиотеки позволяет исключить из рассмотрения на первых порах уравнения с запаздыванием (различные варианты блока Delay) и поиск точки переключения в гибридных системах (блок Hit Crossing). В мини-библиотеке

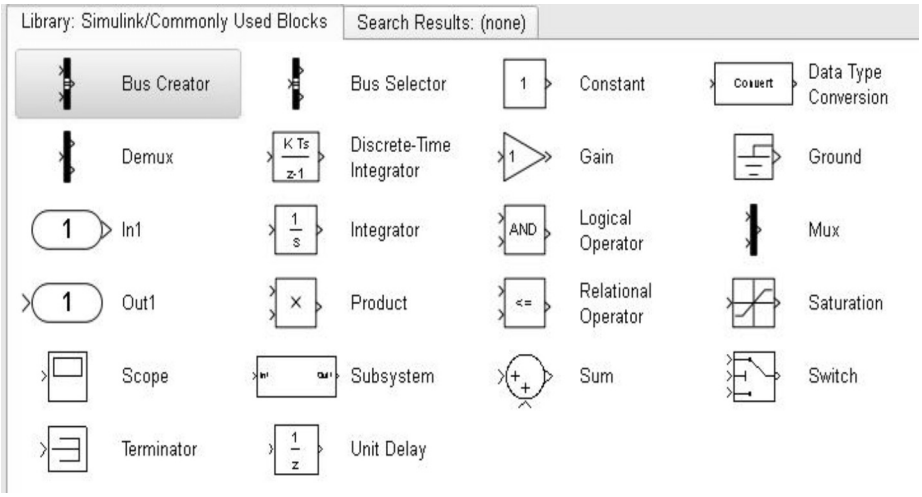


Рис. 1. Наиболее употребительные блоки пакета Simulink

также отсутствуют «триггерные системы» (см. подраздел библиотеки «Порты и подсистемы»). Однако их реализация на языке моделирования MVL с теоретической точки зрения ничем не отличается от реализации блока Saturation, присутствующего в минимальном наборе. С учетом этих отличий можно утверждать, что блоки пакета Simulink могут описываться гибридной системой (системами кусочно-непрерывных алгебро-дифференциальных уравнений). Также очевидно, что и итоговая система уравнений для всей компонентной модели будет системой кусочно-непрерывных алгебро-дифференциальных уравнений.

Графическая форма языка MVL позволяет использовать компоненты с входами и выходами и картами поведения для описания кусочно-непрерывных систем (рис. 2).

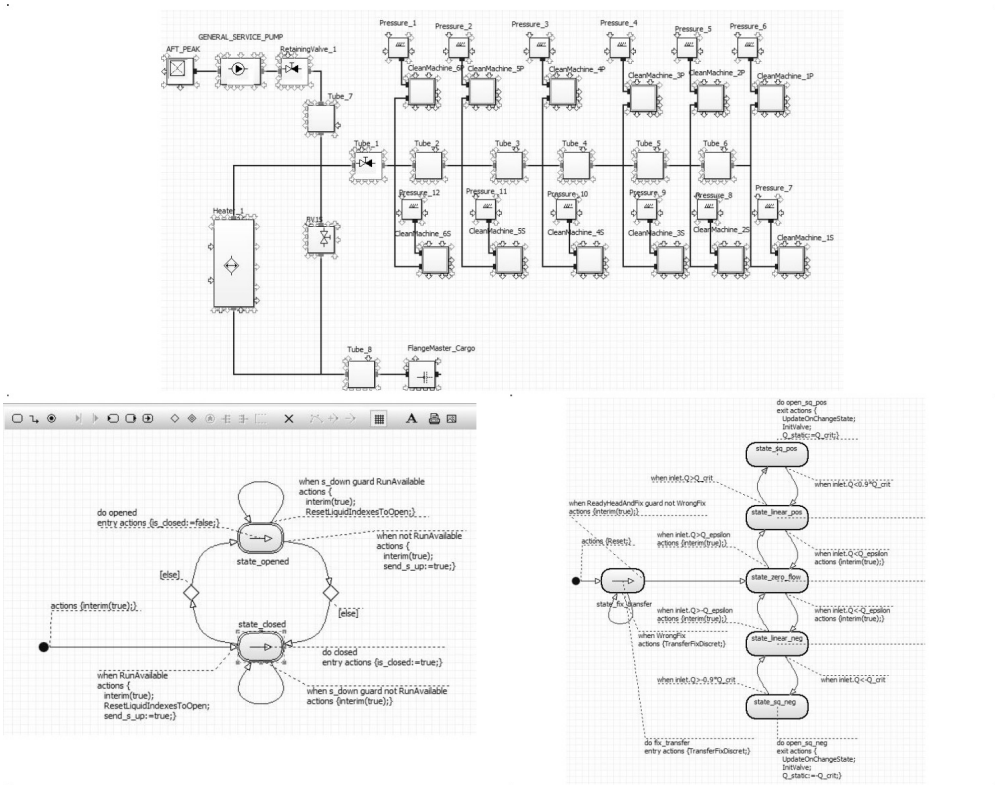


Рис. 2. Компоненты с входами-выходами и картами поведения

При работе с моделями в пакете Simulink существует возможность получить текстовое представление графического описания модели, а в пакете RMD есть возможность по текстовому представлению модели на языке MVL восстановить графическое. Таким образом, на вход разрабатываемого конвертора поступает текстовая форма описания модели Simulink и преобразуется в текстовую форму языка MVL. Возможны два пути реализации конвертора:

в пакете MVL создаются аналоги всех блоков библиотеки Simulink и в RMD воспроизводится структурная схема исходной модели (рис. 3 *б*);

второй путь предусматривает восстановление итоговой системы модели Simulink и построения для нее однокомпонентной системы с гибридным автоматом, описывающим итоговую кусочно-непрерывную систему алгебро-дифференциальных уравнений (рис. 3 *в*, *г*).

Использование UML в качестве стандартного описания компонентов систем моделирования

Систем моделирования много и они используют различные языки моделирования. Такое разнообразие оправданно и будет еще долго сохраняться, так идет поиск выразительных и интуитивно понятных пользователю описаний, для которых могут создаваться эффективные алгоритмы построения и преобразования итоговых систем уравнений. Таким образом, задача разработки конверторов еще долго будет актуальной. Учитывая большое количество языков моделирования, хотелось бы использовать единую методику конвертирования. Для конвертирования компонентных моделей с «ориентированными блоками» и «гибридным поведением» (компоненты с «входами-выходами» и различными формами представления компонентных уравнений) можно рекомендовать следующую методику:

каждому блоку (библиотечному или пользовательскому) любой системы моделирования ставим в соответствие класс и машину состояний языка UML (UML-описание);

UML-описание используем для прямого и обратного перевода.

Использование UML в качестве промежуточного описания с первого взгляда кажется лишним, во многих случаях без него можно обойтись, однако такой подход обладает следующими преимуществами:

UML-описанием можно воспользоваться для создания конверторов для различных языков моделирования;

машина состояния с описанием активностей

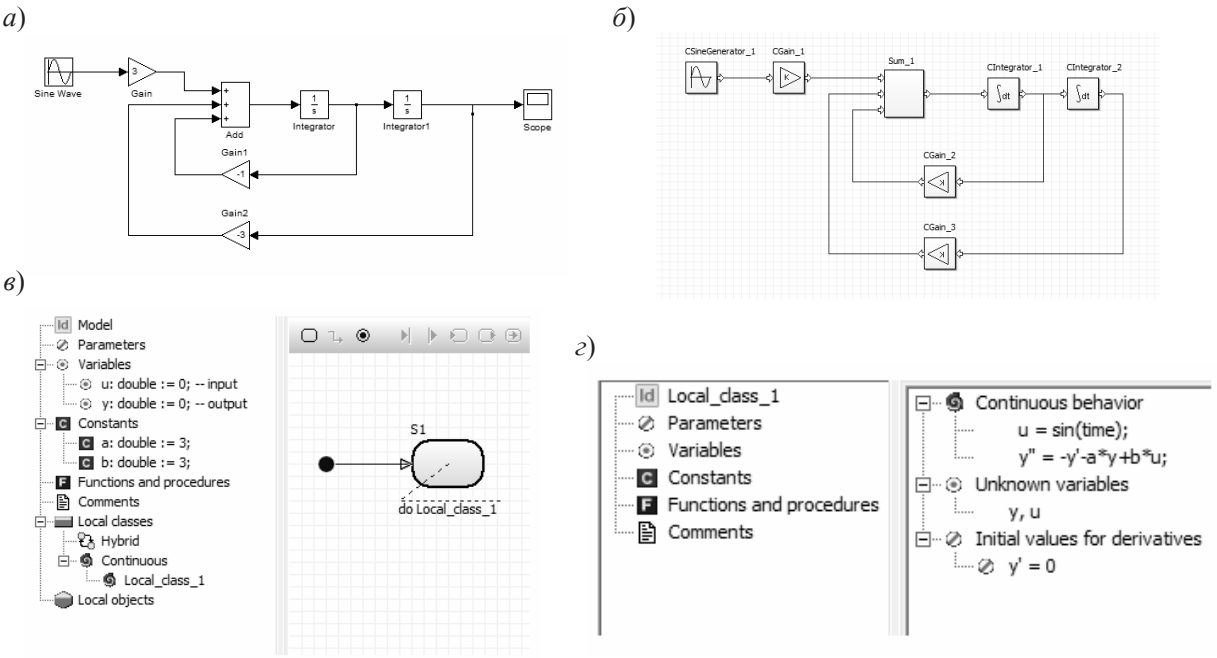


Рис. 3. От структурной схемы пакета Simulink к структурной схеме и картам поведения пакета RMD:
а – структурная схема пакета Simulink; *б* – структурная схема пакета RMD; *в* – описание модели с помощью одного класса пакета RMD; *г* – локальное поведение гибридного автомата

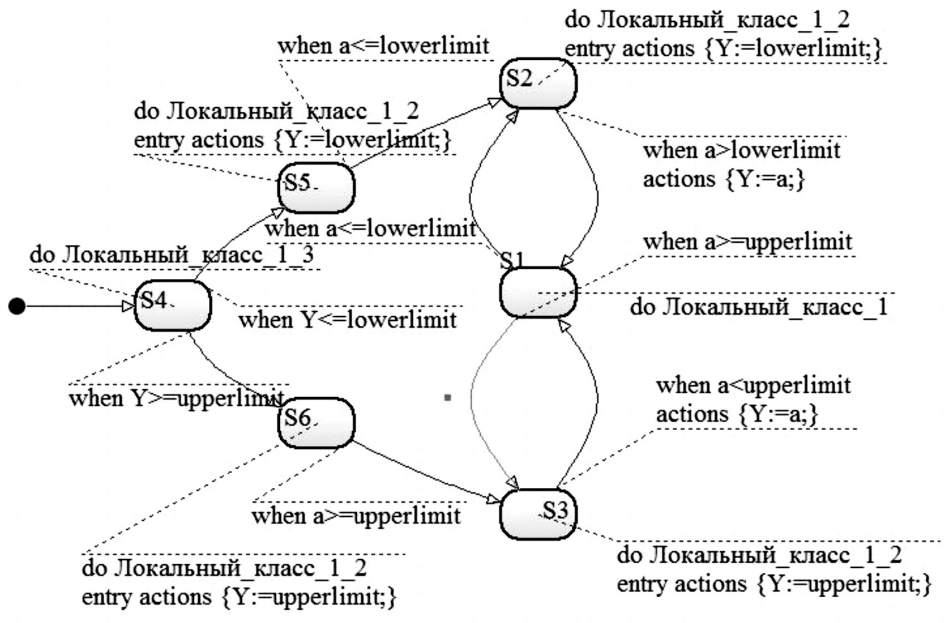


Рис. 4. Гибридный автомат для блока «Интегратор» из мини-библиотеки пакета Simulink

на математическом языке позволяет свести вопрос об эквивалентности компонентов к вопросу об эквивалентности используемых систем уравнений. При этом, к сожалению, необходимо тестировать блоки, т. к. из эквивалентности решаемых уравнений не следует совпадение численных решений. Более того, многие системы моделирования не предоставляют пользователю итоговую систему уравнений, и тогда сравнительный вычислительный эксперимент на представительном множестве примеров остается единственным способом проверки.

Описанная методика реализована для конвертации моделей, построенных из модулей мини-моделей из пакета Simulink в пакет RMD.

Созданы UML-описания блоков мини-библиотеки (рис. 4).

Создан конвертор моделей. Конвертор анализирует входной m.файл модели пакета Simulink, выявляет в нем описания блоков и помещает описания этих блоков на языке MVL в выходной mvl. файл. Затем анализируются связи между компонентами и создается их описание на языке MVL. Завершается построение выходного файла созданием описания класса Model.

Разработан тестовый набор и для него проведено сравнение численных решений.

Рассмотрена новая методика конвертации моделей, написанных на языке пакета Simulink в модели пакета RMD. Конвертация основана на UML-описаниях библиотечных блоков. Разработан макет конвертора; его работоспособность проверена на тестовом наборе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rand Model Designer [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.rand-service.com

2. **Колесов, Ю.Б.** Моделирование систем. Объектно-ориентированный подход [Текст] / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. –СПб.: БХВ, 2006. –236 с.

3. **Чернухин, Ю.В.** Средства трансляции и импорта внешних моделей для систем виртуального моделирования [Текст] / Ю.В. Чернухин, В.Ф. Гузик, М.Ю. Поленов // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. Компьютерное моделирование – 2004. –СПб.: Изд-во «Нестор». – 2004. – Ч. 1. –С. 243–248.

4. **Чернухин, Ю.В.** Инструментальные средства импорта моделей виртуальных моделирующих сред [Текст] / Ю.В. Чернухин, В.Ф. Гузик, М.Ю. Поленов // Искусственный интеллект. –2006. –№ 4. –С. 59–65.

5. **Чернухин, Ю.В.** Организация поддержки импорта внешних программных моделей виртуальной среды VTB [Текст] / Ю.В. Чернухин, В.Ф. Гузик, М.Ю. Поленов // Искусственный интеллект. –2007. –№ 4. –С. 497–502.

6. **Chernukhin, Y.** Deploying Modelica Models into Multiple Simulation Environments [Text] / Y. Chernukhin, M. Polenov, C. Vemulapally [et al.] // Proc. of IEEE International Behavioral Modelling and Simulation Conf.

(BMAS 2005). –San Jose, CA. –2005. –P. 134–139.

7. **Rajarshi, Ray.** Automated Translation of MATLAB Simulink/Stateflow Models to an intermediate format in HyVisual [Text] / Ray Rajarshi. –Chennai Mathematical Institute, 2007.

8. **Schiffelers, R.R.H.** Foundations of a compositional interchange format for hybrid systems. SE Report: Nr. 2006-05 [Электронный ресурс] / R.R.H. Schiffelers, J.E. Rooda // Режим доступа: http://se.wtb.tue.nl

9. **Sfyrla, V.** Compositional Translation of Simulink Models into Synchronous BIP [Электронный ресурс] / V. Sfyrla, G. Tsiligiannis, Ir. Safaka [et al.]. –Verimag Research Report n TR-2010-16, 2010/

10. **Solodovnik, E.** Automatic Model Generation in VTB: Phasedomain Modeling of an Induction Machine [Text] / E. Solodovnik, W. Gao, R. Dougal // 34th Annual North American Power Symp. – Tempe, Arizona. –2002.

11. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.mathworks.com

УДК 004.9; 620.9

А.Н. Беляев, Р.И. Ивановский, Ю.Г. Карпов, К.А. Сотников

SMART GRID. РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЙ

Инициатива создания и внедрения Smart Grid получает все более широкое распространение во всем мире: давно назрела необходимость кардинального решения проблем, связанных с крупномасштабными авариями электросетей, огромными потерями в линиях электропередач, архаичными технологиями диспетчирования и управления энергосетями, трудностями включения в энергосистему новых потребителей и альтернативных источников энергии. Среди основных целей внедрения технологий Smart Grid – существенное повышение эффективности и надежности электроэнергетических систем. В России такие системы называются «интеллектуальными энергосистемами», «умными сетями», «активно-адаптивными энергосистемами» и т. п. Предпосылками развития электрических сетей подобного рода являются развитие распределенной генерации, появление «гибких» элементов, новые возможности аккумулирования энергии, появление новых технологий измерений, развитие информационных технологий.

Пилотные проекты по развитию интеллектуальных сетей уже появились в США, в Китае, в нескольких странах Европы. В России в феврале 2010 г. премьер-министр В.В. Путин поставил перед председателем правления ОАО «ФСК ЕЭС» О. Бударгиным задачу создания новой технологической платформы Единой энергосистемы России на базе интеллектуальных сетей. ФСК была разработана пятилетняя программа внедрения «умных» сетей [1, 2] на период 2010–2014 гг., на реализацию первого этапа которой предусмотрены инвестиции в размере 519 млрд руб. В настоящее время разработаны реальные концепции реализаций пилотных проектов «интеллектуальной» сети на территории ОЭС Востока (Амурская область, Якутия, Приморский и Хабаровский край) [1]. Внедрение пилотных проектов Smart Grid ведется и в рамках проектов ОАО «Холдинг МРСК».

Разработка технологий Smart Grid в России – одна из немногих технологических революций, где Россия имеет шанс идти в ногу с наиболее передовыми развитыми странами.

Что такое Smart Grid?

В настоящее время в печати и электронных ресурсах встречается множество определений понятия Smart Grid. Так, международный Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE) дает следующее определение: «полностью интегрированная, саморегулирующаяся и самовосстанавливающаяся электроэнергетическая система, имеющая сетевую топологию и включающая в себя все генерирующие источники, магистральные и распределительные сети и все виды потребителей электрической энергии, управляемые единой сетью автоматизированных устройств в режиме реального времени» [3]. В материалах Европейского Союза (EU) Smart Grid – это «... электрические сети, удовлетворяющие требованиям

энергоэффективного и экономичного функционирования энергосистемы за счет скоординированного управления и при помощи современных двусторонних коммуникаций между элементами электрических сетей, электрическими станциями, аккумулирующими источниками и потребителями» [4]. Министерство энергетики США дает свою трактовку понятия Smart Grid: «... полностью автоматизированная система, обеспечивающая двусторонний поток электрической энергии и информации между энергообъектами. Smart Grid за счет применения новейших технологий, инструментов и методов наполняет электроэнергетику знаниями, позволяющими резко повысить эффективность» [5]. В формулировках Национальной лаборатории по энергетическим технологиям США (NETL): «Smart Grid – совокупность организационных изменений, новой модели процессов, решений в области информационных технологий, а также инноваций в сфере АСУ ТП и диспетчерского управления в электроэнергетике».

Определения Smart Grid в отечественных публикациях еще более разнообразны. Одно из наиболее общих определений этого понятия приведено в [7]: «... развитие концепции [Smart Grid] в России может рассматриваться … как комплекс взаимосвязанных задач: научно-технологических, бизнес-задач (определяющих стратегии развития компаний и регионов), экономических (обеспечивающих повышение экономической эффективности как энергетического комплекса, так и других отраслей), социальных (связанных с созданием новых рабочих мест) и др.».

Возникает вопрос о том, какое из многочисленных определений является наиболее полным и правильным, поскольку из приведенных примеров следует, что сегодня отсутствует единое понимание концепции Smart Grid. Такое понимание, несомненно, необходимо для того, чтобы уже на первых этапах развитиия этой важной области не сделать системных ошибок, которые могут впоследствии замедлить ее развитие и/или привести к дополнительным затратам средств, временных и трудовых ресурсов.

Анализируя современные многочисленные концепции Smart Grid можно сделать вывод о том, что все определения являются лишь частично правильными, каждое из них отражает одну более или менее узкую область, в рамках которой авторы соответствующих концепций проводят исследования или разработки, либо имеют свои инвестиции. Здесь можно вспомнить восточную притчу о том, как несколько слепцов пытались описать слона. Один, трогая хвост, говорил, что слон – это веревка, другой, нащупав ногу, говорил, что слон – это колонна, третий, ощупав бивни, говорил, что слон – это копье. Конечно, все они правы со своей точки зрения, но все же слона надо определять несколько по-другому.

Очевидно, что концепция внедрения Smart Grid должна рассматриваться более широко, системно, не с точки зрения производителей отдельных «умных» элементов, разработчиков определенных типов аппаратуры или собственников конкретных технологий.

Реализация принципов Smart Grid – это бесконечный процесс внедрения в электроэнергетические системы современных инновационных технологий, в т. ч. информационных и телекоммуникационных, для достижения основных целей: повышения энергоэффективности, экономичности, надежности, устойчивости к авариям, и т. п. Этот процесс начался давно и будет продолжаться, аналогично тому, как внедрение инновационных технологий происходит в автомобилестроении, телевидении, коммуникации, спорте и во множестве других сфер нашей жизни.

Внедрение инновационных технологий в электроэнергетику отличается от подобных процессов в других сферах своей масштабностью, огромными затратами, огромным возможным выигрышем в эффективности, но и огромными материальными потерями при выборе неверной стратегии развития. Эти отличительные черты инновационных процессов определяются самим объектом: масштабностью и взаимозависимостью фактически всех параметров и характеристик единой электроэнергетической системы огромной страны. Невозможно, например, только локально, в одном доме, районе или городе внедрить противоаварийное управление энергосистемой: такая инновация затронет все уровни энергосистемы: генерацию, транспорт, распределение и потребление. Далее, указанная выше концепция развития четко определяет, что не существует финальной конфигурации Smart Grid – в процессе внедрения технологии могут претерпевать изменение и развитие, ранее внедренные в ЭЭС средства могут устареть и вызвать необходимость модернизации.

Такая концепция развития Smart Grid накладывает определенные требования на внедрение инновационных технологий или устройств

в энергосистему, она ограничивает выбор решений, принимаемых при построении или модернизации сети. Такие технологии и устройства должны быть согласованными и не противоречащими друг другу. Согласованность должна достигаться путем повсеместного использования четких стандартов на аппаратные и программные средства как существующих, так и новых, разрабатываемых в процессе внедрения новых технологий.

Процесс реализации Smart Grid может быть рассмотрен как внедрение в электроэнергетические системы (ЭЭС) инновационных решений на всех уровнях, при этом необходимо использовать системный подход. Использование системного подхода позволит как произвести адекватную постановку задачи, так и выработать эффективную стратегию на всех уровнях разработки и внедрения современных технологий, учитывая сложность и многообразие связей и механизмов ЭЭС.

Учитывая постоянную, итеративную изменяемость Smart Grid, неотъемлемой характеристикой результатов внедрения новых технологий и элементов должно являться обеспечение целостности, надежности функционирования ЭЭС в целом, преемственности, что может быть достигнуто путем четкого задания следующих требований ко всем внедряемым решениям:

• *комплексность* – каждый отдельный проект в рамках Smart Grid должен являться внедрением технологического решения под ключ с полным решением задач, возникающих при внедрении новой технологии;

• *развиваемость* – каждый проект должен учитывать возможные перспективы развития соответствующих технологий;

• *масштабируемость* – каждый проект должен обеспечивать возможность тиражирования, расширения, использования в широком спектре подобных и смежных систем, использования заново в других решениях;

• *согласованность* – каждый проект должен быть максимально согласован с существующими решениями, четко следовать спецификациям и стандартам в соответствующей сфере;

• *системность* – каждый проект должен учитывать и анализировать влияние его внедрения на всех уровнях функционирования ЭЭС: уровнях генерирования, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

Таким образом, предлагаемый подход не ограничивает, а сочетает в себе большинство существующих в настоящее время определений Smart Grid, предлагая рассматривать процесс реализации интеллектуальных сетей как совокупность внедрения взаимосвязанных, взаимозависимых, взаимодополняющих законченных проектов, удовлетворяющих перечисленным выше принципам комплексности, развиваемости, масштабируемости, согласованности и системности. Подобное решение позволит каждому разработчику, каждой научной или внедренческой группе найти свое место, рамки и ограничения на широком, необъятном поле Smart Grid.

В качестве примера, иллюстрирующего проблему и предлагаемую концепцию, рассмотрим процесс внедрения в ЭЭС новой технологии: «умных» счетчиков. Безусловно, сам факт их разработки является важным научным и техническим результатом, но для внедрения таких счетчиков в Smart Grid и обеспечения интеллектуальной составляющей необходимо выполнить комплексный проект, включающий следующие работы:

установка «умных» счетчиков;

интеграция счетчиков с сетью и другими интеллектуальными устройствами;

разработка и утверждение нормативных актов;

разработка и внедрение возможностей применения стратегий гибкой тарификации;

внедрение средств дистанционного сбора информации (PLC и пр.);

разработка и внедрение алгоритмов мониторинга, учета и контроля;

внедрение системы автоматических расчетов (биллинга);

разработка стандартов представления и хранения информации;

внедрение систем обработки и хранения учетной информации

и т. д.

Технология реализации проектов Smart Grid

Представленная концепция Smart Grid должна поддерживаться структурированной технологией, обеспечивающей выполнение требований к реализации отдельных законченных приложений.

Процесс внедрения в существующие ЭЭС новых технологий и устройств, источников и накопителей энергии, технологий сбора, хранения и учета информации, информационных технологий в рамках концепции Smart Grid влечет появление

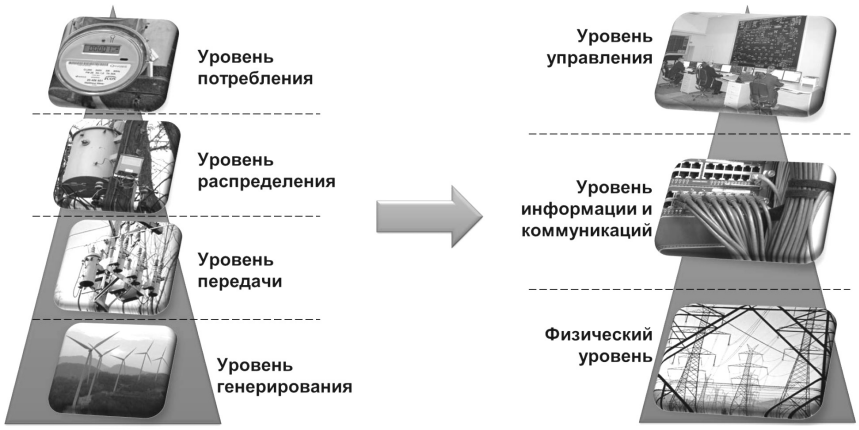


Рис. 1. Уровни применения технологий в области Smart Grid

дополнительной градации использования приложений, появление «нового измерения» (рис. 1).

Весь спектр выполняемых работ при внедрении технологий естественно разбить на три уровня: физический, информации и коммуникаций, управления. Такая структуризация удобна наряду с традиционной градацией (генерирование, передача, распределение, потребление). К физическому уровню могут быть отнесены устройства генерации, передачи, распределения и потребления электрической энергии (например, сверхпроводниковые индукционные накопители энергии, устройства гибкого регулирования потоков мощности, воздушные линии повышенной пропускной способности и пр.). На уровне информации и коммуникаций располагаются средства и методы сбора, передачи, обработки и анализа данных (например, протоколы, интерфейсы, стандарты, технологии передачи данных и пр.). Уровень управления характеризуется законченными приложениями для решения актуальных проблем (например, средства визуализации, умного учета, биллинга, динамического балансирования нагрузки и пр.).

В приведенном выше примере внедрения новой технологии «умных» счетчиков ясно прослеживается разделение перечисленного комплекса работ по таким уровням. Например, к физическому уровню из перечисленного перечня относятся работы:

установка «умных» счетчиков;

интеграция счетчиков с сетью и другими интеллектуальными устройствами;

внедрение средств дистанционного сбора информации (PLC и пр.).

Для представления, структуризации по уровням и увязывания во времени выполнения комплекса работ в процессе внедрения новой технологии предлагается использовать аппарат *технологических матриц*, основывающихся на методах технологических карт и сетевых графиков, которые в разных модификациях используются в планировании сложных проектов в производстве, строительстве и других областях.

Технологическая матрица – это набор частично упорядоченных во времени работ, распределенных по уровням применения технологий, согласованных по срокам и связям, полностью опирающихся на стандарты, с целью обеспечения требований комплексности, развиваемости, масштабируемости, согласованности, системности.

Предлагаемый аппарат предполагает распределение выполняемых работ по представленным выше уровням: физическому, информации и коммуникаций, управления. В рамках каждой отдельной работы должно быть учтено и проанализировано ее влияние по координате всех «традиционных» уровней ЭЭС: генерирование, передача, распределение и потребление. Технологическая матрица позволяет проанализировать такие характеристики, как требуемые ресурсы, затраты, временной график, связи и пересечения с другими работами и проектами. Упрощенный пример технологической матрицы представлен на рис. 2.

Аппарат технологических матриц – инструмент планирования и согласования работ и ресурсов, дающий возможность произвести оценку, контроль и прогнозирование. Принципиальными отличиями данного аппарата от известных методов технологических карт и сетевых графиков является четкое разделение по уровням применения технологий в двух измерениях, а также от-

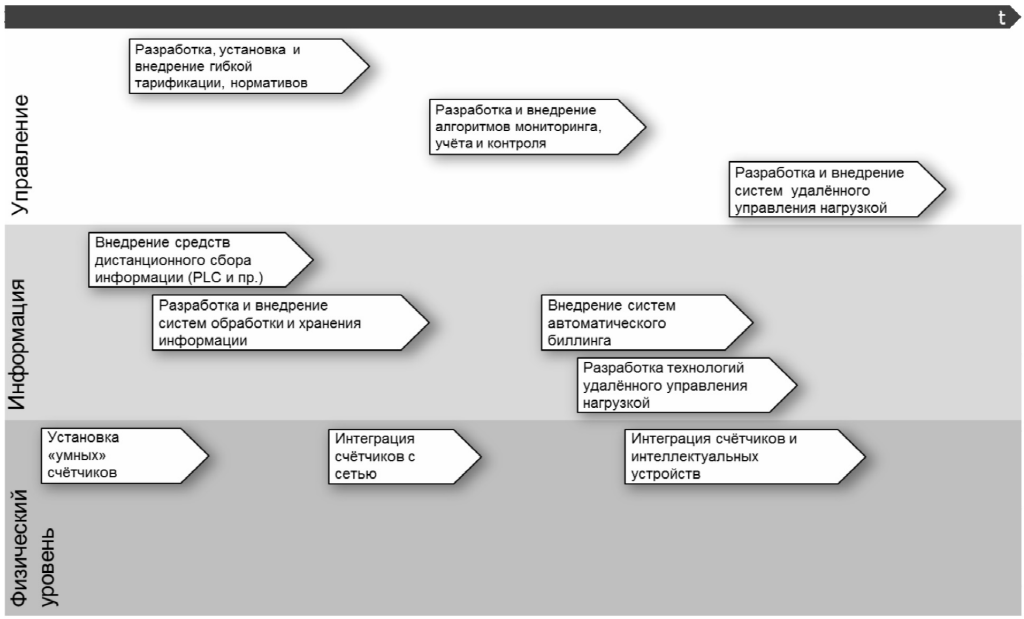


Рис. 2. Упрощенный пример технологической матрицы (внедрение системы интеллектуального учета)

сутствие требования четкого последовательного выполнения отдельных работ (возможность частичного пересечения последовательно выполняемых работ по временной шкале). Кроме того, в предлагаемом аппарате отсутствует четкое разделение процессов и состояний целевого объекта, элементами матрицы являются отдельные работы, обладающие свойством законченности.

Неотъемлемый атрибут процесса внедрения Smart Grid – синергия (взаимное умножение эффективностей) разрабатываемых и внедряемых проектов. Аппарат технологических матриц помогает осуществить наиболее эффективное планирование и систематизацию выполняемых работ, максимально обеспечивая возможность повторного использования результатов, объединения ресурсов, координации и интеграции проектов.

Проект внедрения интеллектуального управления в ЭЭС

Один из проектов по разработке технологий Smart Grid в СПбГПУ – работа по внедрению интеллектуального управления в ЭЭС, которая проводится кафедрами распределенных вычислений и компьютерных сетей и электрических систем и сетей.

Цель работы – применение современных средств, теории и технологий моделирования, визуализации, компьютерной математики и численных методов к решению интегральных задач интеллектуального управления ЭЭС в рамках концепции Smart Grid. Данные технологии заключаются в использовании существующих и в разработке новых методов, алгоритмов и средств регулирования и противоаварийного управления в ЭЭС, основываясь на работах, проведенных коллективом разработчиков в течение последних 10 лет [7–11]. Упрощенная технологическая карта данного проекта приведена на рис. 3.

В рамках представленного проекта выполнены работы по решению широкого спектра проблем, связанных с управлением устойчивостью ЭЭС в нормальных и аварийных режимах, а также по осуществлению восстановления и самовосстановления после системных аварий, в их числе:

создание математических моделей сложных гибридных систем;

разработка адекватных методов прогнозного моделирования;

разработка алгоритмов управления устойчивостью;

оптимизация уровней напряжения и потоков реактивной мощности;

оценивание опасности «лавины напряжения»;

выявление локальных аварийных ситуаций и самовосстановление;

выявление колебаний и демпфирование;

оптимизация потоков активной мощности;

адаптация устройств релейной защиты;

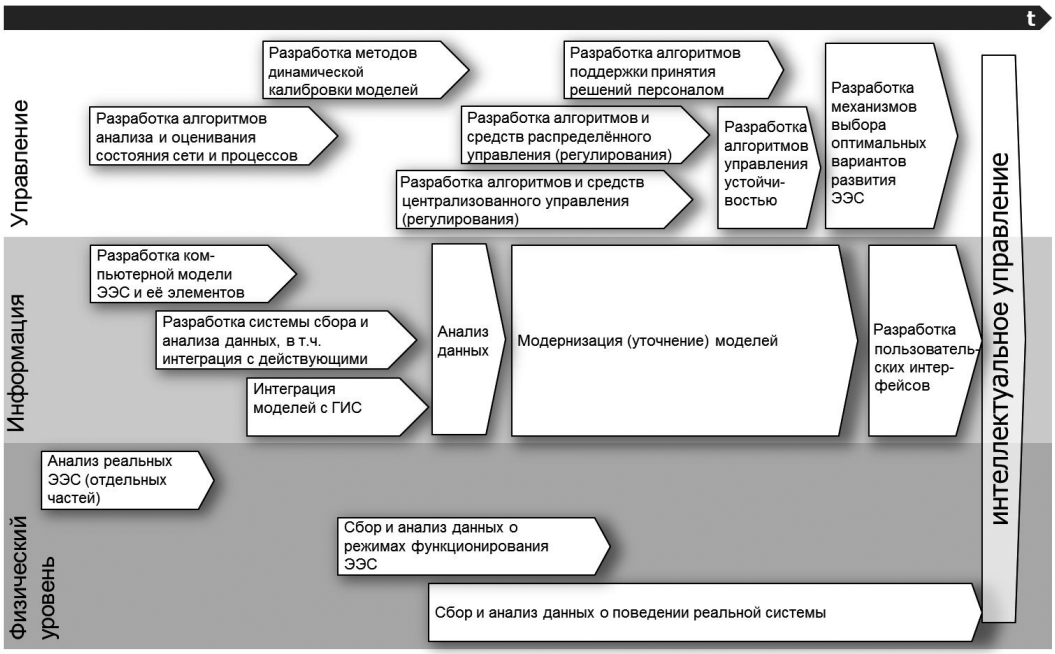


Рис. 3. Упрощенная технологическая карта проекта внедрения интеллектуального управления в ЭЭС

разработка алгоритмов динамической реконфигурации ЭЭС;

разработка комплекса мероприятий по повышению устойчивости ЭЭС;

разработка алгоритмов управления распределенными источниками и накопителями энергии;

создание интеллектуальных тренажеров для оперативного персонала с применением имитационных моделей.

Среди основных задач, на решение которых направлена разрабатываемая технология:

повышение эффективности, надежности, устойчивости, управляемости ЭЭС;

противоаварийное управление;

саморегулирование (self-healing);

автоматическое и автоматизированное восстановления после системных аварий;

минимизация потерь в аварийных ситуациях.

Разрабатываемое приложение позволяет учесть специфику конкретных прикладных задач на единой платформе, в рамках единой базы данных с применением средств визуализации и привязки к местности объектов ЭЭС на основе электронных карт и географических информационных систем (ГИС).

В данной статье рассмотрена проблема развития интеллектуальных электроэнергетических сетей нового поколения (Smart Grid). В рамках предложенной концепции представлена технология планирования разработки отдельных законченных приложений Smart Grid с использованием аппарата технологических матриц, проиллюстрирован пример их использования. Представлен также один из проектов, реализуемых в СПбГПУ, цель которого – внедрение интеллектуального противоаварийного управления в ЭЭС, приведена упрощенная технологическая матрица указанного проекта.

Необходимо отметить, что в СПбГПУ проводятся многие другие исследования, связанные с внедрением концепции Smart Grid в отечественных ЭЭС, среди них:

обеспечение достоверности, надежности и безопасности передачи информационных потоков в ЭЭС;

верификация программ управления энергоснабжением на основе Model Checking;

оценка и управление качеством предоставляемого сервиса в Smart Grid на основе SLA;

применение систем глобальных измерений (WAMS, PMU) в управлении силовыми устройствами;

разработка геоинформационных средств визуализации состояния ЭЭС в реальном времени;

разработка батарей большой мощности на базе литий-ионных полимерных аккумуляторов нового поколения;

выбор и установка регулируемых устройств компенсации реактивной мощности в сетях 110–500 кВ (управляемые шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы);

разработка технических требований к установкам распределённой генерации и критериев оптимального автоматического управления ими;

исследование целесообразности применения компактных воздушных линий повышенной пропускной способности, газонаполненных линий, кабелей из сшитого полиэтилена;

разработка технических требований к устройствам гибкого регулирования напряжения и потоков активной мощности (устройства FACTS, фазоповоротные трансформаторы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ФСК ЕЭС: новый вектор развития сетей [Текст] / Энергоинфо. – 2010. –№11 (46).

2. **Бударгин, О.М.** Умная сеть – платформа развития инновационной экономики [Электронный ресурс] / О.М. Бударгин // Корпоративный сайт ОАО «ФСК ЕЭС». Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/media/File/press_centre/speeches/ Presentation_budargin.pdf (дата обращения: 10.09.2011)

3. Smart Power Grids – Talking about a Revolution [Электронный ресурс] / IEEE Emerging Technology Portal, 2009.

4. European Commission Directorate-General for Research Information and Communication Unit European Communities: European Technology Platform Smart Grids, Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the future [Электронный ресурс] / European Communities. –2006.

5. «Grids 2030». A National Vision for Electricity's Second 100 years [Электронный ресурс] / Office of Electric Transmission and Distribution of USA Department of Energy, 2003.

6. **Кобец, Б.Б.** Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid [Текст] / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. –208 с.

7. **Беляев, А.Н.** Программирование на примере электротехнических и электроэнергетических задач: Учеб. пособие [Текст] / А.Н. Беляев, С.В. Смоловик. –СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. –74 с.

8. **Karpov, Y.** Hierarchical Modelling of Electric Power System Expansion by AnyLogic Simulation Software [Text]/ Y. Karpov, R. Ivanovski, D. Popov [et al.] // IEEE Conf. on Electric Power Systems. –SPb., 2005.

9. **Ивановский, Р.И.** Имитационное моделирование энергосистем. Проблемы и возможности [Текст] / Р.И. Ивановский, В.К. Савков // Электросистемы. –2005. –№ 2–3. –С. 18–20.

10. **Ивановский, Р.И.** Синтез многомерных систем управления. Проблема устойчивости [Текст] / Р.И. Ивановский, А.В. Нестеров // Тр. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2005). –СПб.: Изд-во СПбГЭТУ. –Т. 2. –2005. –С. 62–66.

11. **Ивановский, Р.И.** Противоаварийное управление в электрических сетях на основе имитационных моделей [Текст] / Р.И. Ивановский, А.В. Нестеров, К.А. Сотников // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –СПб.: Изд-во СПбГПУ. –2008. –№2.

УДК 535.3, 577.3, 519.6

К.Г. Куликов

ЗАДАЧА РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ТЕЛАХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ, МОДЕЛИРУЮЩИХ КЛЕТКИ КРОВИ ДЛЯ СЛУЧАЯ IN VIVO

В биофизических исследованиях уделяется большое внимание развитию расчетных методов теории взаимодействия электромагнитных волн с взвесями диэлектрических частиц произвольной формы. Это связано с тем, что информация о поглощении и рассеянии излучения различными взвесями требуется во многих случаях, например, при оптическом зондировании суспензий химических и биологических частиц, разработке различных экспресс-методов изучения биологических объектов и т. д. Следует отметить ряд работ [1–4], в которых исследована возможность теоретического построения оптических характеристик диэлектрических частиц разнообразной формы и структуры.

Классическая задача о рассеянии численно реализуется прямыми методами, позволяющими свести данную проблему к решению системы ал-

гебраических уравнений, или методом разделения переменных. В первом случае используется либо интегральное уравнение, которое решается с помощью Фурье-преобразования вектора электрического поля внутри рассеивателя (метод импульсного представления), заменой рассеивающего объекта системой поверхностных токов (метод ЕВСМ) или соответствующей их объемной плотностью (метод индуцированных токов), либо разложение полей по вектор-сферическим функциям – решениям волнового уравнения Гельмгольца с последующей их «сшивкой» на поверхности рассеивателя. В случае метода разделения переменных в соответствующих системах координат задача сводится к интегрированию системы уравнений Максвелла относительно векторов *E*, *H*, удовлетворяющих граничным условиям на поверхности рассеивающего объекта и условию излучения в специальных системах координат, соответствующих симметрии тела и позволяющих разделить переменные в уравнении Максвелла.

Отметим, что существует ряд аппроксимаций, разрешающих получить достаточно точные результаты для определения ограниченных областей исследования. К ним относят: метод Рэлея–Ганса–Дебая [5]; метод геометрической оптики, применяющийся для больших (относительно длины волны падающего излучения) частиц [6]; аномальной дифракции [7, 8]; итерационные методы [9].

Следует отметить, что приближение аномальной дифракции является одним из вариантов приближений высоких энергий или коротких длин волн. Среди них наиболее известны приближение Венцеля–Крамерса–Бриллюэна (ВКБ) и эйкональное приближение [10, 11].

Среди других приближенных методов отметим метод возмущений [12], основанный на разложении неизвестного решения задачи рассеяния по малому параметру в окрестности точного решения. В применении к несферическим частицам это означает, что решение ищется в виде малых отклонений от решения Ми, вызванных малыми отклонениями формы от идеальной сферы.

Таким образом, проведенный анализ отмеченных путей решения задачи рассеяния на телах произвольной формы показал, что наиболее удобным и надежным является метод интегральных уравнений, называемый *методом расширенных граничных условий* [13, 14]. Метод позволяет решать задачу рассеяния для проводящего диэлектрического тела произвольной формы, освещаемого плоской электромагнитной волной. Отметим, что метод Т-матрицы дает точное решение задачи рассеяния света частицей произвольной формы в виде бесконечных рядов, однако максимальное число членов разложения, требующееся для достижения разумной точности, зависит от формы, размера и показателя преломления рассеивателя.

В настоящей работе построена математическая модель, позволяющая варьировать электрофизические и геометрические параметры (толщины слоев) моделируемой биологической структуры и на каждый просчитанный вариант представляющая результат в виде графика, описывающего зависимость интенсивности лазерного излучения от электрофизических характеристик модельной структуры. Задача состоит из нескольких частей. В первой части необходимо найти коэффициент отражения плоской волны от плавно нерегулярного слоя, моделирующего заданную биологическую структуру [15, 16], состоящую из двух непрерывных слоев и третьего, содержащего неоднородные включения, моделирующие клетки крови с различными показателями преломления. Отметим, что с целью достижения наибольшего соответствия структуре реального объекта исследования, границы раздела слоев модельной среды представлены в виде волнистых поверхностей $z_1 = h_1(x,y), z_2 = h_2(x,y), z_3 = h_3(x,y)$, где $h_1(x,y) = c_1 \sin(a_1 x + b_1 y)$, $h_2(x,y) = c_2 \sin(a_2 x + b_2 y)$, $h_3(x,y) = c_3 \sin(a_3 x + b_3 y)$; $c_1, a_1, b_1, c_2, a_2, b_2, c_3, a_3, b_3$ – некоторые произвольно задаваемые константы, причем $a_i < 1, b_i < 1, c_i < 1\ (i = \overline{1,3})$. Во второй части – решить задачу об отражении гауссова пучка с произвольным поперечным сечением применительно к указанным выше условиям [15].

Построения этих частей носят вспомогательный характер. Непосредственно в настоящей работе решена задача светорассеяния на частицах нерегулярной формы, моделирующей эритроциты произвольно ориентированные в свободном пространстве с учетом их многократного рассеяния, и задача определения зависимости интенсивности излучения от электрофизических характеристик системы кровеносных сосудов, находящихся в верхнем слое дермы и скорости кровотока в капиллярном русле. Отметим, что моделируемая биологическая структура представлена в виде слоев с различными оптическими и геометрическими характеристиками (эпидермис, верхний

слой дермы, кровь, состоящая из форменных элементов, нижний слой дермы), зондируемых лазерным пучком [17].

Матричная формулировка рассеяния для *j*-частицы произвольной формы

С точки зрения биомедицинской оптики цельная кровь представляет собой высококонцентрированную мутную среду, рассеивающие и поглощающие свойства которой определяются главным образом эритроцитами. Поэтому в данном исследовании сосредоточено внимание на присутствии в крови эритроцитов и на их оптических свойствах. Отметим, что эритроцит не содержит клеточных органелл, а его клеточная мембрана очень тонкая и не оказывает значительного влияния на процесс рассеяния света, следовательно, эритроцит можно рассматривать как однородный рассеиватель. В ряде работ эритроцит рассматривается как однородная сфера с объемом, равным объему эритроцита [18–19], что можно рассматривать как первое приближение, а в более детальной разработке целесообразно рассматривать эритроцит как тело нерегулярной формы.

Предположим, что размеры частицы, моделирующей эритроцит, больше длины волны падающего поля, т. е. $ka^j = (\omega N^j a^j)/c > 1$, $N^j = n^{(o)j} + i\chi^j$, где a^j – радиус частицы с номером j; ω – частота падающего поля, N^j – комплексный показатель преломления j-частицы.

Пусть на группу однородных частиц, моделирующих, например, эритроциты с радиусами a^j и показателями преломления N^j, где j – номера частиц, падает плоская линейно поляризованная электромагнитная волна. Направление падающей волны произвольно. Совокупность частиц рассматривается в трехмерной системе координат, начало которой расположено в центре частицы с некоторым номером j_0. Радиус-вектор любой другой j-частицы обозначим через $\mathbf{r}_{j_0,j}$. Всюду принимается, что поверхность (обозначим ее через s) частицы достаточно регулярна, что к ней применима теорема Грина. Поверхность рассеивателя s имеет непрерывную однозначную нормаль n в каждой точке. Рассматривается только простая гармоническая зависимость от времени с угловой частотой ω, причем множитель $\exp(-i\omega t)$ всюду опускается.

Запишем систему уравнений Максвелла для поля в окрестности частицы с номером j_0, искаженного присутствием других частиц:

$$\nabla \times \mathrm{H} = -ik \in \mathrm{E}, \nabla \times \mathrm{E} = ik\mu\mathrm{H},$$
$$\mathrm{div}\,\mathrm{E} = 0, \mathrm{div}\,\mathrm{H} = 0.$$

На границе между частицей и окружающей средой необходимо наложить граничные условия:

$$n \times E_i - n \times E_s = n \times E_I,$$
$$n \times H_i - n \times H_s = n \times H_I,$$

где k – волновое число; $\in$ – диэлектрическая проницаемость среды; μ – магнитная проницаемость среды; E_s – рассеянное поле; E_I – падающее поле; E_i – внутреннее поле.

Полное поле можно представить в виде $E(r') = E_I(r') + E_s(r')$. Согласно [20] запишем соответствующее интегральное уравнение:

$$E_I(r') + \nabla \times \int_s n \times E(r) G(r,r') ds + \\ + \frac{i}{k \in} \nabla \times \nabla \times \int_s n \times H(r) G(r,r') ds = 0, \quad (1)$$

где $G(r,r')$ – функция Грина, которая определяется следующим образом [20]:
при $r > r'$

$$G(r,r') = \frac{ik}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^{n} (-1)^m E_{mn} \times \\ \times \left[M^3_{-mn}(kr,\theta,\varphi) \cdot M^1_{mn}(kr',\theta',\varphi') + \right. \\ \left. + N^3_{-mn}(kr,\theta,\varphi) \times N^1_{mn}(kr',\theta',\varphi') \right], \quad (2)$$

при $r < r'$

$$G(r,r') = \frac{ik}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^{n} (-1)^m E_{mn} \times \\ \times \left[M^1_{-mn}(kr,\theta,\varphi) \cdot M^3_{mn}(kr',\theta',\varphi') + \right. \\ \left. + N^1_{-mn}(kr,\theta,\varphi) \times N^3_{mn}(kr',\theta',\varphi') \right], \quad (3)$$

где $M_{mn}, N_{mn}, M_{-mn}, N_{-mn}$ – векторные сферические гармоники.

Отметим, что выбор векторных сферических гармоник следует осуществлять на основе свойства инвариантности (в смысле замкнутости): при вращении системы координат векторные сферические гармоники M_{mn}, N_{mn} должны преобразовываться независимо друг от друга. Искомым свойством инвариантности удовлетворяют следующие векторные сферические гармоники [20] :

$$M^J_{mn}(kr) = (-1)^m d_n z^J_n(kr) C_{mn}(\theta) \exp(im\varphi), \quad (4)$$

$$N^J_{mn}(kr) = (-1)^m d_n \left[\frac{n(n+1)}{kr} z^J_n(kr) P_{mn}(\theta) + \right. \\ \left. + \frac{1}{kr} z^J_n(kr) B_{mn}(\theta) \right] \exp(im\varphi), \quad (5)$$

$$B_{mn}(\theta) = i_\theta \frac{d}{d\theta} d^n_{om}(\theta) + i_\varphi \frac{im}{\sin(\theta)} d^n_{om}(\theta),$$
$$C_{mn}(\theta) = i_\theta \frac{im}{\sin(\theta)} d^n_{om}(\theta) - i_\varphi \frac{d}{d\theta} d^n_{om}(\theta), \quad (6)$$

$$P_{mn}(\theta) = i_r d^n_{om}(\theta), d_n = \sqrt{\frac{(2n+1)}{4n(n+1)}}, \quad (7)$$

z^J_n – любая из четырех сферических функций:

$$j_n(p) = \sqrt{\frac{\pi}{2p}} J_{n+\frac{1}{2}}(p), y_n(p) = \sqrt{\frac{\pi}{2p}} Y_{n+\frac{1}{2}}(p),$$
$$h^{(1)}_n = j_n(p) + iy_n, h^{(2)}_n = j_n(p) - iy_n,$$
$$d^n_{om}(\theta) = \frac{(-1)^{n-m}}{2^n n!}\left[\frac{(n+m)!}{(n-m)!}\right]^{1/2} \times$$
$$\times(1-\cos^2(\theta))^{-m/2} \frac{d^{n-m}}{(d\cos(\theta))^{n-m}}[(1-\cos^2(\theta))^n].$$

Запишем разложение падающей волны на поверхности на *j*-частице по векторным сферическим гармоникам [21]:

$$E_I(r')(j) = -\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} iE_{mn} \times$$
$$\times[p^j_{mn} N^1_{mn}(kr') + q^j_{mn} M^1_{mn}(kr')]. \quad (8)$$

Подставив выражения (2), (3) и (8) в интегральное уравнение (1), получим:

$$\frac{ik^2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}(-1)^m \int_s n\times E(r)\begin{pmatrix} N^3_{mn}(kr,\theta,\varphi) \\ M^3_{-mn}(kr,\theta,\varphi)\end{pmatrix} ds +$$
$$+ j\cdot\sqrt{\frac{\mu}{\in}}\int_s n\times H(r)\begin{pmatrix} M^3_{mn}(kr,\theta,\varphi) \\ N^3_{-mn}(kr,\theta,\varphi)\end{pmatrix} ds = -\begin{pmatrix} p^j_{mn} \\ q^j_{mn}\end{pmatrix}.$$

Запишем выражение для внутреннего нуля на *j*-частице по векторным сферическим гармоникам

$$\mathrm{E}(r')(j) = -\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} iE_{mn} \times$$
$$\times \left[d^j_{mn} N^1_{mn}(k_1 r') + c^j_{mn} M^1_{mn}(k_1 r')\right], \quad (9)$$

Запишем выражения для $n\times E(r)$ и $n\times H(r)$:

$$n\times E(r) = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}\left[c^j_{mn} n\times M^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi) + \right.$$
$$\left. + d^j_{mn} n\times N^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi)\right],$$

$$n\times H(r) = -i\sqrt{\frac{\in_1}{\mu_1}}\sqrt{\frac{\in}{\mu}}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} \times$$
$$\times\left[c^j_{mn} n\times N^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi) + d^j_{mn} n\times M^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi)\right].$$

Тогда

$$\frac{ik^2}{\pi}\int_s\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}(-1)^m[c^j_{mn} n\times M^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi) +$$
$$+ d^j_{mn} n\times N^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi)]\begin{pmatrix} N^3_{-mn}(kr,\theta,\varphi) \\ M^3_{-mn}(kr,\theta,\varphi)\end{pmatrix} ds +$$
$$+\frac{ik^2}{\pi}\sqrt{\frac{\in_1}{\mu_1}}\int_s\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}(-1)^m[c^j_{mn} n\times N^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi) +$$
$$+ d^j_{mn} n\times M^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi)]\times$$
$$\times\begin{pmatrix} M^3_{-mn}(kr,\theta,\varphi) \\ N^3_{-mn}(kr,\theta,\varphi)\end{pmatrix} ds = -\begin{pmatrix} p^j_{mn} \\ q^j_{mn}\end{pmatrix}.$$

или в матричном виде

$$\begin{pmatrix} I^{21} + \tilde{m}\cdot I^{12} & I^{22} + \tilde{m}\cdot I^{11} \\ I^{22} + \tilde{m}\cdot I^{11} & I^{12} + \tilde{m}\cdot I^{21}\end{pmatrix}\begin{pmatrix} d^j \\ c^j\end{pmatrix} = -i\begin{pmatrix} p^j \\ q^j\end{pmatrix}, \quad (10)$$

где $\tilde{m}$ – относительный показатель преломления частицы, I^{11}, I^{12}, I^{21} и I^{22} определены ниже.

Запишем разложение для рассеянного поля на *j*-частице по векторным сферическим гармоникам [21]:

$$E_s(r')(j) =$$
$$= \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} iE_{mn}\left[a^j_{mn} N^3_{mn}(kr') + b^j_{mn} M^3_{mn}(kr')\right]. \quad (11)$$

Тогда, подставляя в (1) с учетом (2), (3) и (11), получим

$$\frac{ik^2}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}(-1)^m \int_s n\times E(r)\begin{pmatrix} N^1_{mn}(kr,\theta,\varphi) \\ M^1_{-mn}(kr,\theta,\varphi)\end{pmatrix} ds +$$
$$+ j\cdot\sqrt{\frac{\mu}{\in}}\int_s n\times H(r)\begin{pmatrix} M^1_{mn}(kr,\theta,\varphi) \\ N^1_{-mn}(kr,\theta,\varphi)\end{pmatrix} ds = -\begin{pmatrix} a^j_{mn} \\ b^j_{mn}\end{pmatrix},$$

$$\frac{ik^2}{\pi}\int_s\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}(-1)^m[c^j_{mn} n\times N^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi) +$$
$$+ d^j_{mn} n\times M^1_{m'n'}(k_1 r,\theta,\varphi)$$
$$\times\begin{pmatrix} M^1_{-mn}(kr,\theta,\varphi) \\ N^1_{-mn}(kr,\theta,\varphi)\end{pmatrix} ds = -\begin{pmatrix} a^j_{mn} \\ b^j_{mn}\end{pmatrix}$$

или в матричной форме

$$\begin{pmatrix} a^j \\ b^j\end{pmatrix} = -i\begin{pmatrix} I'^{21} + \tilde{m}\cdot I'^{12} I'^{22} + \tilde{m}\cdot I'^{11} \\ I'^{22} + \tilde{m}\cdot I'^{11} I'^{12} + \tilde{m}\cdot I'^{21}\end{pmatrix}\begin{pmatrix} d^j \\ c^j\end{pmatrix}. \quad (12)$$

$I'^{11}, I'^{12}, I'^{21}$ и I'^{22} будут определены ниже. Объединяя выражения (10) и (11), получим

$$\begin{pmatrix} a^j \\ b^j\end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} I'^{21} + \tilde{m}\cdot I'^{12} & I'^{22} + \tilde{m}\cdot I'^{11} \\ I'^{22} + \tilde{m}\cdot I'^{11} & I'^{12} + \tilde{m}\cdot I'^{21}\end{pmatrix} \times \quad (13)$$

$$\times\begin{pmatrix} I^{21}+\tilde{m}\cdot I^{12} & I^{22}+\tilde{m}\cdot I^{11} \\ I^{22}+\tilde{m}\cdot I^{11} & I^{12}+\tilde{m}\cdot I^{21} \end{pmatrix}^{-1}\times$$

$$\times\begin{pmatrix} p^j \\ q^j \end{pmatrix}.$$

Обозначим матрицы соответственно через Q_1^{11} и Q_1^{31}. Тогда выражение (13) примет вид:

$$\begin{pmatrix} a^j \\ b^j \end{pmatrix} = T_1^j \begin{pmatrix} p^j \\ q^j \end{pmatrix}, T_1^j = -Q_1^{11}\cdot\left[Q_1^{31}\right]^{-1}. \quad (14)$$

Элементы Т-матрицы выражаются в виде поверхностных интегралов:

$$I^{11}_{mnm'n'} = \alpha(-1)^m \int_s [M^3_{(-mn)}(kr)\times M^1_{(m'n')}(k_1 r)]nds,$$

$$I^{12}_{mnm'n'} = \alpha(-1)^m \int_s [M^3_{(-mn)}(kr)\times N^1_{(m'n')}(k_1 r)]nds,$$

$$I^{21}_{mnm'n'} = \alpha(-1)^m \int_s [N^3_{(-mn)}(kr)\times M^1_{(m'n')}(k_1 r)]nds,$$

$$I^{22}_{mnm'n'} = \alpha(-1)^m \int_s [N^3_{(-mn)}(kr)\times N^1_{(m'n')}(k_1 r)]nds,$$

$$I'^{11}_{mnm'n'} = \alpha(-1)^{m'} \int_s [M^1_{(-mn)}(kr)\times M^1_{(m'n')}(k_1 r)]nds,$$

$$I'^{12}_{mnm'n'} = \alpha(-1)^{m'} \int_s [M^1_{(-mn)}(kr)\times N^1_{(m'n')}(k_1 r)]nds,$$

$$I'^{21}_{mnm'n'} = \alpha(-1)^{m'} \int_s [N^1_{(-mn)}(kr)\times M^1_{(m'n')}(k_1 r)]nds,$$

$$I'^{22}_{mnm'n'} = \alpha(-1)^{m'} \int_s [N^1_{(-mn)}(kr)\times N^1_{(m'n')}(k_1 r)]nds,$$

где $\alpha = k^2/\pi$.

Таким образом, коэффициенты разложения рассеянного и падающего полей связаны линейным преобразованием Т-матрицей, являющейся инвариантом относительно направления распространения падающего излучения в фиксированной системе координат и зависящей от физических и геометрических характеристик рассеивающего объекта (таких, как показатель преломления, размер по отношению к длине волны света, морфология).

Электромагнитное поле, падающее на поверхность *j*-частицы, состоит из двух частей: первоначально падающего поля и поля, рассеянного группой других частиц, расположенных в окружающей среде. Тогда можно записать следующее выражение [21]:

$$E_i(j) = E_0(j) + \sum_{l\neq j} E_s(l,j), \quad (15)$$

где $E_s(l,j)$ – сумма рассеянных полей на *j*-частице. Индексы l, j подразумевают переход из l в j координатную систему.

Падающее поле определяется следующим образом [21]:

$$E_0(j) = -\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} iE_{mn}\times$$
$$\times[p^{j_0,j}_{mn} N^1_{mn}(kr) + q^{j_0,j}_{mn} M^1_{mn}(kr)]. \quad (16)$$

Волны падают относительно центра каждой *j*-частицы, т. е. в *j*-системе координат.

Коэффициенты разложения падающей плоской электромагнитной волны имеют следующий вид [20]:

$$p^{j_0,j}_{mn} = 4\pi(-1)^m i^n d_n C^*_{mn}(\theta_{inc})\times$$
$$\times E_{inc}(k_{inc}, r_{j_0,j})\exp(-im\varphi_{inc}),$$

$$q^{j_0,j}_{mn} = 4\pi(-1)^m i^{n-1} d_n B^*_{mn}(\theta_{inc})\times$$
$$\times E_{inc}(k_{inc}, r_{j_0,j})\exp(-im\varphi_{inc}),$$

где $E_{inc}(k_{inc}, r_{j_0,j})$ – вектор линейной поляризации; k_{inc} – волновой вектор; звездочка означает комплексное сопряжение; d_n, B_{mn} и C_{mn} определяется соответственно выражениями (6)–(7).

Запишем выражения для рассеянного поля [21]:

$$E_s(l,j) = -\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} iE_{mn}\times$$
$$\times[p^{l,j}_{mn} N^1_{mn}(kr) + q^{l,j}_{mn} M^1_{mn}(kr)], \quad (17)$$

где $p^{l,j}_{mn}, q^{l,j}_{mn}$ определены в [21].

Объединяя выражения (11), (15)–(17), с учетом (14) получаем бесконечную систему линейных алгебраических уравнений для *j*-й частицы произвольной формы:

$$\begin{pmatrix} a^j \\ b^j \end{pmatrix} = T^j\left[\begin{pmatrix} p^{j_0,j} \\ q^{j_0,j} \end{pmatrix} + \sum_{l\neq j}\begin{pmatrix} A(l,j) & B(l,j) \\ B(l,j) & A(l,j) \end{pmatrix}\begin{pmatrix} a^j \\ b^j \end{pmatrix}\right], \quad (18)$$

где коэффициенты $A(l,j), B(l,j)$ определены в [21]. Полученную систему (18) необходимо решать методом редукции.

После нахождения из системы (18) коэффициентов a^j_{mn}, b^j_{mn}, можем записать в основной системе координат выражение для рассеянного поля:

$$E_s = \sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n} iE_{mn}[a_{mn} N^3_{mn}(kr) + b_{mn} M^3_{mn}(kr)]. \quad (19)$$

Покомпонентная запись рассеянного поля имеет вид:

$$E_{s\theta} \sim E_0 \frac{e^{ikr}}{-ikr}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}(2n+1)\frac{(n-m)!}{(n+m)!}\times$$
$$\times[a_{mn}\tau_{mn} + b_{mn}\pi_{mn}]\, e^{im\phi}, \quad (20)$$

$$E_{s\phi} \sim E_0 \frac{e^{ikr}}{-ikr}\sum_{n=1}^{\infty}\sum_{m=-n}^{n}(2n+1)\frac{(n-m)!}{(n+m)!}\times \quad (21)$$

$$\times[a_{mn}\pi_{mn}+b_{mn}\tau_{mn}]\,e^{im\phi},$$

где

$$\tau_{mn}=\frac{\partial}{\partial\theta}P_n^m(\cos\theta),\pi_{mn}=\frac{m}{\sin\theta}P_n^m(\cos\theta).$$

Символ (~) означает, что выражения (20) и (21), вытекающие из (19) при ($kr >> 1$) понимаются в асимптотическом смысле. Аналогично получаются выражения для компонент магнитного поля $H_{s\phi}, H_{s\theta}$.

Кратко рассмотрим вывод отражательных формул для гауссова пучка. Как показано в работе [15], задача решается путем разложения полей встречных волн по плоским волнам в области среды 1 и их отражения слоем 2, обратного преобразования с последующим интегральным преобразованием Гюйгенса–Френеля для получения поля в исходном сечении. В результате получим отраженное поле на линии пучка $z''=0$ (в отраженной системе координат):

$$\begin{aligned}
E_{ref}=&\frac{A_{00}^{\cap}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})\Phi(\xi_1'',\xi_2'')}{\alpha}-\\
&-\frac{\in x}{\alpha}\left[A_{10}^{\cap}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})+\frac{k_{13}}{kn_1}\xi_1''A_{0000}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})\right]\Phi(\xi_1'',\xi_2'')-\\
&-\frac{\in y}{\alpha}\left[A_{01}^{\cap}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})+\frac{k_{23}}{kn_1}\xi_1''A_{0000}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})\right]\Phi(\xi_1'',\xi_2'')-\\
&-\frac{\in x\in y}{\alpha}\left[A_{11}^{\cap}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})+\frac{k_{13}}{kn_1}\xi_1''A_{0000}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})+\right.\\
&\left.+\frac{k_{23}}{kn_1}\xi_1''A_{0000}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})\right]\Phi(\xi_1'',\xi_2'')-\\
&-\left[\frac{\in xk_x^0k_{23}}{ikn_1\alpha}\left[\frac{\partial A_{00}^{\cap}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})}{\partial k_{1x}}+\frac{\partial A_{00}^{\cap}(\xi_1''^{\sim}+\xi_2''^{\sim},k_{1y},k_{1x})}{\partial k_{1y}}\right]\frac{\partial\Phi(\xi_1'',\xi_2'')}{\partial\xi_1''}\right]+O(\varepsilon^2).
\end{aligned}\tag{22}$$

$$k_x^0=k_{11}-k_{21},\ k_y^0=k_{12}-k_{22},\ k_x^1=k_{11}+k_{12},\ k_y^1=k_{21}+k_{22},$$

$$\xi_1''^{\sim}=\xi_1''\left(\frac{k_x^1}{kn_1}-\frac{k_{13}k_{1x}k_{1y}}{k_{1z}kn_1}\right),\ \xi_2''^{\sim}=\xi_2''\left(\frac{k_y^1}{kn_1}-\frac{k_{23}k_{1x}k_{1y}}{k_{1z}kn_1}\right),$$

$$\alpha=(a_{11}^2+a_{22}a_{12}+a_{13}^2)(a_{11}a_{21}+a_{22}^2+a_{13}a_{23})+(a_{21}a_{11}+a_{22}^2+a_{23}a_{13})(a_{21}^2+a_{12}a_{22}+a_{23}^2).$$

Выражения k_{11}, k_{21}, k_{12}, k_{22}, k_{31}, k_{32} и a_{11}, a_{22}, a_{21}, a_{31}, a_{32} определены в [15]. Аналогично получаем отраженное поле для *H*.

Расчет скорости кровотока в капилляре

При вычислении скорости кровотока в капилляре рассмотрим преобразование Галилея. Для определенности будем считать, что кровеносный сосуд ориентирован вдоль оси *Ox*. Тогда

$$x=x'+\mathrm{v}_x t,\ y=y'.\tag{23}$$

Подставим выражение (23) в (22) и разложим в ряд Тейлора по v_x, удерживая лишь линейные члены. Подстановка полученного выражения в (24) обеспечивает получение зависимости интенсивности от скорости кровотока в капилляре в момент времени *t*.

При этом интенсивность излучения определяется как

$$\begin{aligned}
I&=\left|E_{(ref)\perp}\right|^2+\left|E_{(ref)\parallel}\right|^2,\\
E_{(ref)\perp}&=\cos(\theta)E_{(ref)z}+\sin(\theta)E_{(ref)x},\\
E_{(ref)\parallel}&=\sin(\theta)E_{(ref)z}-\cos(\theta)E_{(ref)x},
\end{aligned}\tag{24}$$

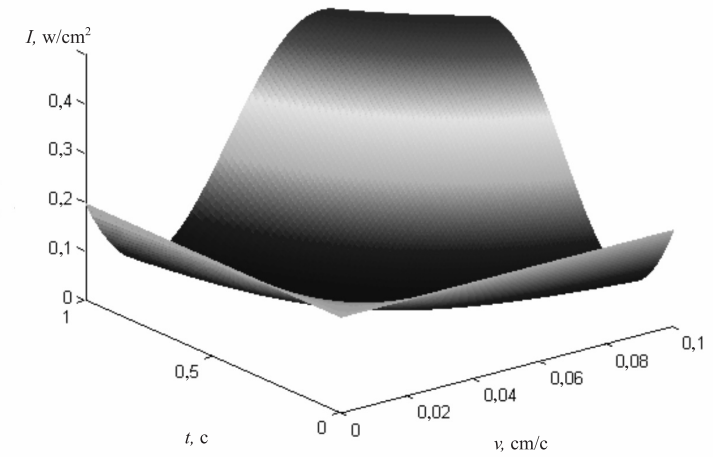
где E_x, E_z соответствуют системе уравнений Максвелла в декартовой системе координат.

Таким образом, на данном этапе получены формулы, позволяющие определить явную зависимость интенсивности лазерного излучения от коэффициентов преломления и поглощения для системы кровеносных сосудов, находящихся в верхнем слое дермы, от скорости кровотока в капиллярном русле в момент времени *t* и от системы координат. Дальнейшее исследование и анализ приведенных зависимостей проведем с помощью численных методов.

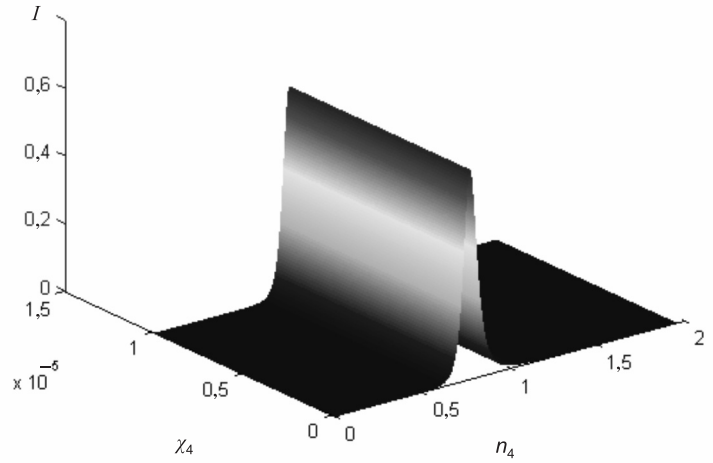
Численные расчеты с модельной средой

Рассмотрим модельную среду, имеющую сле-

а)



б)



Интенсивность излучения He-Ne-лазера в окрестности линии 0,63 мкм (*а*);
Зависимость интенсивности излучения от скорости кровотока в капиллярном русле в момент времени t в окрестности точки $x' = 0{,}0001$, $y' = 0{,}0001$ (*б*)

дующие параметры [22]: коэффициенты преломления слоев $n_2^0 = 1{,}5$, $n_3^0 = 1{,}4$, $n_4^0 = 1{,}35$, $n_5^0 = 1{,}4$; характерные толщины слоев $d_2 = 65 \times 10^{-5}$ м, $d_3 = 56{,}5 \times 10^{-5}$ м, $d_4 = 9 \times 10^{-5}$ м; $n_1^0 = 1$, $\chi_1 = 0 \chi_2 = \chi_3 = \chi_4 = \chi_5 = 10^{-5}$, $a_1 = -0{,}0024$, $b_1 = 0{,}02$, $a_2 = 0{,}021$, $b_2 = 0{,}03$, $a_3 = 0{,}041$, $b_3 = 0{,}051$, $c_1 = c_2 = c_3 = 10^{-2}$; длина волны $\lambda = 0{,}63$ мкм (центр линии гелий-неонового лазера).

На рисунке *а* представлена зависимость интенсивности лазерного излучения от коэффициента преломления и поглощения для системы кровеносных сосудов, находящихся в верхнем слое дермы. На рисунке *б* показана зависимость интенсивности лазерного излучения от скорости кровотока в капилляре в момент времени t в окрестности некоторой точки x', y'. Приведенные количественные оценки позволяют определять изменение скорости кровотока в капиллярном русле в зависимости от оптических свойств крови, что делает возможным изучение физиологических процессов, происходящих в коже.

Рассмотренные зависимости могут использоваться для предсказаний изменений оптических свойств крови и скорости кровотока в капиллярном русле, обусловленных в ней различными биофизическими, биохимическими и физиологическими процессами.

Аналогичные зависимости можно рассчитать для лазеров с другими параметрами. Полученные количественные оценки могут применяться для обработки и интерпретации экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Eremina, E.** [Text] / E. Eremina, Yu. Eremin, Th. Wriedt // Optics Communications. –2005. –Vol. 244. –P. 15–23.

2. **Eremina, E.** [Text] / E. Eremina, Yu. Eremin, Th. Wriedt // J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. –2006. –Vol. 102. –P. 3–10.

3. **Eremina, E.** [Text] / E. Eremina , Th. Wriedt// J. of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. –2004. –Vol. 89. –P. 67–77.

4. **Mishchenko, M.I.** Light scattering by nospherical particles: theory, measurements and applications [Text] / M.I. Mishchenko, W.J. Wiscombe, L.D. Travis; Ed. M.I. Mishchenko [et al.]. –San-Diego: Academic press, 2000. –Ch.2. –P. 29–60.

5. **Latimer, P.** [Text] / P. Latimer // J. colloid and interface. Sci. –1975. –Vol. 53. –№ 1. –P. 102–109.

6. **Cai, Q.** [Text] / Q. Cai, K.-N. Liou // Appl.optics. –1982. –Vol. 21. –№ 19. –P. 3569–3580.

7. **Hammer, M.** [Text] / M. Hammer, D. Schweitzer, B. Michel [et al.] // Appl. Opt. –1998. –Vol. 37. –№ 31. –P. 7410–7418.

8. **Ван де Хлюст, Г.** Рассеяние света малыми частицами [Текст] / Г. Ван де Хлюст; Пер. с. англ. –М.: Изд-во иностр. лит., 1961.

9. **Шатилов, А.В.** Оптика и спектроскопия [Текст] / А.В. Шатилов. –1960. –Т. 9. –№ 1. –С. 86–91.

10. **Ньютон, Р.** Теория рассеяния волн и частиц [Текст] / Р. Ньютон; Пер. с англ. –М.: Мир, 1969.

11. **Klett, J.D.** [Text] / J.D. Klett, R.A. Sutherland // Appl. Opt. –1992. –Vol. 31. –№ 3. –P. 373–386.

12. **Erma, V.A.** [Text] / V.A. Erma // Phys.Rev. –1969. –Vol. 179. –№5. –P. 1238–1246.

13. **Waterman, P.C.** [Text] / P.C. Waterman // Proc. IEEE. –1969. –Vol. 53. –№ 8. –P. 805–812.

14. **Waterman, P.C.** [Text] / P.C. Waterman // Phys. Rev. –1971. –Vol. D3. –№ 4. –P. 825–839.

15. **Куликов, К.Г.** [Текст] / К.Г. Куликов, А.М. Радин // Оптика и спектроскопия. –2004. –Т. 96. –№ 3. –С. 522–534.

16. **Куликов, К.Г.** Моделирование тепловых процессов, вызываемых воздействием лазерного излучения на органические среды [Текст] / К.Г. Куликов // Журнал технической физики. –2009 –Т. 79. –№ 2. –С. 96–103.

17. **Грин, Н.** Биология [Текст] / Н . Грин, У. Стаут, Д. Тейлор; Пер. с англ. –М.: Мир, 1996, –Т. 3. –376 с.

18. **Steinke, J.M.** [Text] / J.M. Steinke, A.P. Shepherd // Appl. Opt. –1988. –Vol. 27. –P. 4027–4033.

19. **Yaroslavsky, A.N.** [Text] / A.N. Yaroslavsky, I.V. Yaroslavsky, T. Goldbach [et al.] // J.Biomed. Opt. –1999. –Vol. 4. –№ 1. –P. 47–53.

20. **Tsang, L.** Theory of Microwave Remote Sensing [Text] / L. Tsang, J.A. Rony, R.T. Shin. –N.Y., 1985.

21. **Куликов, К.Г.** [Текст] / К.Г. Куликов, А.М. Радин // Оптика и спектроскопия. –2002. –Т. 92. –№2. –С. 228–236.

22. **Тучин, В.В.** Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях [Текст] / В.В. Тучин. –Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1998. –383 с.

УДК 681.3 (075.8)

Н.В. Ростов

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ В КОМПЬЮТЕРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Адекватные модели объектов управления (ОУ), необходимые для достоверного проектирования САУ, могут определяться лишь путем идентификации, предполагающей выбор структуры и оценивание параметров модели по экспериментальным данным – числовым массивам измеряемых входных/выходных величин. В теории управления постановкам и методам решения задач идентификации посвящены специальные разделы. Большое внимание этим вопросам уделяется на симпозиумах, проводимых Международной федерацией по автоматическому управлению (IFAC).

Методы идентификации в частотной и временной областях хорошо разработаны [2–4, 7, 8], но ими в основном оцениваются параметры линейных моделей ОУ. На практике часто требуется проводить нелинейную идентификацию ОУ по временным диаграммам – переходным, импульсным и другим характеристикам. Сложным САУ, таким, как исполнительные системы роботов, присущи многомерность и взаимосвязанность каналов электромеханических ОУ, наличие в них упругостей и существенных нелинейностей, а также действие различного рода внешних и внутренних возмущений. Параметрами, трудно определяемыми расчетным путем, являются моменты инерции на валах двигателей, коэффициенты жесткости упругих элементов, параметры нелинейных моделей трений и др. Оценивание параметров нелинейных моделей по частотным характеристикам затруднительно [1].

На рис. 1 приведена общая классификация задач идентификации ОУ, которые могут формулироваться как задачи либо скалярной, либо векторной минимизации в многомерном пространстве параметров.

При скалярной (однокритериальной) идентификации параметры модели ОУ оцениваются алгебраическими или итерационными методами. Многокритериальный (МК) подход основывается на поиске Парето-оптимальных оценок параметров для сформированного векторного критерия идентификации [5, 6]. При этом поиск Парето-решений обычно проводят методами свертки векторного критерия либо по результатам прямого зондирования в многомерном пространстве идентифицируемых параметров, что связано со значительными затратами машинного времени из-за большого числа циклов моделирования ОУ.

Ниже описываются технологии решения задач линейной и нелинейной идентификации ОУ в векторных постановках, позволяющие сокращать затраты машинного времени на локализацию Парето-области за счет косвенного зондирования на начальных этапах методами скалярной идентификации и прямого зондирования на заключительном этапе в ограниченной, достаточно малой подобласти пространства параметров модели ОУ, в т. ч. с применением для построения Парето-границы генетического алгоритма.

Рассмотрим вначале вопросы, связанные с выбором структур моделей ОУ и методов решения задач идентификации в скалярных постановках.

Рис. 1. Варианты задач идентификации

Выбор структур моделей ОУ

Для проектирования САУ необходимы модели динамики ОУ различных видов [2, 4]. При идентификации в общем случае оцениваются не только параметры модели ОУ, но и ее порядок, а также время чистого запаздывания. Кроме того, могут строиться модели внешних возмущений и шумов.

Синтез регуляторов (аналоговых и цифровых) обычно проводят с использованием *линейных непрерывных и дискретных моделей* ОУ в форме передаточных функций $W(s)$ и $W(z)$ или в виде уравнений состояния. Параметры линейных моделей для проведения синтеза могут оцениваться по результатам компьютерного моделирования нелинейных ОУ.

Оптимизацию САУ следует осуществлять по *нелинейным непрерывным моделям* ОУ, параметры которых должны оцениваться по реальным экспериментальным данным. Для верификации результатов компьютерного проектирования САУ требуются *структурные и виртуальные модели*, позволяющие наиболее адекватно воспроизводить (имитировать) динамические процессы, протекающие в реальных ОУ.

Скалярная идентификация ОУ

Линейную идентификацию динамических объектов во временной области наиболее часто формулируют как *линейную задачу наименьших квадратов*

$$J(\theta) = \sum_{n=0}^{N} e^2[n] \to \min_{\theta \in R^m}, \qquad (1)$$

где $e[n] = y_M[n] - y[n]$ – ошибка между выходами модели ОУ и реального объекта в дискретные моменты времени; θ – вектор оцениваемых параметров. Иными словами, в пространстве параметров линейной дискретной модели ОУ необходимо найти решение, доставляющее минимум среднеквадратичному критерию (1).

Если задача (1) решается алгебраическими методами, например, регрессионным методом, то идентификация сводится к решению переопределенной системы линейных алгебраических уравнений $A \cdot \theta = b$, где матрица прямоугольной формы A и вектор b составляются по экспериментальным данным. Однако на практике матрица $A^{\mathrm{T}}A$ псевдорешения $\theta = (A^{\mathrm{T}}A)^{-1}A^{\mathrm{T}}b$ часто оказывается плохо обусловленной, и поэтому для нахождения приближенного решения применяют численные методы с факторизацией и регуляризацией.

В *нелинейной задаче наименьших квадратов* используют критерий

$$J(\theta) = \left\| F(\theta) \right\|^2 = \sum_{i=1}^{N} F_i^2(\theta) \to \min_{\theta \in R^m}, \qquad (2)$$

включающий N-вектор невязки $F(\theta) = (e[n_0], e[n_0 + 1], \ldots, e[n_0 + N - 1])^{\mathrm{T}}$, составляемый по выборке значений ошибки в различные моменты времени. При решении задачи (2) применяют специальные итерационные методы безусловной минимизации – Гаусса–Ньютона или Левенберга–Марквардта. Однако минимизация критерия (2) может быть сопряжена с трудностями при сложном виде поверхности этого критерия в пространстве параметров модели ОУ, наличии на ней оврагов и множества локальных минимумов [7].

Если цель идентификации – получение линейной непрерывной модели ОУ для проведения синтеза аналоговых регуляторов, то осуществляется континуализация, т. е. преобразование построенной линейной дискретной модели ОУ в эквивалентную непрерывную модель.

Идентификация нелинейных непрерывных моделей ОУ в виде системы нелинейных ОДУ или нелинейной структурной Simulink-модели, используемых затем при оптимизации и верификации САУ, осуществляется итерационными методами минимизации критерия, подобного (1), но в непрерывном времени, что сопряжено со значительно большими затратами машинного времени.

В случаях, когда на значения оцениваемых параметров накладываются прямые и функциональные ограничения, определяющие область их допустимых значений, задачи идентификации (1) и (2) решаются методами условной минимизации. Однако учет ограничений непосредственно в критерии (например, в функции Лагранжа со штрафными составляющими) обычно приводит к проявлению овражных свойств модифицированного скалярного критерия [7].

Формирование векторных критериев идентификации

В многокритериальных задачах идентификации минимизируется вектор частных критериев $F(\theta) = [f_1(\theta), \ldots, f_L(\theta)]^{\mathrm{T}}$ в области значений параметров, заданной прямыми и критериальными ограничениями:

$$f_j(\theta) \to \min_{\theta \in D_m}; \quad D^m : \{f_j(\theta) \le f_j^o\}, \quad j = \overline{1, L}. \quad (3)$$

В качестве частных критериев, определяющих близость экспериментальных и модельных характеристик (выходных и внутренних координат объекта $y_j(t)$ и модели $y_{j,\mathrm{M}}(t)$) могут использоваться интегральные квадратичные критерии

$$J_{e_j}(\theta) = \sum_{k=0}^{K_{\max}} e_j^2(t_k) \to \min_{\theta \in R^m}, \quad (4)$$

где $e_j(t_k) = y_j(t) - y_{j\mathrm{M}}(t)$,
и критерии максимальных по модулю ошибок

$$J_{m_j}(\theta) = \max \left| e_j(t_k) \right| \to \min_{\theta \in R^m}. \quad (5)$$

Выбор координат $y_j(t)$, по которым технически возможно проводить идентификацию, связан с наличием в САУ штатных датчиков и возможностью установки дополнительных датчиков. При идентификации во временной области могут использоваться любые временные диаграммы. Например, для оценивания параметров моделей трения удобны характеристики процессов, получаемые при гармонических воздействиях, т. к. эллипсы нагрузок имеют характерные искажения на участках изменения знака скоростей.

Критерии (4) оценивают различие характеристик в целом на интервале моделирования, но не определяют сходство их форм, т. к. они нечувствительны к локальным выбросам. Критерии (5) гарантируют, что расхождение характеристик не превышает их величин, т. е. содержат информацию о близости форм. Поэтому целесообразно использовать критерии обоих видов совместно.

Известно, что параметры ОУ по-разному проявляют себя на разных участках переходного процесса. Моменты инерции в основном влияют на его среднечастотную часть, коэффициенты жесткости упругих элементов – на колебательность в низкочастотной зоне, малые постоянные времени – на высокочастотную часть. Другие параметры ОУ определяют его статический коэффициент передачи. Параметры же нелинейных элементов более сложным образом влияют на переходные и установившиеся процессы в ОУ. В связи со сказанным выше, имеет смысл вычислять частные критерии (4) и (5) на трех подынтервалах переходного процесса

$$f_j(\theta) = [J_{ej}^{\text{нч}}, J_{ej}^{\text{сч}}, J_{ej}^{\text{вч}}, J_{mj}^{\text{нч}}, J_{mj}^{\text{сч}}, J_{mj}^{\text{вч}}]^{\mathrm{T}},$$

а также при различных типах входных воздействий, увеличивая тем самым размерность векторного критерия.

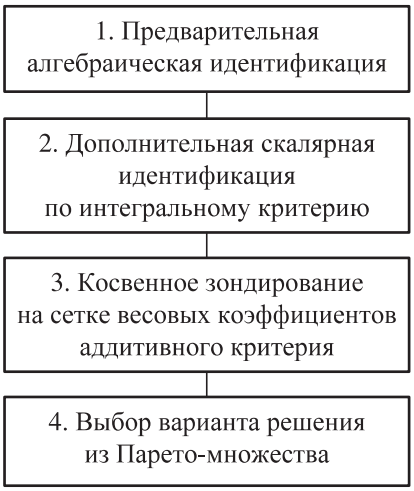


Рис. 2. Этапы линейной МК-идентификации

Сценарии векторной идентификации

Полная размерность критерия (3) может оказываться высокой, а его частные критерии в пространстве параметров модели ОУ могут иметь самые разные функциональные свойства (быть противоречивыми и непротиворечивыми, гладкими и негладкими, с поверхностями овражного и неовражного вида, с множеством локальных минимумов и седловых точек). Поэтому важное значение приобретают методики-сценарии решения задач многокритериальной идентификации на основе их поэтапной декомпозиции, выбора и комбинирования наиболее эффективных методов решения соответствующих подзадач.

Идентификацию линейных операторных моделей типа «вход-выход» и векторно-матричных моделей одномерных ОУ с большим числом оцениваемых параметров целесообразно проводить по сценарию (рис. 2), выделяя четыре этапа.

На первом этапе параметры модели ОУ оцениваются предварительно алгебраическими методами, а при необходимости дополнительно уточняются итерационными методами по интегральному квадратичному критерию на втором этапе. Это дает возможность проведения на третьем этапе косвенного зондирования на сетке весовых коэффициентов аддитивного критерия, соответствующего выбранному векторному критерию, в зоне адекватности реальных и моделируемых процессов. В каждом узле сетки осуществляется скалярная минимизация аддитивного критерия и тем самым локализуется искомая область Парето-решений. При невысокой размер-

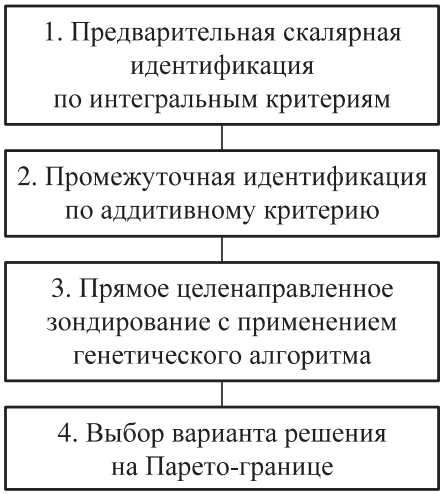


Рис. 3. Этапы нелинейной МК-идентификации

ности векторного критерия затраты машинного времени на косвенное зондирование будут приемлемыми. На четвертом, заключительном этапе из построенного Парето-множества в качестве окончательного решения выбирается вариант с учетом предпочтений проектировщика.

Идентификацию нелинейных моделей одномерных и многомерных ОУ с относительно небольшим числом уточняемых параметров целесообразнее осуществлять по иному сценарию (рис. 3).

Предварительно на первом этапе проводится скалярная идентификация по квадратичным интегральным критериям вида (4) только для выходных координат. На втором, промежуточном этапе идентификации минимизируется аддитивный критерий, составленный из частных критериев с заданными весовыми коэффициентами, и тем самым определяется одна из точек Парето-решений. На третьем этапе в небольшой окрестности относительно решений, полученных на первом и втором этапах, проводится прямое зондирование с применением генетического алгоритма, направленное на построение Парето-границ в пространствах уточняемых параметров и частных критериев [9]. Поскольку генетический алгоритм является стохастической эволюционной процедурой, затраты машинного времени на такое зондирование могут оказываться весьма существенными. На четвертом, заключительном этапе выбирается одно из решений, принадлежащее построенной Парето-границе.

Однако оперирование на последних двух этапах сценариев одним векторным критерием высокой размерности вызывает очевидные трудности, поэтому рекомендуется использовать *принцип двух векторных критериев* меньшей размерности, предполагающий введение в рассмотрение:

основного критерия $F_{\text{осн}}(\theta)$, формируемого из противоречивых частных критериев, желательно квадратичного вида, вычисляемых на третьем этапе при генерировании множества вариантов решений с последующей локализацией Парето-границы, соответствующей этому критерию;

дополнительного критерия $F_{\text{доп}}(\theta)$, составляемого из других частных критериев (включая непротиворечивые и неквадратичные), также оцениваемых на третьем этапе, но используемых проектировщиком на четвертом этапе при сравнении альтернативных Парето-решений, определяемых по основному критерию, в качестве дополнительной информации для задания обоснованных предпочтений при принятии окончательного варианта.

Примеры векторной идентификации

Рассмотрим нелинейный электромеханический ОУ, включающий в себя силовой преобразователь, двигатель постоянного тока, а также датчики скорости двигателя и тока якоря. Входные/выходные данные для идентификации получим путем компьютерной имитации, подавая на вход Simulink-модели ОУ требуемого типа воздействие с добавлением интенсивного шума, а также небольших измерительных шумов на выходах датчиков. Поставим целью провести Парето-оценивание параметров линейной дискретной и нелинейной непрерывной моделей ОУ по разным векторным критериям.

Пример 1. Выберем линейную модель пятого порядка с временным запаздыванием на два такта, учитывающим влияние нелинейностей,

$$y(z) = z^{-2}\frac{b_3 z^2 + b_2 z + b_1}{z^3 + a_3 z^2 + a_2 z + a_1}u(z),$$

вектор параметров которой размерности $m = 6$ представим в виде

$$\theta = (a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3)^{\mathrm{T}}.$$

Числовые данные для линейной идентификации получим при ступенчатом входном воздействии, а начальные значения параметров определим функцией arx пакета MATLAB, реализующей регрессионный метод. Сформируем векторный критерий для выходной координаты (выхода датчика скорости):

$$F(\theta) = [J_{e1}(\theta), J_{m1}(\theta)]^{\mathrm{T}}. \qquad (6)$$

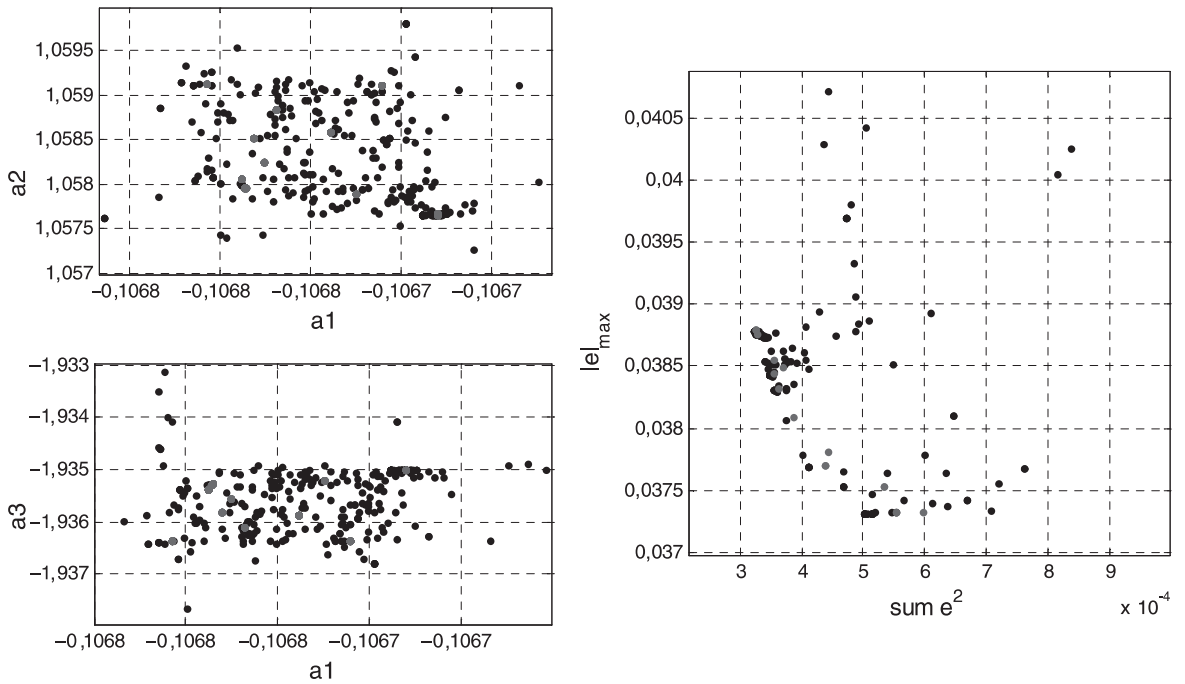


Рис. 4. Зондирование в пространстве параметров линейной модели

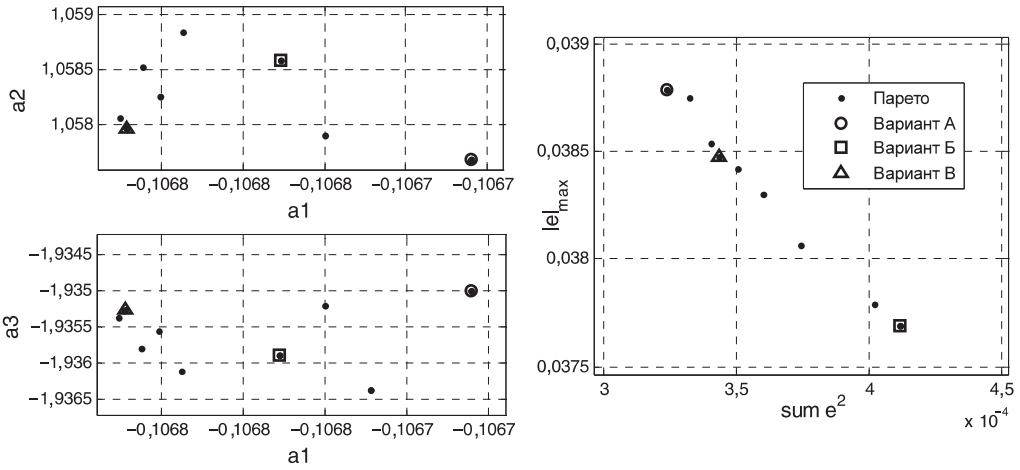


Рис. 5. Парето-оценки для линейной модели

Результаты линейной идентификации представлены на рис. 4–6, где круглыми, квадратными и треугольными символами отмечены три варианта Парето-оценок А, Б и В.

Пример 2. Включим в непрерывную Simulink-модель ОУ два нелинейных элемента – зону нечувствительности (падение напряжения на щетках двигателя) и релейную характеристику (момент сухого трения). Вектор уточняемых параметров размерности $m = 3$ представим в виде

$$\theta = (J, dU, M_{\text{ст}})^{\text{т}},$$

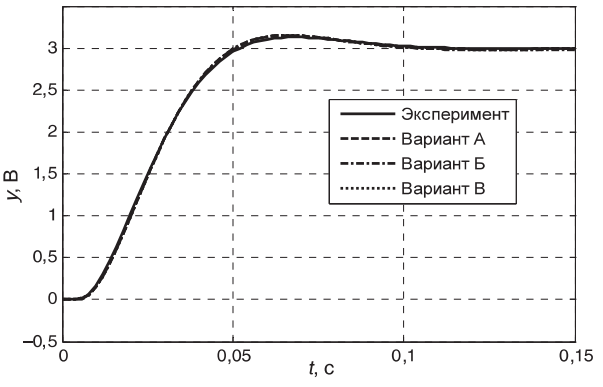


Рис. 6. Результаты линейной идентификации

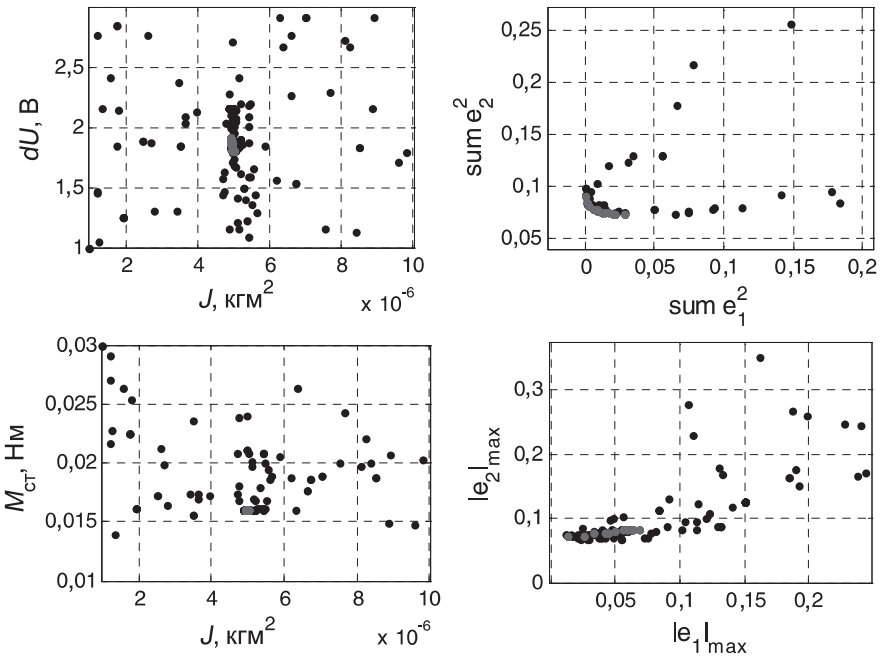


Рис. 7. Зондирование в подпространстве параметров нелинейной модели

где J – момент инерции на валу двигателя; dU – падение напряжения на щетках; $M_{ст}$ – момент сухого трения.

Числовые данные для нелинейной идентификации получим при синусоидальном входном воздействии, а начальные значения уточняемых параметров зададим на 100 % отличающимися от истинных.

Сформируем векторные критерия для координат ОУ (выходов датчиков скорости и тока):

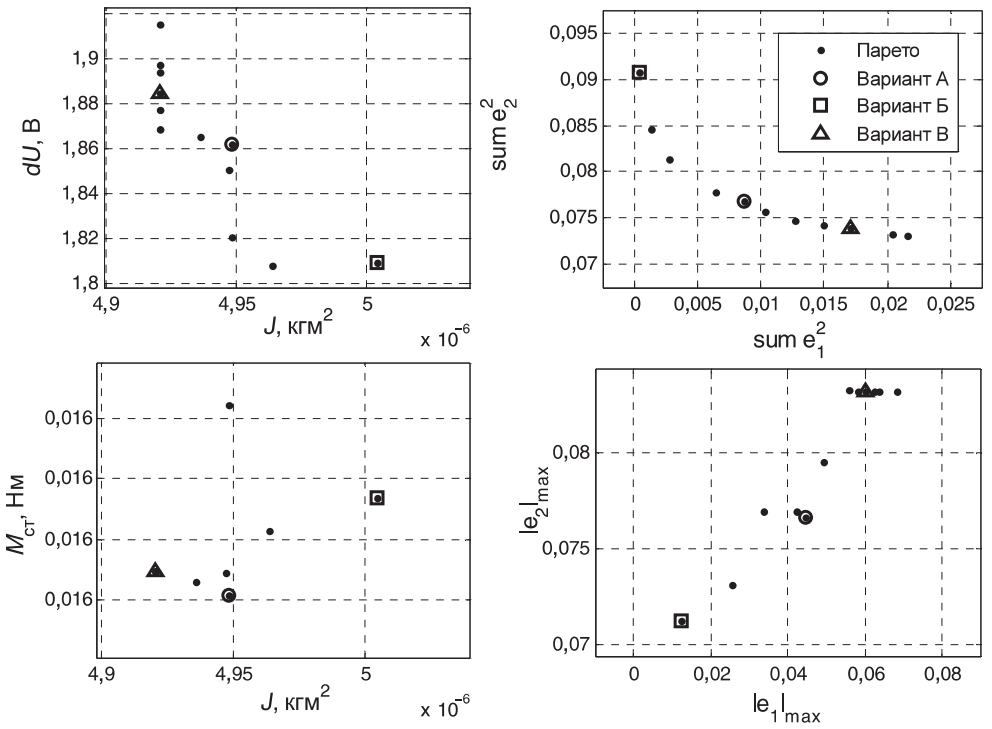


Рис. 8. Парето-оценки для нелинейной модели

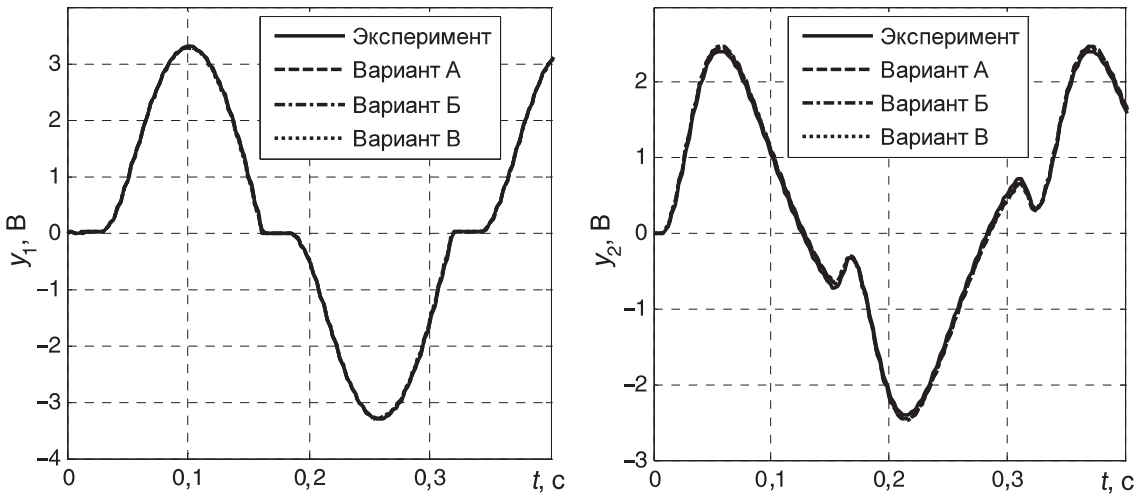


Рис. 9. Результаты нелинейной идентификации

$$F_{\text{осн}}(\theta) = [J_{e1}(\theta), J_{e2}(\theta)]^{\text{T}}; \qquad (7.1)$$

$$F_{\text{доп}}(\theta) = [J_{m1}(\theta), J_{m2}(\theta)]^{\text{T}}. \qquad (7.2)$$

Результаты нелинейной идентификации представлены на рис. 7–9, где круглыми, квадратными и треугольными символами отмечены три варианта Парето-оценок А, Б и В.

Приведенные примеры показывают, что предложенные методики-сценарии поэтапной МК-идентификации позволяют находить Парето-оптимальные оценки параметров линейных и нелинейных моделей ОУ с различными структурами при относительно невысоких затратах машинного времени. Методики носят достаточно общий характер и, в частности, могут эффективно использоваться для уточнения параметров нелинейных электромеханических ОУ исполнительных систем роботов с упругими связями [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурдаков, С.Ф.** Идентификация механических систем [Текст] / С.Ф. Бурдаков / –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. –139 с.

2. **Козлов, В.Н.** Теория автоматического управления. Компьютерные технологии: Учеб. пособие [Текст] / В.Н. Козлов, Н.В. Ростов. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. –332 с.

3. **Льюнг, Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя [Текст] / Л. Льюнг; Пер. с англ.; Под ред. Я.З. Цыпкина. –М.: Наука, 1991. –432 с.

4. **Ростов, Н.В.** Компьютерные технологии в науке. Моделирование и идентификация: Учеб. пособие [Текст] / Н.В. Ростов. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.–146 с.

5. **Ростов, Н.В.** Компьютерная технология многокритериальной идентификации динамических объектов во временной области [Текст] / Н.В. Ростов // Матер. науч.-техн. конф. Фундаментальные исследования в технических университетах. –СПб.: СПбГТУ, 1997. –137 с.

6. **Ростов, Н.В.** Компьютерная технология идентификации упругих электромеханических систем роботов [Текст] / Н.В. Ростов, А.М. Щепановский // Матер. VIII науч.-техн. конф. Экстремальная робототехника. –СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997, –С. 78–87.

7. **Черноруцкий, И.Г.** Методы оптимизации в теории управления: Учеб. пособие [Текст] / И.Г. Черноруцкий. –СПб.: Питер, 2004. –256 с.

8. **Эйкхофф, П.** Основы идентификация систем управления [Текст]/П. Эйкхофф. –М.: Мир, 1975. –685 с.

9. **Deb, Kalyanmoy.** Multiobjective Optimization using Evolutionary Algorithms [Text] /Kalyanmoy Deb. –John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, 2001.

УДК 621.3.019.3

Г.Н. Черкесов

ПРОБЛЕМА ЗИП И ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ НОВОГО РАЗДЕЛА ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ

1. Состояние проблемы

В современной теории надежности исследовано значительное количество моделей, в которых рассмотрено восстановление работоспособности путем ремонта. Особенность такого восстановления состоит в том, что за время эксплуатации теоретически можно обслужить неограниченное количество заявок на ремонт. Иначе говоря, предполагается, что ресурсы восстанавливающего органа (ВО) не ограничены и есть лишь ограничение на число ремонтных бригад, т. е. на производительность ВО.

Ремонт как способ восстановления работоспособности на самом деле не является универсальным способом по ряду причин. Известно достаточно большое количество различных по масштабам и назначению систем, в т. ч. систем управления, для которых не удается организовать восстановление работоспособности путем ремонта. Во-первых, далеко не всегда на месте эксплуатации может быть развернута ремонтная база. Это относится не только к системам, имеющим серьезные ограничения по весу и габаритам, например, к бортовым системам, но и ко многим системам военного назначения, системам управления на транспорте, системам, эксплуатируемым в малонаселенных труднодоступных регионах страны. Во-вторых, при современном высокотехнологичном производстве ремонт часто невозможен или экономически нецелесообразен вне крупных хорошо оснащенных специализированных предприятий.

Альтернатива ремонту – использование комплектов запасного имущества и принадлежностей (ЗИП), когда восстановление работоспособности сводится к замене отказавшего модуля (сменной части) на работоспособную запасную часть (ЗЧ), что вполне может быть выполнено эксплуатационным персоналом. В этом случае возникает другая проблема. По соображениям ограничений на суммарную стоимость запасных частей не удается создать такие большие начальные запасы сменных модулей, которые позволяли бы гарантированно иметь ЗЧ при любом отказе в системе. Это значит, что кроме ранее указанной причины отказа резервированной системы (новый отказ до завершения восстановления) появляется и другая причина: отсутствие в комплекте ЗИП необходимой ЗЧ. Поскольку время пополнения запасов в комплекте столь существенно превышает допустимое время восстановления работоспособности, изделие после исчерпания запасов становится фактически невосстанавливаемым по отказам данного типа до ближайшего регламентного или случайного момента пополнения комплекта ЗИП.

Впервые понятие запасного элемента введено еще в 1964 г. в [1], где рассмотрена экспоненциальная модель надежности с непополняемым ЗИП. Способы пополнения запасов и показатели достаточности комплектов ЗИП достаточно широко обсуждались в конце 60-х гг. [2–11]. Методика [11] является, по-видимому, первым в нашей стране нормативным документом по расчету потребности в ЗЧ. Стратегия пополнения запасов обсуждается в работах О.Ф. Пославского [22, 24], Б.Г. Сафарова [16–21], А.Э. Шура-Бура [14, 15, 27, 39, 52]. Значительное количество работ появилось в конце 70-х и начале 80-х гг. [12, 13, 40–51]. В 1985 г. Госстандарт СССР опубликовал для использования при разработке и эксплуатации техники Руководящий документ [23], содержащий методики оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП. Проблема ЗИП нашла отражение и в десятитомном справочнике по надежности [28]. В ряде работ решается задача оптимизации запасов по критерию суммарных затрат на создание комплекта ЗИП [25, 26].

При всем разнообразии и многообразии вариантов структуры запасов, стратегий пополнения и моделей функционирования ЗИП, рассмотренных в опубликованных работах, постановки задач и способы их решения имеют много общего. Для наиболее известных и широко используемых в промышленности методик, нашедших отражение в работах [23, 27], идея учета ЗИП при оценке надежности сводится к следующему.

На основе данных о структуре системы, режимах ее функционирования, перечнях элементов, значениях показателей надежности элементов определяются параметры потоков (интенсивности) заявок в комплекты ЗИП на поставку ЗЧ каждого типа. Если для каждого типа запасов известны стратегия пополнения и параметры стратегии, то находят значения установленного показателя достаточности (ПД) для каждого типа запасов и для всего комплекта ЗИП в целом.

Расчетом ПД не заканчивается решение задачи. В государственном стандарте есть норма, согласно которой номенклатура и количество ЗЧ при заданной стратегии пополнения должны рассчитываться с учетом требований к надежности изделия. Поэтому полученные значения ПД используются далее для коррекции параметров модели надежности восстанавливаемой системы. В качестве последней выбирают подходящую модель надежности системы, восстанавливаемой путем ремонта с неограниченным ресурсом, и проводят расчет показателей надежности (ПН) при скорректированных параметрах модели. Полученные значения должны удовлетворять требованиям к надежности изделия.

Способ учета ПД при расчете ПН зависит от наличия или отсутствия структурного резервирования. Для нерезервированных систем ПН системы с учетом ЗИП находят как произведение ПН при неограниченном ЗИП и ПД используемого фактически комплекта ЗИП. Для структурно резервированных систем учет ЗИП проводят путем коррекции среднего времени восстановления по известному значению ПД комплекта ЗИП.

Методики расчета, основанные на коррекции модели надежности с неограниченным ЗИП, имеют свои достоинства и недостатки. Несомненное достоинство – их значительная универсальность, т. к. они позволяют использовать весь накопленный арсенал моделей надежности восстанавливаемых систем с восстановлением путем ремонта. Вместе с тем, они являются приближенными и содержат методическую погрешность. Поэтому вполне естественно поинтересоваться величиной и знаком погрешности, т. к. возможны ошибки первого и второго рода. Если расчеты дают нижнюю оценку точного значения ПН типа вероятности безотказной работы или средней наработки до отказа, то может получиться избыточный запас элементов и некоторые экономические потери на создание дополнительного запаса элементов. Если же оценка, напротив, верхняя, то созданный комплект ЗИП фактически не обеспечивает необходимую надежность и изделие не удовлетворяет требованиям к надежности.

Чтобы оценить возможности и качество приближенных и точных методик, рассмотрим более подробно систему классификации моделей надежности систем при наличии ЗИП, систему классификации моделей надежности, порядок расчета надежности и источники погрешности, примеры расчета и сравнительный анализ результатов их решения с помощью точной и приближенной методик.

2. Классификация моделей надежности восстанавливаемых систем при наличии ЗИП

Чтобы оценить все разнообразие восстанавливаемых систем, практически существующих или разрабатываемых в промышленности, необходимо предложить признаки классификации и установить классы по каждому признаку. Здесь будут использованы семь признаков: структура обслуживаемой системы, структура запасов в системе ЗИП, стратегии пополнения запасов, количество выполняемых функций, степень инерционности процессов функционирования, структура потока замен, тип модели надежности, используемой при расчете надежности. Рассмотрим подробнее классы моделей по этим признакам.

2.1. Классификация по типу структуры системы. По этому признаку можно выделить восемь классов и в некоторых из них несколько подклассов.

Класс 1.1. Последовательные системы (модель М1). Система состоит из нескольких последовательно соединенных однородных подсистем. Каждая из подсистем содержит элементы только одного типа и не имеет структурного резервирования.

Класс 1.2. Последовательное соединение однородных резервированных подсистем. Здесь, в отличие от класса 1, каждая из подсистем использует определенную схему резервирования. В зависимости от типа схемы можно выделить подклассы.

Подкласс 1.2.1. Общее резервирование второго, третьего или четвертого рангов. В соответствии с [32, 34] схемы второго ранга используют модели М2, М3, М9, схемы третьего ранга – модели М11, М12, М13, схемы четвертого ранга – модели М12, М13.

Подкласс 1.2.2. Поэлементное резервирование. В [32, 34] такой вид резервирования используется в моделях М6–М8, М10 (при $r = 1$).

Подкласс 1.2.3. Групповое резервирование. В [32, 34] такой вид резервирования используется в моделях М6–М8, М10 (при $r > 1$).

Подкласс 1.2.4. Смешанные структуры. В подсистеме часть элементов не резервирована, а другая часть использует общее (1.2.4.1), поэлементное (1.2.4.2) или групповое (1.2.4.3) резервирование. Примерами моделей этого подкласса являются модели М4–М8 в [32, 34].

Класс 1.3. Параллельное соединение однородных подсистем. Параллельные ветви отличаются типом элементов. По виду структуры параллельных ветвей можно выделить подклассы.

Подкласс 1.3.1. Последовательное соединение одинаковых элементов в каждой ветви. Структура ветви имеет первый ранг.

Подкласс 1.3.2. Однородная резервированная подсистема в каждой ветви. Структура ветви имеет второй ранг или более. В каждой ветви могут использоваться схемы резервирования моделей М2–М13: в М2, М3, М9 структура имеет второй ранг (подкласс 1.3.2.1), в М4–М8, М10 – третий ранг (подкласс 1.3.2.2), в М11–М13 – четвертый ранг (подкласс 1.3.2.3).

Подкласс 1.3.3. Смешанные однородные структуры в каждой ветви. Структура ветви имеет второй ранг или более.

Класс 1.4. Общее однородное резервирование неоднородных ветвей. Все параллельные ветви одинаковы. Но каждая ветвь является последовательным соединением однородных подсистем. По типу структуры ветви можно выделить подклассы.

Подкласс 1.4.1. Последовательное соединение однородных нерезервированных подсистем в каждой ветви. Структура ветви имеет первый ранг.

Подкласс 1.4.2. Последовательное соединение однородных резервированных подсистем в каждой ветви. Структура ветви имеет второй ранг или более.

Подкласс 1.4.3. Последовательное соединение однородных резервированных подсистем со смешанной структурой в каждой ветви. Структура ветви имеет второй ранг или более.

Класс 1.5. Общее неоднородное резервирование неоднородных ветвей. Параллельные ветви могут быть неодинаковы. Каждая ветвь является последовательным соединением однородных подсистем. По типу структуры ветвей можно выделить подклассы.

Подкласс 1.5.1. Последовательное соединение однородных нерезервированных подсистем в каждой ветви. Структура ветви имеет первый ранг.

Подкласс 1.5.2. Последовательное соединение однородных резервированных подсистем в каждой ветви. Структура ветви имеет второй ранг или более.

Подкласс 1.5.3. Последовательное соединение однородных резервированных подсистем со смешанной структурой в каждой ветви. Структура ветви имеет ранг второй или более.

Класс 1.6. Неоднородное групповое резервирование с зависимыми резервированными группами. При групповом резервировании параллельные ветви в резервированных группах, вообще говоря, различные. Причем одни и те же элементы могут входить в две или более различных групп, создавая зависимость между ними через общий запас элементов данного типа. По типу структуры ветвей можно выделить подклассы.

Подкласс 1.6.1. В каждой группе ветви однородны и представляют собой последовательное соединение одинаковых элементов. Структура ветви имеет первый ранг, группа имеет второй ранг, а вся система – третий ранг.

Подкласс 1.6.2. В каждой группе ветви однородны и имеют внутренне структурное резервирование типа 1.2.1. Структура ветви имеет ранг второй или более, группа имеет третий ранг или более, а вся система – четвертый ранг или более.

Подкласс 1.6.3. Ветви одной группы могут быть неодинаковы и неоднородны. Структура ветви имеет второй ранг или более, группа имеет третий ранг или более, а вся система – четвертый ранг или более.

Класс 1.7. Последовательно-параллельное соединение структур классов 1.4–1.6. По способу соединения подсистем и наличию зависимости между подсистемами можно выделить четыре подкласса.

Подкласс 1.7.1. Система состоит из нескольких последовательно соединенных независимых подсистем классов 1.4–1.6.

Подкласс 1.7.2. Система состоит из нескольких параллельно соединенных независимых подсистем классов 1.4–1.6.

Подкласс 1.7.3. Система состоит из нескольких последовательно соединенных зависимых подсистем классов 1.4–1.6.

Подкласс 1.7.2. Система состоит из нескольких параллельно соединенных зависимых подсистем классов 1.4-1.6.

Класс 1.8. Системы со сложной структурой. Здесь используется понятие сложной структуры в соответствии с определением, данным в работе [54]. По степени зависимости структурных элементов через общий запас элементов можно выделить три подкласса.

Подкласс 1.8.1. Система с независимыми структурными элементами.

Подкласс 1.8.2. Система с зависимыми структурными элементами.

Подкласс 1.8.3. Система, содержащая независимые и зависимые структурные элементы.

2.2. Классификация по типу структуры системы ЗИП. По структуре связей между комплектами ЗИП и числу уровней запасов можно выделить четыре класса систем ЗИП.

Класс 2.1. Одноуровневые системы. К ним относятся системы комплектов одиночного ЗИП (ЗИП-О) и группового ЗИП (ЗИП-Г).

Класс 2.2. Двухуровневые системы (ЗИП-2У).

По способам связи комплектов первого и второго уровней с изделием и источниками пополнения можно выделить четыре подкласса.

Подкласс 2.2.1. Изделие получает запасные части только из комплекта ЗИП-О. Комплекты ЗИП-О пополняются из комплекта ЗИП-Г, а комплекты ЗИП-Г – из неиссякаемого источника пополнения (НИП)

Подкласс 2.2.2. Изделие получает запасные части только из комплекта ЗИП-О. Комплекты ЗИП-О пополняются из комплекта ЗИП-Г и из НИП, а комплекты ЗИП-Г – из НИП.

Подкласс 2.2.3. Изделие получает запасные части из комплекта ЗИП-О и комплекта ЗИП-Г. Комплекты ЗИП-О пополняются из комплекта ЗИП-Г, а комплекты ЗИП-Г – из НИП.

Подкласс 2.2.4. Изделие получает запасные части только из комплекта ЗИП-О и комплекта ЗИП-Г. Комплекты ЗИП-О пополняются из комплекта ЗИП-Г и из НИП, а комплекты ЗИП-Г – из НИП.

Класс 2.3. Многоуровневые системы (ЗИП-N). Связи между уровнями в системе ЗИП-N только вертикальные.

Класс 2.4. Системы с сетевой структурой.

2.3. Классификация ЗИП по типу стратегии пополнения запасов. Согласно [23, 37, 38] можно выделить четыре класса стратегий пополнения: периодическое пополнение ПП (класс 3.1), периодическое пополнение с экстренными доставками ПЭД (класс 3.2), непрерывное пополнение НП (класс 3.3), пополнение по уровню ПУ (класс 3.4). Соответственно номеру класса индикатор стратегии α принимает значения 1, 2, 3 и 4.

В классе ПЭД по трем дополнительным признакам можно выделить всего 8 подклассов. По признаку формирования заявки на экстренную доставку (ЭД) в комплект ЗИП запасных частей (ЗЧ) различают формирование заявки по отказу комплекта ЗИП или по отказу изделия. По признаку числа ЗЧ в одной заявке различают полную ЭД (заявка на пополнение запасов до начального уровня) и неполную доставку (в частности, ЭД может содержать только одну ЗЧ). По признаку структуры запасов в заявке можно различать однономенклатурную и многономенклатурную заявки. Для обозначения подклассов используют три дополнительных разряда: ПЭД.XXX или 3.2.XXX, В каждом разряде X может принимать значения 1 или 2.

В классе НП используется классификация Кендалла, принятая для систем массового обслуживания [53]. В классе ПУ можно выделить два подкласса.

Подкласс 3.4.1 (ПУ1). Без коррекции заявки в интервале доставки.

Подкласс 3.4.2 (ПУ2). С коррекцией заявки в интервале доставки. Если до момента пополнения запасов приходит еще одна заявка на ЗЧ от изделия, то заявка увеличивается на одну запасную часть.

2.4. Классификация систем по количеству выполняемых функций. По этому признаку различают однофункциональные (ОФС) и многофункциональные (МФС) системы. В ОФС (класс 4.1) интенсивность потребления запасов совпадает с суммарной интенсивностью отказов элементов данного типа.

Оценка надежности МФС (класс 4.2) проводится отдельно по каждой функционально самостоятельной операции (ФСО), предназначенной для выполнения одной или группы функций. В выполнении ФСО занята только часть аппаратно-программного комплекса системы, тогда как комплект одиночного ЗИП создается для устранения отказов любых модулей данного типа, а не толь-

ко тех, которые заняты в выполнении конкретной ФСО. В результате возникает ситуация, когда интенсивность потребления запасных частей не совпадает с суммарной интенсивностью отказов модулей, занятых в выполнении ФСО. Поэтому для оценки надежности МФС не могут использоваться формулы, разработанные для ОФС.

2.5. Классификация систем по степени инерционности процессов функционирования. Классы формируются путем сравнения времени собственно замены отказавшего элемента на запасную часть $t_з$ и допустимого времени перерыва в работе системы $t_д$ на проведение восстановления работоспособности путем замены отказавшего элемента на запасную часть. Время $t_з$ включает в себя время доставки ЗЧ из комплекта ЗИП к месту эксплуатации системы и время установки ЗЧ на место эксплуатации. Время $t_д$ определяется тем интервалом времени, в течение которого качество выполнения функции не снижается существенно при отказе элемента. В системах управления время $t_з$ (вообще говоря, случайное) есть время до ближайшего момента формирования управляющего воздействия. В системах теплоснабжения оно равно времени до снижения температуры помещения до установленного минимального значения.

К классу 5.1 относятся системы, для которых вероятность замены до момента $t_д$ велика (близка к единице). К классу 5.2 относятся системы, для которых вероятность замены до момента $t_д$ мала (близка к нулю). Наконец, для класса 5.3 величины $t_з$ и $t_д$ сравнимы и вероятность далека от 0 и 1. В системах класса 5.1 временем $t_з$ можно пренебречь и считать равным нулю. В системах класса 5.2 при отсутствии резервирования использование ЗИП неэффективно, т. к. с учетом резерва времени отказ системы наступает раньше замены отказавшего элемента. В таких системах требуется применение встроенного структурного резервирования. Тогда $t_д$ будет равно интервалу между отказами двух основных элементов. Эта величина обычно существенно больше (сотни часов) времени $t_з$ (десятки минут). Тогда система переходит в класс 5.1. В системах класса 5.3 необходимо учитывать резерв времени [31, гл. 8].

2.6. Классификация систем по структуре потока замен. В общем случае интенсивность потока замен рассчитывают по формуле $\lambda_з = \lambda_о+\lambda_{хр}+\lambda_{то}+\lambda_{ож}$, где $\lambda_о$ – суммарная интенсивность потока отказов элементов данного типа основной системы; $\lambda_{хр}$ – суммарная интенсивность потока отказов запасных частей данного типа; $\lambda_{то}$ – интенсивность потока замен при техническом обслуживании; $\lambda_{ож}$ – суммарная интенсивность потока отказов элементов данного типа в режиме ожидания применения по назначению.

Учитывая возможность различных комбинаций наличия слагаемых, можно выделить восемь классов 6.1–6.8.

2.7. Классификация систем по типу модели надежности. Здесь будем различать три класса моделей: модели независимых событий Бернулли (класс 6.1), марковские модели (класс 6.2), немарковские модели (класс 6.3). В модели Бернулли требуется независимость элементов и по отказам, и по восстановлению. Для этого все элементы определенного типа должны быть сосредоточены в одной однородной подсистеме. В марковской модели все случайные величины должны иметь экспоненциальное распределение.

3. Анализ методики приближенного расчета надежности систем при наличии ЗИП

Приближенный расчет надежности с учетом комплекта ЗИП и его характеристик предполагает три этапа:

1) расчет показателей достаточности с учетом интенсивности потоков заявок на ЗЧ, состава комплекта ЗИА и стратегии его пополнения;

2) расчет надежности изделия при неограниченном ЗИП (при необходимости с коррекцией показателей восстановления);

3) расчет надежности с учетом результатов первых двух этапов.

Этап 1. Процессы расходования (потребления) запасов являются случайными. Поэтому характеристики комплектов ЗИП являются вероятностными и относятся к определенным случайным событиям или величинам. Ключевое событие в системе понятий и терминов – «отказ комплекта ЗИП». Следуя [15] , отказом комплекта ЗИП является событие в системе «изделие – ЗИП», вызывающее полную или частичную потерю работоспособности изделия, при этом в комплекте ЗИП нет соответствующей ЗЧ. Отсюда следует, что событие «отказ комплекта ЗИП» связано не только с состоянием запасов, но и с состоянием изделия. Если нет заявки от изделия на ЗЧ, то нет и отказа комплекта ЗИП. Понятие «отказа комплекта ЗИП» используется при введении показателей достаточности.

В качестве показателей достаточности используют следующие характеристики:

- вероятность достаточности ЗИП $P_д(T, L)$;
- коэффициент готовности ЗИП $К_{гЗИП}$;
- среднее время $\Delta t_{ЗИП}$ задержки в выполнении заявки на ЗЧ.

Здесь $L = (L_1, L_2, \ldots, L_N)$ – вектор количества ЗЧ по всем типам запасов, представленных в комплекте ЗИП. Вероятность достаточности используется только при периодическом пополнении запасов с периодом T и определяется как вероятность того, что за время T не будет заявок на ЗЧ, либо будут заявки, но не будет отказа комплекта ЗИП. Коэффициент готовности используется при любых стратегиях пополнения и определяется как вероятность того, что в произвольный момент времени изделие будет полностью работоспособным, либо возникнет заявка на ЗЧ и она будет удовлетворена. Здесь возникает первый парадокс. Согласно определению ПД, и вероятность достаточности, и коэффициент готовности ЗИП могут быть и тогда, когда комплект ЗИП просто отсутствует, то есть $L = 0$. Тогда ПД есть вероятность того, что в заданный или произвольный момент времени изделие полностью работоспособно и не нуждается в запасных частях. Эти показатели достаточности рассчитываются не только для тех типов элементов, которые представлены в комплекте ЗИП, но и для тех, которые отсутствуют в комплекте ЗИП. Такое определение ПД не вполне соответствует его названию. В соответствии с определениями, для нерезервированного изделия (при последовательном соединении элементов системы) вероятность достаточности совпадает с вероятностью безотказной работы изделия, а коэффициент готовности комплекта ЗИП совпадает с коэффициентом готовности изделия.

Среднее время задержки в выполнении заявки на ЗЧ $\Delta t_{ЗИП}(L)$ учитывает ситуации, когда требуемая ЗЧ есть в составе комплекта ЗИП, и ситуации, когда эта ЗЧ отсутствует и тогда во время задержки включают время до ближайшего пополнения комплекта ЗИП из внешнего источника.

Особенностью всех ПД является то, что они не учитывают внутреннюю структуру соединения элементов данного типа, только общее количество таких элементов и суммарную интенсивность заявок на ЗЧ в комплект ЗИП. Поэтому при одинаковых указанных характеристиках ПД оказываются одинаковыми и для нерезервированной подсистемы и для структурно резервированной при любой схеме резервирования.

Этап 2. Расчет надежности изделия при неограниченном ЗИП.

Используя модель надежности восстанавливаемой системы с восстановлением путем ремонта (модель с неограниченным ресурсом восстановления), находят показатели безотказности (вероятность безотказной работы $P_\infty(t, S, \lambda, \overline{T}_{в\infty})$ и среднюю наработку до отказа $\overline{T}_{0\infty}(S, \lambda, \overline{T}_{в\infty})$) и показатели готовности (комплексные показатели надежности) (коэффициент готовности $К_{г\infty}(S, \lambda, \overline{T}_{в\infty})$, коэффициент оперативной готовности $К_{г\infty}(\tau, S, \lambda, \overline{T}_{в\infty})$), где S – структура системы, λ – вектор интенсивностей отказов элементов системы, $\overline{T}_{в\infty}$ – вектор средних значений времени восстановления элементов системы.

В частности, если структуру системы удается представить как последовательное соединение однородных подсистем, приведенные показатели надежности можно находить по формулам:

$$
\begin{aligned}
P_\infty(t, S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}) &= \prod_{i=1} P_{\infty i}(t, S_i, \lambda_i, \overline{T}_{в\infty i}),\\
\overline{T}_{0\infty}(S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}) &= \int_0^\infty P_\infty(t, S, \lambda, \overline{T}_{в\infty})dt,\\
К_{г\infty}(S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}) &= \prod_{i=1}^{N} К_{г\infty i}(S_i, \lambda_i, \overline{T}_{в\infty i}),\\
К_{ог\infty}(\tau, S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}) &= \prod_{i=1}^{N} К_{ог\infty i}(\tau, S_i, \lambda_i, \overline{T}_{в\infty i}).
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Этап 3. Расчет надежности изделия при ограниченном ЗИП.

Для нерезервированных систем расчет показателей надежности проводят путем перемножения ПД и ПН при неограниченном ЗИП:

$$
\begin{aligned}
P(t, S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}, \alpha, L) &= P_д(\alpha, L)P_\infty(t, S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}),\\
К_г(S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}, L) &= К_{гЗИП}(L)К_{г\infty}(S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}),\\
К_{ог}(\tau, S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}, L) &= К_{гЗИП}(L)К_{ог\infty}(\tau, S, \lambda, \overline{T}_{в\infty}).
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

Для резервированных систем выполняется коррекция среднего времени восстановления по формуле:

$$\overline{T}_в(L) = \overline{T}_{в\infty} + \Delta t_{ЗИП}(L). \qquad (3)$$

Показатели надежности вычисляются по формулам:

$$
\begin{aligned}
P(t, S, L) &= P_\infty(t, S, \overline{T}_в(L)),\\
К_г(S, L) &= К_{г\infty}(S, \lambda, \overline{T}_в(L)),\\
К_{ог}(\tau, S, L) &= К_{ог\infty}(\tau, S, \overline{T}_в(L)).
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

Из приведенных выше результатов можно

сделать следующие выводы о свойствах приближенной методики:

Методика содержит несколько источников погрешности:

разделение задач расчета ПД и ПН (этапы 1 и 2);

погрешность пересчета ПД по формуле связи $К_{гЗИП}$ и $\Delta t_{ЗИП}$;

различия в способах соединения ПД и ПН для нерезервированных и резервированных систем по формулам (2) и (4). Этот вид погрешности проявляется в том случае, когда в однородной подсистеме только часть элементов резервирована.

2. Знак погрешности неизвестен и поэтому могут быть ошибки первого и второго рода.

3. Методика не предлагает специального метода расчета для многофункциональных систем, когда не вся аппаратура, защищенная от отказов комплектом ЗИП, принимает участие в выполнении конкретной функции.

4. В методике рассмотрен ограниченный круг стратегий пополнения. На практике множество применяемых стратегий существенно больше и для них методика не предлагает вариантов расчета показателей надежности. В частности, возможно большое многообразие вариантов содержания заявки на экстренную доставку или на пополнение по уровню.

5. Для структур подкласса 1.2.4 (смешанные структуры) возникает неопределенность в выборе ПД: для резервированной части надо использовать среднее время задержки, а для нерезервированной – вероятность достаточности.

Освоенной частью общего множества моделей надежности для приближенной методики в соответствии с приведенной классификацией следует считать:

однофункциональные системы классов 1.1, 1.2.1–1.2.3, 1.3.1, 1.3.2;

стратегии ПП и НП в полном объеме для указанных структурных подклассов, ПЭД только для подкласса 211, стратегия ПУ без коррекции заявки.

Попытки построения других приближенных моделей иногда оказываются неудачными [30].

Для оценки погрешности методики приближенного расчета надежности при наличии ЗИП необходимы точные формулы и сравнение результатов расчета с целью оценки погрешности.

4. Принципы и результаты точного расчета надежности систем при наличии ЗИП

Основной принцип расчета надежности систем при восстановлении работоспособности с помощью ЗИП – прямое включение запасных частей комплекта ЗИП в модель надежности как одного из ресурсов, предназначенных для повышения надежности. Наряду с ЗИП в системе могут использоваться и другие средства (ресурсы) для обеспечения надежности, такие, как широко известные виды резервирования: структурное, функциональное, временное и пр.

В модели надежности могут быть учтены все особенности стратегии пополнения запасов, ее параметры, структура обслуживаемой системы и структура системы ЗИП, условия хранения запасов, многофункциональность изделия, возможности реконфигурации структуры, неодинаковые условия доступности запасов для различных подсистем, приоритетность доступа к запасам со стороны подсистем и функционально самостоятельных операций; возможности маневрирования ресурсами, в частности, возможности перевода части работоспособных, но не участвующих в функционировании элементов деградированной структуры в состав комплекта ЗИП и др.

При прямом включении ЗИП в модель надежности отпадает необходимость в вычислении показателей достаточности. Поэтому они могут рассчитываться только для сведения и для планирования работы системы технического обслуживания.

В связи с высокой и возрастающей актуальностью расчетов надежности систем, использующих ЗИП, представляется важным и необходимым разработка нового раздела теории надежности, исключающего ошибки, содержащиеся в приближенной методике, широко применяемой в промышленности. Кроме того, требуется расширение области применения теории надежности при наличии ЗИП за пределы области, освоенной приближенной методики, по всем признакам классификации.

В настоящее время проведен анализ некоторого количества моделей с использованием ЗИП-О [29], [31–36]. Эти модели могут использоваться как ядро нового раздела и как эталон для количественного анализа ошибок приближенного расчета надежности с привлечением показателей достаточности.

5. Оценка точности приближенного расчета надежности систем при наличии ЗИП по типовым схемам резервирования

Инструментом оценки точности является сравнение приближенных расчетов надежности на основе результатов раздела 2 настоящей статьи и точных расчетов по формулам, приведенным в [31–36]. Сравнению подлежат различные модели и различные показатели надежности. Сравнение происходит выборочно и использует идею прецедента: выявляются случаи, где погрешность может быть неприемлемо велика. Если прецедент не найден, условно считаем, что применение методики вполне допустимо, и она может заменять точные расчеты с приемлемой погрешностью. Далее возможно накопление различных случаев с некоторой иерархией обобщения.

5.1. Периодическое пополнение запасов в ЗИП-О. *Дублированная система (Модель П2).* Система содержит k одинаковых элементов с интенсивностью отказов λ, образующих две параллельные ветви по $r = k/2$ элементов. Комплект ЗИП содержит L запасных частей данного типа, причем ЗЧ при хранении не отказывают, а замена гарантированно происходит за допустимое время. Период пополнения запасов равен T.

Приближенный расчет проводят по формулам:

$$P(t,L)=\exp(-\rho k^2\lambda t/(2+3k\rho)),$$
$$\rho=\lambda\overline{T}_{\text{в}}(L)=-\frac{1}{k}\ln(\text{К}_{\text{гЗИП}}(L)),$$
$$k\lambda\overline{T}_{\text{ср}}(L)=3+\frac{2}{k\rho}, \qquad (5)$$
$$\text{К}_{\text{г}}(L)=1-\frac{(k\rho)^2/2}{1+k\rho+(k\rho)^2/2},$$
$$\text{К}_{\text{гЗИП}i}(T_i,L_i)=\frac{1}{T_i}\int_0^{T_i}P_{\text{д}i}(t,L_i)\,dt=$$
$$=\frac{1}{A_i}\sum_{j=0}^{L_i}I(A_i,j+1)=$$
$$=1-I(A_i,L_i)+\frac{L_i+1}{A_i}I(A_i,L_i+1),$$
$$I(A,L)=1-\sum_{j=0}^{L-1}\frac{A^j}{j!}e^{-A}.$$

Точные формулы взяты из работы [32]:

$$P(T,L)=2^{L+1}e^{-A/2}-\sum_{i=0}^{L}(2^{L+1-i}-1)\frac{A^i}{i!}e^{-A},$$
$$\text{К}_{\text{г}}(T,L)=(2^{L+2}(1-e^{-A/2})-$$
$$-\sum_{i=0}^{L}(2^{L+1-i}-1)I(A,i+1))/A,\ A=k\lambda T, \qquad (6)$$
$$k\lambda T_{\text{ср}}(T,L)=A\text{К}_{\text{г}}(T,L)/(1-P(T,L)).$$

Результаты расчетов для дублированной системы при периодическом пополнении запасов приведены в табл.1–3.

Выводы по модели П2.

1. Для ВБР в течение периода пополнения T ошибка по вероятности отказа знакопеременная и небольшая: для значений ВБР не менее 0,8 она остается не более 10 %.

2. С увеличением запасов (от 1 до 2) относительная погрешность изменяется неодинаково в зависимости от знака. Положительная погрешность уменьшается от 13,7 % при $L = 1$ до 3,2 %

Таблица 1

П2, $L = 1$, $A = k\lambda T$. Формулы (5), (6)

	A	L	$P(T,1)$	$\text{К}_{\text{гзип}}(T,1)$	$P_{\text{пр}}(T,1)$	δ_{Q}, %	$T_{\text{ср}}(T,1)$	$T_{\text{ср.пр}}(T,1)$	$\delta_{\text{т}}$, %
1	0,4	1	0,99583	0,97808	0,99572	–2,78	95,9	93,24	–2,81
2	1	1	0,95460	0,89636	0,95409	–1,13	21,7	21,28	–2,14
3	2	1	0,79484	0,72933	0,80718	6,01	9,1	9,34	2,49
4	3	1	0,59380	0,58369	0,63969	11,30	6,3	6,71	6,40
5	4	1	0,41313	0,47253	0,49375	13,74	5,2	5,67	8,57
6	0,4	2	0,99960	0,997896	0,99958	–3,95	990,1	952,4	–3,81
7	1	2	0,98951	0,976663	0,98866	–8,10	95,1	87,7	–7,80
8	2	2	0,91301	0,890991	0,90630	–7,71	22,5	20,3	–9,59
9	3	2	0,76441	0,775958	0,75910	–2,25	11,9	10,9	–8,39
10	4	2	0,58816	0,663001	0,60140	3,22	8,4	7,9	–6,79

Таблица 2

П2, $L = 1$, $A = k\lambda T$. Формулы (5), (6)

	A	L	$К_{гзип}(T,1)$	$k\lambda\Delta t_{ЗИП}$	$К_{г}(T,1)$	$К_{г,пр}(T,1)$	$\delta_К$, %
1	0,4	1	0,97808	0,02216	0,998905	0,999760	78,05
2	1	1	0,89636	0,10941	0,987152	0,994634	58,23
3	2	1	0,72933	0,31563	0,934488	0,963520	44,32
4	3	1	0,58369	0,53839	0,854489	0,913902	40,83
5	4	1	0,47253	0,74966	0,765961	0,861623	40,87
6	0,4	2	0,997896	0,002107	0,999915	0,999998	97,38
7	1	2	0,976663	0,023614	0,997641	0,999728	88,46
8	2	2	0,890991	0,115421	0,977985	0,994064	73,04
9	3	2	0,775958	0,253657	0,933021	0,974980	62,65
10	4	2	0,663001	0,410979	0,868921	0,943527	56,92

Таблица 3

ВБР внутри периода пополнения. Формулы (5), (6).
П2, $A = 1$, $P(T,1) = 0{,}954605$; $A = 2$, $P(T, 2) = 0, 913006$

	A_t	$P(t,1)$	$P_{пр}(t,1)$	$\delta_Q(t,1)$, %	A_t	$P(t,2)$	$P_{пр}(t,2)$	$\delta_Q(t,2)$, %
1	0,2	0,999411	0,990645	–1489	0,4	0,999596	0,980515	–4723
2	0,4	0,995835	0,981378	–347,1	0,8	0,995083	0,961410	–684,8
3	0,6	0,987551	0,972198	–123,3	1,2	0,980975	0,942676	–201,3
4	0,8	0,973830	0,963103	–41,0	1,6	0,953825	0,924308	–63,9
5	1	0,954605	0,954094	–1,13	2	0,913006	0,906298	–7,7
6	1,2	0,95404	0,94517	–19,3	2,4	0,912637	0,888639	–27,5
7	1,4	0,95063	0,93633	–29,0	2,8	0,908517	0,871324	–40,7
8	1,6	0,94272	0,92757	–26,5	3,2	0,895636	0,854346	–39,6
9	1,8	0,92962	0,91889	–15,2	3,6	0,870848	0,837699	–25,7
10	2	0,91127	0,91029	–1,10	4	0,833580	0,821376	–7,3
11	2,2	0,910734	0,90178	–10,03	4,4	0,833244	0,805372	–16,71
12	2,4	0,907475	0,89334	–15,27	4,8	0,829482	0,789679	–23,34
13	2,6	0,899926	0,88499	–14,93	5,2	0,817721	0,774292	–23,83
14	2,8	0,887423	0,87671	–9,517	5,6	0,795090	0,759205	–17,51
15	3	0,869903	0,86851	–1,073	6	0,761064	0,744412	–6,97

при $L = 2$, отрицательная возрастает от 2,8 до 7,7 %. Если взять одинаковый уровень ВБР (например, 0,95), то ошибка возрастает существенно: от 1,1 % при $L = 1$ до 8,8 % при $L = 2$.

3. Ошибка по средней наработке также знакопеременна и имеет примерно тот же порядок, что и ошибка по вероятности отказа.

4. Ошибка по коэффициенту неготовности (простоя) самая большая среди рассмотренных характеристик. При $L = 1$ она достигает 45–85 %, при $L = 2$ еще больше – 55–100 %. Причем всюду оценка является завышенной.

5. Внутри периода пополнения ошибка по вероятности отказа возрастает существенно и достигает сотен и тысяч процентов.

6. В целом погрешность расчетов вероятности отказов и средней наработки для времени функционирования, кратного периоду пополнения, можно считать приемлемой. Погрешность расчета коэффициента готовности и вероятности отказов для значений времени внутри периода пополнения оказывается слишком большой.

Последовательное соединение дублированной и нерезервированной подсистем (Модель П4). Система содержит k одинаковых элементов с интенсивностью отказов λ, образующих две параллельные ветви по r элементов и последовательно с ними соединенных $k - 2r$ элементов.

Здесь ситуация усложняется тем, что система содержит нерезервированную ($k - 2r$ элементов) и резервированную части ($2r$ элементов). Для нерезервированной части при расчете ВБР надо брать в качестве показателя достаточности вероятность достаточности, а для резервированной части – коэффициент готовности ЗИП или среднее время задержки в удовлетворении заявки. Если при расчете обоих показателей брать заданное количество ЗЧ, то происходит искажение реальности, т. к. запасные части – общие для обеих подсистем и потребляются обеими подсистемами. В результате следует ожидать завышение надежности.

Приближенные расчетные формулы имеют вид:

$$P(t,L_1,L_2)=P_1(t,L_1)P_{\text{дЗИП2}}(t,L_2)P_2(t,t_{\text{доп}},\infty),$$

$$P_1(t,L_1)=\exp(-2k\rho r\lambda t/(2+3r\rho)),$$

$$k\rho=-\ln K_{\text{гЗИП1}}(L_1),$$

$$P_{\text{дЗИП2}}(t,L_2)=1-I((k-2r)\lambda t,L_2+1),t\le T,$$

$$P_2(t,t_{\text{доп}},\infty)= \tag{7}$$

$$=\exp(-(k-2r)\lambda\max(0,t-t_{\text{доп}})(1-F_{\text{в}}(t_{\text{доп}}))),$$

$$k\lambda T_{\text{ср,пр1}}(1)=B(1-e^{-A/B})+$$

$$+(1-\frac{2ra}{A})B^2(1-(1+\frac{A}{B})e^{-A/B})/(1-P_{\text{пр}}(T,1)),$$

$$B=A/(A-2ra\frac{2+2k\rho}{2+3k\rho}),$$

$$P_{\text{пр}}(T,1)=(1+A-2ra)e^{-A+2ra}e^{-\frac{k\rho}{2+3k\rho}2ra},$$

$$k\lambda\overline{T}_{\text{ср2}}(L_1,L_2)=A/(\frac{2kr\rho}{2+3k\rho}+$$

$$+A_2(1-P_{\text{дЗИП2}}(T,L_2))/(\sum_{i=0}^{L_2}I(A_2,i+1)),$$

$$K_{\text{г,пр}}(T,L)=\frac{1}{1+k\rho(1-2ra/A)}(1-\frac{2(r\rho)^2}{1+2r\rho+2(r\rho)^2}).$$

При расчете средней наработки используются две различные формулы. При получении первой формулы используется формула (6) для всей структуры, содержащей нерезервированную и дублированную части. При получении второй формулы формула (6) используется только для нерезервированной части, а для дублированной части средняя наработка определяется как интеграл от функции $P_1(t,L_1)$ в (7).

Точные формулы взяты из работы [32]:

$$P(T,L)=1-I(A,L+1)+2\left(\frac{k}{r}\right)^L e^{-(k-r)a}I(ra,L+1),$$

$$k\lambda T_{\text{ср}}(T,L)=k\lambda\tau_1/(1-P(T,L)),$$

$$k\lambda\tau_1=\frac{2k}{k-r}\left(\frac{k}{r}\right)^L(1-e^{-(k-r)a})- \tag{8}$$

$$-\sum_{i=0}^{L}\left(2\left(\frac{k}{r}\right)^{L-i}-1\right)I(A,i+1),$$

$$K_{\text{г}}(T,L)=k\lambda\tau_1/A.$$

Таблица 4

Вероятность безотказной работы. Средняя наработка до отказа
П4, $L = 1$, $A = k\lambda T$. Формулы (7) и (8)

	ra	A	$P(T,1)$	$P_{\text{пр}}(T,1)$	δ_Q, %	$T_{\text{ср}}(T,1)$	$T_{\text{српр1}}(T,1)$	$\delta_{\text{т}}$, %	$T_{\text{српр2}}(T,1)$	$\delta_{\text{т}}$, %
1	0,1	0,2	0,99941	0,99940	–1,9	339,7	333,31	–1,9	333,22	–2
2	0,1	0,3	0,98605	0,99405	57,4	21,40	50,34	135	50,30	135
3	0,1	0,4	0,96618	0,98037	42,0	11,69	20,25	73	20,23	73
4	0,2	0,4	0,99583	0,99572	–2,8	95,93	93,40	–2,6	93,24	–3
5	0,2	0,5	0,97470	0,98905	56,7	19,60	45,54	132	45,41	132
6	0,2	0,6	0,94858	0,97408	49,6	11,46	22,98	101	22,89	100
7	0,4	0,8	0,97383	0,97326	–2,2	30,35	29,75	–2,0	29,52	–3
8	0,4	0,9	0,94048	0,96367	39,0	14,83	24,56	66	24,32	64
9	0,4	1	0,90466	0,94623	43,6	10,14	18,33	81	18,11	78
10	0,6	1,2	0,93023	0,93037	0,2	16,85	16,84	–0,1	16,63	–1
11	0,6	1,3	0,88914	0,91887	26,8	11,30	15,59	38	15,36	36
12	0,6	1,4	0,84744	0,90015	34,6	8,70	13,54	56	13,32	53

Таблица 5

П4, $L = 1$, $A = k\lambda T$

	ra	*A*	$К_{гзип}(T,1)$	$k\lambda\Delta t_{ЗИП}$	$K_г(T,1)$	$K_{г,пр}(T,1)$	$\delta_К$, %
1	0,1	0,2	0,99396	0,00606	0,99985	0,99998	87,9
2	0,1	0,3	0,98706	0,01302	0,99526	0,99564	8,02
3	0,1	0,4	0,97808	0,02216	0,98824	0,98898	6,33
4	0,2	0,4	0,97808	0,02216	0,99891	0,99976	78,1
5	0,2	0,5	0,96735	0,03320	0,99153	0,99306	18,1
6	0,2	0,6	0,95515	0,04589	0,98213	0,98449	13,2
7	0,4	0,8	0,92735	0,07543	0,99277	0,99736	63,5
8	0,4	0,9	0,91216	0,09194	0,98064	0,98684	32,0
9	0,4	1	0,89636	0,10941	0,96718	0,97515	24,3
10	0,6	1,2	0,86348	0,14678	0,97976	0,99069	54,0
11	0,6	1,3	0,84665	0,16647	0,96401	0,97735	37,1
12	0,6	1,4	0,82969	0,18670	0,94750	0,96339	30,3

Результаты расчетов для смешанной системы при периодическом пополнении запасов приведены в табл. 4 и 5.

Выводы по модели П4 (см. табл. 4 и 5)

1. Ошибка в оценке ВБР по-прежнему знакопеременная, но принимает существенные значения (до 57 %), также завышенная по причинам, указанным ранее. Эта ошибка много больше, чем в модели П2.

2. Поскольку методика для расчета средней наработки до отказа не предлагает для данной модели готовых формул, то их приходится достраивать. Для последовательных и смешанных систем главная особенность состоит в том, что период пополнения надо учитывать не только при расчете ПД, но и при расчете средней наработки.

Здесь использованы две идеи. В одной из них рассчитывают ВБР в течение *T* для всей системы, а затем используют формулу (6). Другая идея состоит в том, что (6) применяется только для нерезервированной подсистемы, а для дублированной подсистемы используется формула как в модели П2. Из табл. 4 видно, что погрешность по средней наработке еще больше, чем погрешность по вероятности отказа. Первая идея дает результат лучше второй.

3. Ошибка по коэффициенту готовности (неготовности) максимальная при отсутствии нерезервированной подсистемы. При увеличении доли этой подсистемы ошибка сначала убывает, а затем начинает расти. Но величина ошибки растет с увеличением доли дублированной подсистемы.

5.2. Периодическое пополнение запасов с экстренными доставками в ЗИП-О. *Дублированная система (Модель ПЭД2).* Система содержит *k* одинаковых элементов с интенсивностью отказов λ, образующих две параллельные ветви по $r = k/2$ элементов. Комплект ЗИП содержит *L* запасных частей данного типа, причем ЗЧ при хранении не отказывают, а замена гарантированно происходит за допустимое время. Период пополнения запасов равен *T*. Стратегия экстренной доставки (211) состоит в том, что заявка на экстренную доставку формируется при отказе комплекта ЗИП, т. е. когда заявка на ЗЧ приходит после исчерпания запасов (стратегия типа 2 – первый разряд обозначения). При этом система сохраняет работоспособность, т. к. элемент входит в дублированную систему. В заявку включена $L + 1$ запасная часть (стратегия типа 1 – второй разряд обозначения). Кроме того, в заявку включаются ЗЧ только того типа, который стал инициатором ЭД (стратегия типа 1 – третий разряд обозначения). При стратегии 111 заявка формируется при полном отказе системы. При стратегиях 121 и 221 в заявку включается только одна ЗЧ.

При стратегии 211 и отсутствии запасных частей ($L = 0$) приближенный расчет проводят по формулам:

$$Q_{пр}(t,L) = 1 - \exp(-k\rho_1 A/(2+3k\rho_1)),$$
$$k\rho_1 = -\ln(К_{гЗИП}(T,L)), A = k\lambda t, \quad (9)$$

$$К_{гЗИП}(T,0)=1-\frac{A}{A+D}(1-\frac{1-e^{-\omega_1 T}}{A+D}),\quad A=k\lambda T, D=T/\overline{T}_{эд}, \tag{10}$$

$$k\lambda T_{ср,пр}(T,L)=\frac{2+3k\rho_1}{k\rho_1}, \tag{11}$$

$$К_{г,пр}(L)=1-\frac{(k\rho_1)^2/2}{1+k\rho_1+(k\rho_1)^2/2}. \tag{12}$$

Точные формулы имеют вид:

$$Q(t,0)=1-\frac{s_2e^{-s_1t}-s_1e^{-s_2t}}{s_2-s_1}, \tag{13}$$

$$s_{1,2}=\frac{\mu+1,5k\lambda}{2}\mp\frac{1}{2}\sqrt{\mu^2+3k\lambda\mu+(k\lambda)^2/4},$$

$$k\lambda T_{ср}(T,0)= \tag{14}$$

$$=\frac{k\rho}{Q(T,0)}\left(\frac{s_1}{s_0}(1-e^{-s_0D})-\frac{s_0}{s_1}(1-e^{-s_1D})\right),$$

$$К_г(T,0)=К_{г\infty}(0)+$$

$$+\frac{1-К_{г\infty}(0)}{D(s_1-s_0)}\left(\frac{s_1}{s_0}(1-e^{-s_0D})-\frac{s_0}{s_1}(1-e^{-s_1D})\right), \tag{15}$$

$$D=T/\overline{T}_{эд},$$

$$К_{г\infty}(0)=\frac{1+k\rho}{1+k\rho+(k\rho)^2/2}, \tag{16}$$

$$s_{0,1}=1+0,75k\rho\mp\sqrt{r\rho(1+r\rho/4)},$$

При *стратегии 211* и одной запасной части ($L = 1$) приближенный расчет проводят по формулам (9), (11) и (13), где коэффициент готовности ЗИП вычисляют по формуле:

$$К_{гЗИП}(T,1)=1-\frac{k\rho}{2+k\rho}(1-\frac{1}{D(s_1-s_0)}\times$$

$$\times\left(\frac{s_1}{s_0}(1-e^{-s_0D})-\frac{s_0}{s_1}(1-e^{-s_1D})\right), D=T/\overline{T}_{эд}, \tag{17}$$

$$s_{0,1}=\frac{\mu}{2}(1+2k\rho\mp\sqrt{1-4k\rho}), \rho=\lambda\overline{T}_{эд}, k\rho<0,25\ .$$

Точные формулы имеют вид:

$$Q(t,1)=1-\sum_{i=0}^{2}e^{-s_i\mu t}\ /\ \prod_{j=0,\,j\neq i}^{L}(1-\frac{s_i}{s_j}), t\le T\ , \tag{18}$$

$$k\lambda T_{ср}(T,1)=\frac{k\rho}{Q(T,1)}\times \tag{19}$$

$$\times\left(\frac{1-e^{-s_0D}}{s_0(1-\frac{s_0}{s_1})(1-\frac{s_0}{s_2})}+\frac{1-e^{-s_1D}}{s_1(1-\frac{s_1}{s_0})(1-\frac{s_1}{s_2})}+\right.$$

$$\left.+\frac{1-e^{-s_2D}}{s_2(1-\frac{s_2}{s_0})(1-\frac{s_2}{s_1})}\right),$$

где s_i – корни полинома третьей степени

$$s^3+a_2s^2+a_1s+a_0=0 \tag{20}$$

с коэффициентами

$$a_0=0,5(k\rho)^3, a_1=2k\rho(1+k\rho),\quad a_2=1+2,5k\rho, a_3=1 \tag{21}$$

при вычислении вероятности отказа и средней наработки до отказа.

Коэффициент готовности изделия при трех действительных корнях вычисляют по формуле:

$$К_г(T,1)=К_{г\infty}+\frac{1-К_{г\infty}}{D}\times$$

$$\times\left(\frac{1-e^{-s_0D}}{s_0(1-\frac{s_0}{s_1})(1-\frac{s_0}{s_2})}+\frac{1-e^{-s_1D}}{s_1(1-\frac{s_1}{s_0})(1-\frac{s_1}{s_2})}+\right. \tag{22}$$

$$\left.+\frac{1-e^{-s_2D}}{s_2(1-\frac{s_2}{s_0})(1-\frac{s_2}{s_1})}\right),$$

$$К_{г\infty}(1)=\frac{2+1,5k\rho}{2+1,5k\rho+(k\rho)^2/2}, \tag{23}$$

где s_i – корни полинома третьей степени $s^3+a_2s^2+a_1s+a_0=0$ с коэффициентами:

$$a_0=k\rho(2+1,5k\rho+(k\rho)^2/2),\quad a_1=1+4,5k\rho+2(k\rho)^2, a_2=2+2,5k\rho\ . \tag{24}$$

Если два корня полинома – комплексно сопряженные $s_{0,1} = a \pm ib$, а один действительный c, то

$$К_г(T,1)=К_{г\infty}(1)+(1-К_{г\infty}(1))\times$$

$$\times(\frac{1}{(a^2+b^2)D}(C_1b(1-e^{-aD}(\frac{a}{b}\sin(bD)+\cos(bD)))+$$

$$+C_2a(1-e^{-aD}(\cos(bD)-\frac{b}{a}\sin(bD))))+C_3\frac{1-e^{-cD}}{cD}),$$

$$C_1=\frac{c}{b}\frac{a(c-a)+b^2}{(a-c)^2+b^2}, \tag{25}$$

$$C_3=1-C_2=\frac{a^2+b^2}{(a-c)^2+b^2}.$$

Результаты расчетов для дублированной си-

стемы при периодическом пополнении запасов с экстренными доставками (стратегия 211) приведены в табл. 6 и 7.

Выводы по модели ПЭД2 при стратегии 211:

1. Для ВБР в течение периода пополнения T ошибка по вероятности отказа отрицательная (оценка снизу) и небольшая: для значений ВБР не менее 0,8 она остается не более 7 %

2. Задержка в выполнении заявки может достигать существенных значений, многократно превышающих среднее время ремонта: до 10–15 % от средней наработки до отказа.

3. Даже при отсутствии запасных частей использование экстренной доставки позволяет уменьшить вероятность отказа в 100–300 раз. Этот фактор может использоваться в случаях, когда по некоторым причинам не удается или нецелесообразно создавать начальные запасы в ЗИП-О.

4. При наличии запасной части использование экстренной доставки позволяет уменьшить вероятность отказа в 10–20 раз по сравнению со случаем отсутствия ЗЧ.

5. С увеличением запасов (от 0 до 1) относительная погрешность изменяет знак и уменьшается по абсолютной величине: от 7,0 % при $L = 0$ до 1,4 % при $L = 1$.

6. Внутри периода пополнения ошибка по вероятности отказа возрастает существенно и достигает десятков и сотен процентов.

7. В целом погрешность расчетов вероятности отказов и средней наработки для времени функционирования, кратном периоду пополне-

Таблица 6

Вероятность безотказной работы. $L = 0$: Формулы (13), (10), (9)
ПЭД2, стратегия 211. $D = 10$. $L = 1$: Формулы (18), (17), (9)

	A	$k\lambda T_{эд}$	L	$Q(T,0)$	$K_{гзип}$	$k\lambda\Delta t_{ЗИП}$	$Q_{пр}(T,0)$	δ_Q, %
1	0,50	0,05	0	0,010500	0,956916	0,044040	0,010275	–2,15
2	1,00	0,1	0	0,039044	0,917355	0,086260	0,037469	–4,03
3	1,25	0,125	0	0,058744	0,898765	0,106733	0,055880	–4,87
4	1,50	0,15	0	0,081391	0,880907	0,126803	0,076795	–5,64
5	1,75	0,175	0	0,106520	0,863739	0,146484	0,099751	–6,35
6	2,00	0,2	0	0,133691	0,847222	0,165792	0,124336	–6,998
7	0,50	0,05	1	0,0018810	0,992320	0,007710	0,0019037	1,20
8	1,00	0,1	1	0,0114084	0,976191	0,024097	0,0115610	1,33
9	1,25	0,125	1	0,0196111	0,966872	0,033689	0,0198435	1,18
10	1,50	0,15	1	0,0300185	0,957222	0,043720	0,0303034	0,94
11	1,75	0,175	1	0,0424746	0,947449	0,053982	0,0427553	0,66
12	2,00	0,2	1	0,0567986	0,937681	0,064345	0,0569928	0,34

Таблица 7

Вероятность безотказной работы внутри периода пополнения.
ПЭД2, стратегия 211. $L = 0$. $A = 1$. $L = 1$. $A = 1$

	A_t	$Q(t,0)$	$Q_{пр}(t,0)$	$\delta_Q(t,0)$, %	A_t	$Q(t,1)$	$Q_{пр}(t,1)$	$\delta_Q(t,1)$, %
1	0,10	0,000444	0,000485	9,297	0,10	1,922E-05	0,000139	624
2	0,20	0,000936	0,000970	3,634	0,20	7,960E-05	0,000278	249
3	0,30	0,001428	0,001455	1,875	0,30	0,0001741	0,000417	140
4	0,40	0,001920	0,001940	1,017	0,40	0,0002964	0,000556	87,6
5	0,50	0,002412	0,002424	0,510	0,50	0,0004415	0,000695	57,4
6	0,60	0,002903	0,002908	0,175	0,60	0,0006052	0,000834	37,8
7	0,80	0,003885	0,003876	–0,241	0,80	0,0009756	0,001112	14,0
8	1,00	0,004866	0,004842	–0,488	1,00	0,0013871	0,001390	0,18

Таблица 8

Средняя наработка до отказа. Формулы (11), (14), (5), (6). ПЭД2, L = 0. стратегия 211. $T/T_{эд}$ = 5 стратегия 111

	A	$k\lambda T_{эд}$	$k\lambda T_{ср}$	$k\lambda T_{ср.пр}$	$\delta_т$,%, 211	$k\lambda T_{ср}$	$k\lambda T_{ср.пр}$	$\delta_т$,%,111
1	0,50	0,1	27,79	28,85	3,84	10,04	11,35	13,00
2	1,00	0,2	15,29	16,37	7,05	6,08	7,36	21,00
3	2,00	0,4	9,03	10,12	12,10	4,16	5,39	29,33
4	3,00	0,6	6,93	8,03	15,83	3,57	4,74	32,60
5	4,00	0,8	5,88	6,98	18,62	3,31	4,42	33,52

Таблица 9

Средняя наработка до отказа. Формулы (11), (14), (5), (6). ПЭД2, L = 1. стратегия 211. $T/T_{эд}$=10 стратегия 111

	A	$k\lambda T_{эд}$	$k\lambda T_{ср}$	$k\lambda T_{ср.пр}$	$\delta_т$,%, 211	$k\lambda T_{ср}$	$k\lambda T_{ср.пр}$	$\delta_т$,%,111
1	0,50	0,05	265,7	262,4	–1,243	65,19	63,24	–2,99
2	1,00	0,1	87,31	86,00	–1,504	21,75	21,28	–2,14
3	1,25	0,125	63,29	62,37	–1,460	15,95	15,78	–1,12
4	1,50	0,15	49,42	48,75	–1,365	12,64	12,64	0,06
5	2,00	0,2	34,44	34,08	–1,038	9,11	9,34	2,49

ния можно считать приемлемой. Погрешность расчета коэффициента готовности и вероятности отказов для значений времени внутри периода пополнения оказывается слишком большой.

Результаты расчетов для дублированной системы при периодическом пополнении запасов с экстренными доставками (стратегии 111 и 211) приведены в табл. 8–12.

Выводы (см. табл. 8 и 9).

1. При стратегии 111 средняя наработка в модели ПЭД2 такая же, как в П2. Погрешность знакопеременна и достигает десятков процентов. При L = 1 она мала и вполне приемлема.

2. При стратегии 211 экстренная доставка и ее параметры влияют на среднюю наработку системы. Но ошибка мала и приближенные формулы могут использоваться вместо точных формул.

Выводы (см. табл. 10–12).

Таблица 10

Коэффициент готовности системы. Формулы (9)–(16). ПЭД2, L = 0. стратегия 211. $T/T_{эд}$=5

	A	$k\lambda T_{эд}$	$K_{гзип}$	$K_г(T,0)$	$K_{г,пр}(T,0)$	$\delta_К$, %
1	0,50	0,1	0,925552	0,997194	0,997230	1,28
2	1,00	0,2	0,861042	0,989646	0,990359	6,88
3	2,00	0,4	0,755065	0,964572	0,970110	15,63
4	3,00	0,6	0,671859	0,931332	0,946448	22,01
5	4,00	0,8	0,604932	0,894116	0,922452	26,76
6	5,00	1	0,549998	0,855551	0,899408	30,36

Таблица 11

**Коэффициент готовности системы. Формулы (17)–(25).
ПЭД2, L = 1. стратегия 211. $T/T_{эд}$=10**

	A	$k\lambda T_{эд}$	$K_{гзип}(1)$	$K_г(T,1)$	$K_{г,пр}(T,1)$	$\delta_К$, %	$(1-K_г)/(1-K_{г,пр})$
1	0,10	0,01	0,999614	0,9999985	0,99999993	95,21	20,88
2	0,50	0,05	0,992320	0,9998447	0,99997050	81,00	5,26
3	1,00	0,1	0,976191	0,9990356	0,99971657	70,61	3,40
4	1,50	0,15	0,957222	0,9974033	0,99908515	64,77	2,84
5	2,00	0,2	0,937681	0,9949737	0,99805878	61,38	2,59

Таблица 12

**Коэффициент готовности системы.
ПЭД2, L = 0. стратегия 111. $T/T_{эд}$=10**

	A	$k\lambda T_{эд}$	$K_{гзип}(1)$	$K_г(T,0)$	$K_{г,пр}(T,0)$	$\delta_К$, %	$\delta_{К1}$	$\delta_{К2}$
1	0,10	0,01	0,999614	0,999802	0,99999993	94,8	1,95	2660
2	0,50	0,05	0,992320	0,995666	0,99997051	77,2	1,77	147
3	1,00	0,1	0,976191	0,985173	0,99971657	60,6	1,61	52,3
4	1,50	0,15	0,957222	0,971173	0,99908515	48,4	1,48	31,5
5	2,00	0,2	0,937681	0,955291	0,99805878	39,4	1,39	23,0

$\delta_{К1}=(1-К_г)/(1-К_{гзип})$, $\delta_{К2}=(1-К_г)/(1-К_{гпр})$.

1. Ошибка расчета коэффициента неготовности при стратегии 211 столь велика, что приближенные формулы нельзя использовать, т. к. коэффициент неготовности занижается в сотни и тысячи раз.

2. При уменьшении коэффициента готовности ошибка уменьшается, но остается неприемлемой.

3. При стратегии 111 расчет $К_{гзип}$ проводится для значения L на единицу больше, чем на самом деле, т. к. экстренная доставка инициируется после L + 1 отказа элементов.

4. В качестве приближенного значения коэффициента готовности системы при стратегии 111 следует брать $К_{гзип}$. Тогда ошибка по коэффициенту неготовности составляет 40–90 %. При использовании пересчета $К_{гзип}$ в среднюю задержку и последующего расчета коэффициента неготовности дублированной системы при неограниченном ЗИП возникает огромная ошибка. Поэтому приближенные формулы нельзя использовать, т. к. коэффициент неготовности занижается в сотни и тысячи раз.

Используемые в настоящее время в промышленности методики расчета надежности восстанавливаемых систем при наличии ЗИП являются приближенными, имеющими знакопеременную погрешность, значение которой неизвестно как по знаку, так и по абсолютной величине.

Оценить погрешность можно только с помощью точных формул. Выборочная проверка точности показывает, что имеется область применения приближенных методик, в которой ошибка является приемлемой. Например, погрешность приемлема при оценке любых показателей надежности нерезервированных систем, при оценке показателей безотказности однородных дублированных систем при периодическом пополнении запасов и периодическом пополнении с экстренными доставками.

Вместе с тем существуют области применения, где погрешность достигает сотен и тысяч процентов: для систем с групповым дублированием, дублированных систем (при оценке показателей готовности).

Расчет состава комплекта ЗИП по приближенным методикам требует знания нормативных значений показателей достаточности. Поскольку нормативные значения не являются самостоятельными и должны рассчитываться исходя из требований к надежности, возникает непростая задача

вычисления нормативного значения показателей достаточности по заданным нормативным значениям показателей надежности. Эта задача становится особенно сложной для структурно резервированных систем.

Существуют области применения, вообще не охваченные приближенными методиками: неоднородные резервированные структуры, многоуровневые, однородные структуры последовательно-параллельного типа, системы со сложной структурой («мостиковые» структуры), многофункциональные структуры в полном объеме.

Широкое распространение ЗИП как способа восстановления работоспособности, большая практическая значимость оценок надежности систем с ЗИП, тяжелые последствия оценок показателей надежности с погрешностью, исчисляемой десятками, сотнями и даже тысячами процентов, требуют разработки нового раздела в теории надежности: теории надежности систем с восстановлением с помощью ЗИП. Идея построения этого раздела состоит в прямом включении ресурсов ЗИП в модели надежности. Полученные в настоящее время результаты доказывают возможность такой разработки, эффективность и перспективность точной методики. Она не только устраняет методическую погрешность, но и снимает проблему расчета нормативных значений показателей достаточности, поскольку для формирования комплекта ЗИП не требуется этого расчета и он может проводиться разве лишь для сведения.

Учитывая широту и разнообразие областей применения теории надежности восстанавливаемых систем, оценивая уже полученные результаты по созданию точных методов и методик расчета, можно считать, что работа по созданию новой ветви в теории надежности находится в самом начале и требует привлечения значительных научных сил. Автор надеется, что проблема ЗИП привлечет внимание читателей, и это создаст благоприятные условия для ускоренной разработки теории надежности систем при наличии ЗИП.

В настоящее время наиболее актуальными задачами при формировании нового раздела теории надежности являются:

разработка точных расчетных формул для последовательно-параллельных систем с неоднородным резервированием и зависимыми подсистемами при использовании комплекта ЗИП-О;

разработка расчетных формул для систем со сложной структурой и зависимыми элементами при использовании ЗИП;

разработка моделей надежности для стратегий ПЭД (подкласс ХХ2) и ПУ;

разработка в полном объеме точных формул для расчета надежности систем при использовании комплекта ЗИП-Г и системы ЗИП-2У;

учет всех составляющих потока замен, в т. ч. потока отказов запасных частей при хранении, потока замен при техническом обслуживании и потока отказов в режиме ожидания применения по назначению;

разработка полумарковских моделей надежности при наличии ЗИП;

разработка средств программной поддержки расчетов надежности и оптимизации комплектов ЗИП по критерию надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шишонок, Н.А.** Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Н.А. Шишонок, В.Ф. Репкин, Л.Л. Барвинский. –М.: Сов. радио, 1964. –552 с.

2. **Пославский, О.Ф.** Общие положения теории ЗИП [Текст] / О.Ф. Пославский // Методические вопросы разработки и оценки ЗИП. Ч. 1. –М.: Знание, 1968. –96 с.

3. **Пославский, О.Ф.** Составление номенклатуры ЗИП [Текст] / О.Ф. Пославский // Методические вопросы разработки и оценки ЗИП. Ч. 2. Раздел 1. –М.: Знание, 1969. –88 с.

4. **Пославский, О.Ф.** Расчет числа запасных частей [Текст] / О.Ф. Пославский // Методические вопросы разработки и оценки ЗИП. Ч. 2. Раздел 2. – М.: Знание, 1969. –110 с.

5. **Пославский, О.Ф.** Оптимизация, оценка и корректировка ЗИП [Текст] / О.Ф. Пославский // Методические вопросы разработки и оценки ЗИП. Ч. 2. Раздел 3. –М.: Знание, 1969. –70 с.

6. **Хедли, Д.** Анализ систем управления запасами. [Текст] / Д. Хедли, Т.М. Уайтли; Пер. с англ. –М.: Наука, 1969. – 240 с.

7. **Дункан, Дж.** Научное управление запасами [Текст] / Дж. Дункан, Э. Кенигсберг. –М.: Наука, 1967. –366 с.

8. **Рыжиков, Ю.И.** Управление запасами [Текст] / Ю.И. Рыжиков. –М.: Наука, 1968. –210 с.

9. **Кульбак, Л.И.** Основы расчета обеспечения электронной аппаратуры запасными элементами [Текст] / Л.И. Кульбак. –М.: Сов. радио, 1970. –206 с.

10. **Пославский О.Ф.** Методы расчета числа запасных частей [Текст] / О.Ф. Пославский. – М.: Знание, 1977. – 90 с.

11. Методика разработки нормативов потребности

в запасных частях и агрегатах к автомобилям, тракторам и сельскохозяйственным машинам на ремонтно-эксплуатационные нужды. Госплан СССР. Минсельхоз СССР [Текст]. –М.: ГОСНИТИ, 1977. –180 с.

12. **Рубальский, Г.Б.** Управление запасами при случайном спросе [Текст] / Г.Б. Рубальский. –М.: Сов. радио, 1977. –306 с.

13. **Рубальский, Г.Б.** Задачи управления запасом резервных элементов [Текст] / Г.Б. Рубальский // В кн.: Оптимальное резервирование и управление запасами. –М.: Знание, 1979. –С. 70–93.

14. **Шура-Бура, А.Э.** Расчет надежности комплектов ЗИП с непрерывным пополнением [Текст] / А.Э. Шура-Бура // Средства связи. –1979. –№ 5. –С. 24–38.

15. **Шура-Бура, А.Э.** Методы организации, расчета и оптимизации комплектов запасных элементов сложных технических систем [Текст] / А.Э. Шура-Бура, М.В. Топольский. –М.: Знание, 1981. –С. 58–112.

16. **Сафаров, Б.Е.** Основные показатели функционирования системы обеспечения запасными частями в модели периодического пополнения запасов регионального склада [Текст] / Б.Е. Сафаров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. –1982. –Вып.15. –С. 38–46.

17. **Сафаров, Б.Е.** Программный комплекс системы обеспечения запасными частями ЕС ЭВМ в условиях комплексного централизованного обслуживания (КЦО) [Текст] / Б.Е. Сафаров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. –1982. –Вып. 15. –С. 16–23.

18. **Сафаров, Б.Е.** К вопросу разработки автоматизированной системы обеспечения запасными частями средств вычислительной техники в условиях комплексного централизованного обслуживания (КЦО) [Текст] / Б.Е. Сафаров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. –1982. –Вып. 15. –С. 125–131.

19. **Сафаров, Б.Е.** Определение показателя обеспеченности СВТ запасными частями в модели периодического пополнения запасов регионального склада [Текст] / Б.Е. Сафаров //Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. –1982. –Вып. 15. –С.132–139.

20. **Сафаров, Б.Е.** К выводу основных показателей модели периодического пополнения регионального склада запасными частями при наличии экстренных поставок произвольной величины. / Б.Е. Сафаров //Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. –1983. –Вып. 14. –С. 54–61.

21. **Сафаров, Б.Е.** Установление оптимального содержания запасных частей к СВТ по критерию минимума средств, вложенных в периодически пополняемые запасы регионального склада [Текст] / Б.Е. Сафаров // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. –1983. –Вып. 14. –С. 88–96.

22. **Пославский, О.Ф.** Метод приближенного расчета нормативов восстановления и потребности в новых запасных частях [Текст] / О.Ф. Послaвский // Сб. науч. Тр. НИИПиН. –1983. –№ 10. –С. 18–46.

23. Аппаратура радиоэлектронная. Методики оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП: Руководящий документ РД В50–503–84 [Текст]. –М.: Госстандарт СССР, 1985. –144 с.

24. **Сафаров, Б.Е.** Задача управления запасами в централизованной системе технического обслуживания СВТ [Текст] / Б.Е. Сафаров. –М.: Знание, 1986. –126 с.

25. **Никонов, Н.И.** Методы расчетов обеспечения восстанавливаемыми запасными частями [Текст] / Н.И. Никонов, О.Ф. Послaвский. –М.: Знание, 1986. –С.64–100.

26. **Сафаров, Б.Е.** Номограммы оптимальных нормативов на запасные части при периодическом пополнении запасов регионального склада [Текст] / Б.Е. Сафаров // Надежность и контроль качества. –1986, –№ 2. –С. 34–44.

27. **Шура-Бура, А.Э.** Обеспечение технических объектов запасными элементами [Текст] / А.Э. Шура-Бура // Надежность технических систем: Справочник. Гл. 14. –М.: Радио и связь, 1985. –С.205–233.

28. **Барзилович, Е.Ю.** Выбор запасного комплекта элементов [Текст] / Е.Ю. Барзилович, В.Ф. Воскобойников// Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т.; Т. 8. –М.: Машиностроение, 1990. –С. 162–172.

29. **Черкесов, Г.Н.** О расчете надежности обслуживаемых систем при ограниченном ЗИП с периодическим пополнением запасов [Текст] / Г.Н. Черкесов // Надежность. –2003. –№ 2 (5). –С.16–34.

30. **Антонов, А.В.** Определение оптимального количества запасных элементов системы с учетом ограничений на стоимость [Текст] / А.В. Антонов, А.В. Пляскин // Надежность. –2003. –№ 4 (7). –С. 9–16.

31. **Черкесов, Г.Н.** Надежность аппаратно-программных комплексов [Текст] / Г.Н. Черкесов. – СПб: Питер, 2005. –С. 302–358.

32. **Черкесов, Г.Н.** О прямом учете состава комплекта ЗИП при оценке надежности однородных восстанавливаемых систем [Текст] / Г.Н. Черкесов // Надежность. –2007. –№ 3 (22). –С. 32–44.

33. **Черкесов, Г.Н.** О прямом учете состава комплекта ЗИП при оценке надежности неоднородных восстанавливаемых систем [Текст] / Г.Н. Черкесов // Надежность. –2007. –№ 4 (23). –С. 3–18.

34. **Черкесов, Г.Н.** Оценка надежности восстанавливаемых систем с учетом комплекта ЗИП при периодическим пополнением запасов [Текст] / Г.Н. Черкесов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2007. –№ 4-1 (52).–С. 3–12.

35. **Черкесов, Г.Н.** Оценка надежности неоднородных восстанавливаемых систем с учетом комплекта ЗИП при периодическом пополнении запасов [Текст] / Г.Н. Черкесов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2008. –№ 4 (56). –С. 11–22.

36. **Черкесов, Г.Н.** Программа расчета показа-

телей надежности системы с прямым включением комплекта ЗИП в модель надежности [Текст] / Г.Н. Черкесов, В.В. Чуркин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2009. –№ 3 (80). –С. 212–216.

37. ГОСТ В 15705-90 [Текст].

38. РД В 319.01.19-98 [Текст].

39. **Головин, И.Н.** Расчет и оптимизация комплектов запасных элементов радиоэлектронных систем [Текст] / И.Н. Головин, Б.В. Чуварыгин, А.Э. Шура-Бура. –М.: Радио и связь, 1984. –176 с.

40. **Грабовецкий, В.П.** Надежность резервированных групп с учетом запасных блоков [Текст] / В.П. Грабовецкий // В кн.: Кибернетика – на службу коммунизму. –М.: Энергия, 1964. –Т.2. –С. 138–146.

41. **Гоголевский, В.Б.** Определение числа запасных элементов и блоков, обеспечивающих заданную надежность аппаратуры [Текст] / В.Б. Гоголевский, В.П. Грабовецкий // В кн.: Основные вопросы теории и практики надежности. –М.: Сов. радио, 1971. –С. 78–92.

42. **Степанов, Э.Н.** Выбор комплекта ЗИПа при оптимальных заменах [Текст] / Э.Н. Степанов, В.Н. Степанов // В кн.: Основные вопросы теории и практики надежности. –М.: Сов. радио, 1980. –С. 98–108.

43. **Семенов, С.Х**. Об одном способе расчета числа запасных элементов в системах с иерархической последовательностью восстановлений [Текст] / С.Х. Семенов, В.П. Гусев // Надежность и контроль качества. –1977. –№ 6. –С. 18–25.

44. **Алексеев, О.Г**. Оптимизация состава комплекта запасных элементов для технических средств АСУ [Текст] / О.Г. Алексеев, И.Ф. Володось // Надежность и контроль качества. –1978. –№ 12. –С. 32–38.

45. **Вальцев, А.А.** Расчет числа запасных невосстанавливаемых элементов [Текст] / А.А. Вальцев // Надежность и контроль качества. –1978. –№ 10. –С. 39–44.

46. **Конев, В.В.** Об оптимальном обеспечении группы приборов однотипными запасными элементами [Текст] / В.В. Конев // Надежность и контроль качества. –1978. –№ 3. –С. 43–49.

47. **Семенов, С.Х.** О некоторых системах обеспечения изделий запасными элементами [Текст] / С.Х. Семенов, В.П. Гусев // Надежность и контроль качества. –1978. –№ 7. –С. 53–59.

48. **Захарин, А.М.** Оптимальная стратегия пополнения ЗИП в ремонтном контуре системы обслуживания [Текст] / А.М. Захарин, В.Ф. Кандаков // Надежность и контроль качества. –1979. –№ 2. –С. 18–24.

49. **Финкельштейн, М.С.** Вероятность безотказной работы резервированных структур при ограниченном числе запасных элементов [Текст] / М.С. Финкельштейн // Надежность и контроль качества. –1977. –№ 8. –С. 31–37.

50. **Финкельштейн, М.С.** Приближенные оценки вероятности безотказной работы систем с ограниченным числом запасных элементов [Текст] / М.С. Финкельштейн // Надежность и контроль качества. –1979. –№ 10. –С. 16–23.

51 **Хачикян, С.Г.** Получение статистических характеристик однономенклатурного запаса со случайным спросом при фиксированном размере поставок [Текст] / С.Г. Хачикян // Изв. АН СССР. Сер. Техническая кибернетика. –1982. –№ 6. –С. 76–83.

52. **Шура-Бура, А.Э.** Алгоритм совместной оптимизации одиночных и группового комплектов ЗИП [Текст] / А.Э. Шура-Бура // Надежность и контроль качества. –1979. –№ 11. –С. 21–26.

53. **Новиков, О.А.** Прикладные вопросы теории массового обслуживания [Текст] / О.А. Новиков, С.И. Петухов. –М.: Сов. радио, 1969. –400 с.

54. **Рябинин, И.А**. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов. –М.: Радио и связь, 1981. –264 с.

УДК 004.322

Ю.И. Лыпарь, Н.Н. Балтруков, А.Н. Скворцов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТЧИКА ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ СТАНДАРТА LVDS НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ СИСТЕМНО-СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА

Перед преподавателями и студентами система высшего образования ставит в качестве одной из основных задач обучение студентов владению инструментами и технологиями, позволяющими создавать, сохранять и применять в практической работе знания. При этом само понятие знания имеет различные сферы применения. Фундаментально значимым для общества является запас

знания о природе, формах и способах деятельности, образцах поведения, нормах и приемах коммуникации и общения.

Рассматривая только научные знания, отметим, что они должны быть обоснованы на эмпирической и/или теоретической, доказательной базе. Теоретические знания – это мировоззрение, абстракции, идеи, теории, аналогии, схемы, отображающие структуру и природу процессов, протекающих в объектах определенной предметной области (ПрО).

Такие знания в значительной части описываются вербально, объясняют явления и могут использоваться, в отличие от сведений (данных), для прогнозирования поведения объектов.

Традиционный подход к обучению знаниям основан на изучении уже готовых знаний, проверенных на практическую применимость. Например, в схемотехнике электронных систем это приводит к тому, что чаще всего изучаются гербарии схем и методы их анализа. Успешное развитие вычислительной техники объясняется относительно простым математическим языком, позволившим разработать аппарат синтеза схемотехнических решений цифровых логических устройств.

Однако наличие такого математического аппарата является скорее исключением из правила, чем общим местом для ПрО произвольной природы. Создание новой структуры (схемы, конструкции) устройства до сих пор во всем мире относят к изобретательскому уровню и выдают патенты на структуры устройств (appliance) и способы (method) их построения.

Тем самым подтверждается, что неизвестны общие для устройств различного назначения инженерные методы синтеза способов построения S_{met} и структур устройств S_{App}, т. е. неизвестны формальные методы синтеза знаний. Более того, введение связки этапов и их описание S_{met} и S_{App} в общую процедуру синтеза структуры впервые введено, насколько нам известно, в работе [7]. Теория системно-структурного проектирования [1, 2] первоначально разработана для аналоговых электронных устройств, а затем экспериментально обнаружилось, что она применима к ПрО произвольной природы [5].

Ниже рассмотрены математические основы формализации ПрО. Во второй части статьи подробно описана процедура синтеза компонентов промежуточного слоя проектирования: компоненты подсистемы передатчика как части системы приемопередатчика стандарта LVDS (*Low Voltage Differential Signalling*). Приемопередатчики этого стандарта потребляют наименьшую мощность при высоком быстродействии и предназначены для передачи данных между вычислительным комплексом и самыми разнообразными дисплеями, для организации дешевой вычислительной и компьютерной сети [3]. В статье из этого же сборника описано применение этой теории для проектирования системы оптоэлектронных процессоров. В первом разделе кратко изложены математические методы, показывающие возможность применения теории к проектированию систем произвольной природы.

1. Формализация описания синтезируемого объекта произвольной природы в виде модели предметной области[1]

Обычно в системных исследованиях говорят о «сложных объектах и системах». Понятие «сложности» оценивается числом элементов, описанием элементов в разных шкалах, многокритериальностью функционирования и т. д., а также невозможностью в реальном масштабе времени получить решение путем перебора всех возможных вариантов. Все перечисленные оценки одновременно сопутствуют синтезу в ПрО произвольной природы.

Классическое направление отечественной школы изучения сложных систем ориентировано на системный (дедуктивный) подход, т. е. «подход сверху–вниз» и оперирует понятием «анализ». Между тем, отсутствует понимание, как системно синтезировать более или менее сложные объекты различного назначения. Зарубежные школы проектирования сложных объектов чаще придерживаются подхода к проектированию «снизу−вверх» от элементов к компонентам, подсистемам, системам.

Обе школы, тем не менее, на определенных этапах проектирования при отсутствии методов решения задач этапа вынужденно прибегают к различным методикам, направленным на активизацию использования интуиции и опыта специалистов: коллективной генерации идей, методу «Делфи» и т. д. Однако есть области деятельности инженеров, в которых эти подходы малопродуктивны из-за отсутствия наглядности эффекта

[1] Этот раздел выполнен Ю.И. Лыпарем, И.А. Кацко при поддержке гранта РФФИ, проект № 10-01-00070-а.

от предлагаемого решения. Это относится, например, к структурному синтезу аналоговых электронных устройств, к разработке программного обеспечения (ПО), структур интерфейсов сложных вычислительных комплексов и т. п. Именно в этих областях выдается большое число патентов на устройства, что подтверждает слабое развитие теории синтеза структур.

Современные кристаллы, используемые для построения цифровых подсистем и систем на кристалле (SoC), содержат более $4 \cdot 10^9$ транзисторов, а также различные электромеханические преобразователи измеряемых характеристик в электрический ток или напряжение. Непосредственно измерить характеристики и параметры отдельных компонент SoC практически невозможно. Поэтому применяют упрощенные модели элементов и физический эксперимент заменяют моделированием объекта на мощных вычислительных и программных комплексах, типа CADENCE. Проектирование SoC относится к сложным задачам как по числу элементов, так и по числу совершенно разных по функциональности задач, решаемых одновременно.

Ниже описан математический аппарат технологии разбиения проектирования на некоторые этапы, каждый из которых использует обобщенные модели, описываемые на своем языке, но общие для различных приложений. Совокупность слоев, аспектов, этапов и образует процедуры системного проектирования.

Математическая модель предметной области произвольной природы. Появление актуальной в данный момент времени новой потребности в обществе приводит к необходимости создания нового объекта. Он должен создаваться с учетом существования внешней среды, к которой объект должен принадлежать и надежно функционировать в ней. Следовательно, объект укажет на ПрО, являющуюся моделью части реального мира, в рамках заданного контекста (промышленной, сельскохозяйственной, финансовой, электронной, медицинской и т. д.). Каждая ПрО в настоящее время, в отличие от науки древних греков, имеет свой язык. Но все ПрО могут быть описаны формально с помощью бинарных отношений [6].

Моделирование ПрО произвольной природы связано с анализом категорий, описывающих ее. Под категорией понимается конструкт, в который одни объекты входят, а другие – нет. Предполагается, что категории, которыми оперирует человек, можно расположить в следующей иерархии: вышестоящий уровень – базовый уровень – нижестоящий уровень. Базовый уровень – это уровень, на котором структурируется наибольшая часть нашего знания. Он дает возможность воспринимать геометрическую визуализацию концептуальной структуры объекта.

Основой представления конструкта является метанабор [8] $S<X_{as}, X_a, X_{ao}, \bigcup X_{aci}>$, где X_{as} – субъект действия (*aktion subject*), X_a – действие (*action*), X_{ao} –объект действия (*action object*), $\bigcup X_{ac_i}$ – компоненты действия (*action components*).

Все элементы метанабора обладают свойствами (*property*):

$$X_{as} = X_{as}(p_{s1}, ..., p_{sl}),\ X_a = X_a(p_{a1}, ..., p_{aq}),$$
$$X_{ao} = X_{ao}(p_{o1}, ..., p_{ol}),\ X_{ac_i} = X_{ac_i}(p_{ac_{i1}, ..., ac_{ih}}).$$

Результаты их отношений между собой в рамках решаемой задачи реализуют ТЭТ к синтезируемому объекту со стороны внешней среды, описанные потребителями продукта и лицом, принимающем решения (ЛПР), которое выступает от имени проектировщиков.

Логическое представление конструкта предполагает наличие двух составляющих:

1) функциональной – F, связанной с потребностями в создании нового объекта. Потребности описываются путем объединения бинарных отношений (R)

$$F = R_{as}(X_{as}, X_a) \bigcup R_{ao}(X_a, X_{ao});$$

2) обеспечивающей (достижение цели) – Q,

$$Q = R_{as}(X_{as}, X_a) \bigcup R_{ac_i}(X_a, X_{ac_i});\ K = F \bigcup Q.$$

Каждый конструкт K является понятием, открытым для расширения и модификации предметной области и предназначен для многоразового использования при проектировании, получении продукционных правил и т. д.

Объединение всех конструктов $U_n = \bigcup K_j$ образует универсум U_n − структуру, именуемую в топологии *полиэдром*, описывающую ПрО произвольной природы.

Универсум представляет собой обобщенную модель определенной предметной области. Она может быть представлена в виде базовых понятий (*онтологий*), предназначенных для многоразового, многоцелевого использования в различных приложениях. При системном подходе необходимо для реализации продукционных правил указать на связи между понятиями. Рассмотрение онтологий

с функциями выбора и механизмами их реализации позволяет говорить о базе знаний [4].

Итак, в рамках модели предметной области – создание нового объекта (или описание ситуации) сводится к операциям над отношениями между конструктами и их элементами. Для представления понятий наиболее актуальным является категориальный подход [5]. Он позволяет изучать свойства отношений между объектами независимо от их внутренней структуры.

Определение. Математическая структура C называется *категорией*, если

1) задан класс объектов Ob_C;

2) каждой паре объектов A и B из класса объектов Ob_C поставлено в соответствие множество морфизмов (отображений) $Hom_C(A, B)$, например, отображение $f: A \to B$;

3) для пары морфизмов определена операция композиции:
если $f \in Hom_c(A,B)$ и $g \in Hom_c(B,D)$, то $g \circ f \in Hom_c(A,D)$;

4) операция композиции ассоциативна: $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$;

5) для любой области можно ввести тождественное отображение (морфизм) $id_A \in Hom(A,A)$, причем для $f \in Hom(A,B)$: $f \circ id_A = id_A \circ f = f$.

Категория, в которой объекты составляют множество, называется *малой*. В нашем случае введение понятия категории формализует дополнение исходных ТЭТ в процессе проектирования новыми данными, необходимыми для решения задач проектирования очередного этапа. Более того, ошибочное решение на одном из аспектов на последующих этапах может привести к невозможности выполнения синтеза объекта, удовлетворяющего ТЭТ на других аспектах или на этом же аспекте. Ошибка может выявиться на следующем этапе, в результате чего возвращаются на предыдущий этап с изменением ТЭТ таким образом, чтобы исключить синтез структур, не ведущих к нежелательным реализациям.

Следовательно, задача большой размерности решается не перебором всех возможных вариантов, а отсечением вариантов, не выполняющих ТЭТ. Оставшиеся варианты называем *эффективными*, т. к. функция выбора, построенная на ТЭТ, не позволяет на данном этапе выделить из них лучшие в каком-либо смысле. Для формализации процесса расширения ТЭТ удобно применить теоретико-категориальный подход, предложенный для описания динамических продукционных систем [12, 13]. Процесс синтеза нового объекта также является динамическим.

Итак, пусть согласно [15] для каждой предметной области описана категория C, продукции которой представлены морфизмами, база знаний – множеством морфизмов.

Синтезируемый объект может быть реализуемым при статичном состоянии ТЭТ или контекстно реализуемым, если ТЭТ динамически изменяются.

Пусть P – множество всех возможных контекстов ТЭТ. Тогда, если $p \in P, q \in P$ и объект реализуем в контексте p и в контексте q, то это можно записать, например, как $p \le q$. Таким образом, P – частично упорядоченное множество. Если объект реализуем в контексте p и в контексте q ($p \in P, q \in P$) и существует некоторый контекст $r \in P$, такой, что $p \le r$ и $q \le r$, то в контексте r объект реализуем. Задача синтеза объекта заключается в выделении подмножества контекстов, в которых реализуется объект, т. е. получаем множество объектов, из которого в дальнейшем для проектирования ЛПР выбирает один объект из множества эффективного контекста r. Для этого необходимо, чтобы множество всех контекстов P было решеткой, т. е. каждая пара элементов множества P имела точную верхнюю грань.

Определение. Если каждая пара элементов частично упорядоченного множества всех возможных контекстов P имеет точную верхнюю грань, то P – решетка. Верхняя грань элементов $p \in P, q \in P$ обозначается $p \vee q$.

Решетку P, обладающую наименьшим элементом (0), называют *контекстной решеткой*.

Пусть C – категория, описывающая синтезируемый объект, а P – контекстная решетка, сформированная на основе ТЭТ. Для описания взаимодействия синтезируемого объекта и контекстной решетки можно ввести новую категорию C_P, которая строится на основе объектов категории C, расслоенной с помощью решетки P. Каждому контексту P (ТЭТ) соответствует слой категории со своими морфизмами.

Пусть A, B – объекты категории C, $f \in Hom_c(A,B)$. Множество морфизмов из A в B в категории C_P определим как декартово произведение $C_p(A,B)$ $Hom_c(A,B) \times P$; f_p – элемент множества морфизмов в контексте p.

Если $f_p \in Hom_{c_p}(A,B)$ и $g_q \in Hom_{c_p}(B,D)$, то морфизм $f_p \circ g_q \in Hom_{c_p}(A,D)$, определим формулой $f_p \circ g_q = (f \circ g)_{p \vee q}$, т. е. композиция двух

морфизмов определена в том контексте, в котором определен каждый из них.

Итак, в новой расслоенной категории C_P, полученной расслоением категории C помощью контекстной решетки P, каждому контексту $p \in P$ соответствует слой категории со своими морфизмами.

Следует отметить, что в рамках теории категорий можно описать и «растворение проблемы» с помощью укрупнения ТЭТ. Для этого вводится функтор Ф: $C \rightarrow C_p$, где $\Phi(A) = A$ для каждого объекта A и $F(f_p) = f$ для каждого морфизма f_p категории C_p.

Таким образом, в терминах теории категорий задача системно-структурного синтеза нового объекта сводится к получению описания объекта в виде одного из слоев расслоенной категории с эффективным контекстом (не обязательно наименьшим или наибольшим), реализация которого дает устойчивые решения, удовлетворяющие ТЭТ при конечных изменениях параметров. Контекстная решетка P может быть определена различными способами [17].

Контекст, обеспечивающий реализуемость синтезируемого объекта, в нашем случае может состоять в выполнении условий ТЭТ = $\{p_1, p_2, ..., p_k\}$, то есть $P = \{0, 1\}$.

0 – свойство p_j ТЭТ нереализуемо, 1 – свойство p_j ТЭТ реализуемо. В качестве неравенства берется обычное числовое неравенство, если f – морфизм категории C, то морфизм f_0 расслоенной категории C_p может использоваться для описания нереализуемых систем (объектов), морфизм f_1 – для описания реализуемых.

Каждое из значений ТЭТ (вербальных, числовых) может быть реализуемым (тождественно истинным) или реализуемым в рамках, определяемых контекстом.

Оценка сложности синтеза объекта. *Сложность модели* ПрО прежде всего определяется вычислительной сложностью процесса синтеза объекта, представленного совокупностью конструктов, связанных структурными, семантическими отношениями и операциями [18].

Считается, что вычислительная сложность характеризуется функциональной зависимостью от числа операций при синтезе, от параметров, характеризующих размерность нового объекта или оценкой вида O($f(N)$). Алгоритм имеет сложность порядка O($f(N)$), если с увеличением размерности исходных данных N время выполнения алгоритма растет пропорционально функции $f(N)$. Известно, что $f(N) = C^N$ и $f(N) = N!$ пригодны только для решения задач с небольшими N. Для решения задачи O($N!$) при $N = 24$ требуется больше времени, чем существует вселенная. Поэтому алгоритмы со сложностью порядка O(C^N) и O($N!$) могут применяться только при малых значениях N.

Мощность множества вариантов ПрО конструктов при синтезе нового объекта можно определить как функцию из допустимых вариантов свойств (k_j), числа отношений (N) и их значений:

$$f_1 = 2^{N_1} \prod k_{1j}, \quad f_2 = 2^{N_2} \prod k_{2j}, ..., f_m = 2^{N_m} \prod k_{mj}, \tag{1}$$

где j – число свойств (элементов); k_j – число возможных значений каждого свойства; m – число конструктов, из которых может состоять синтезируемый объект.

Тогда очевидно, что мощность множества вариантов синтеза нового объекта равна

$$f_0 = f_1 \bullet f_2, \cdot ..., \cdot f_m. \tag{2}$$

Сделав допущение, что каждый элемент конструкта имеет одинаковое количество свойств по формулам (1), легко посчитать число возможных вариантов синтеза одного конструкта. В качестве примера конструкта для систем на кристале (SoC) рассмотрим следующие принципы построения: последовательный, параллельный, с отрицательной и/или положительной обратными связями, преобразованием аналогового сигнала в цифровой код и обратно. Мощность множества конструктов с учетом возможности их различных размещений, перестановок и сочетаний между собой уже при m = 5 равна 205. Приняв N = 9 отношений, j = 9 элементов, k = 9 свойств и только m = 9 конструктов, находим $f_0 = 4{,}75415036309130 \cdot 10^{101}$ [5].

Следовательно, синтез структуры и параметров элементов объекта даже для одной ПрО относится к классу *NP*-сложных, что означает невозможность ее решения переборным способом за разумное время.

Очевидно, что такой перебор предполагает доведение проектирования до конца, чтобы было возможным использование абсолютной шкалы измерений. Однако при таком числе вариантов, как показано в работах Н.Г. Загоруйко с сотрудниками (Институт математики Сибирского отделения АН) показано, что информативность шкалы порядка (фактически троичная система счисления) приближается к информативности абсолютной

шкалы при большом числе объектов. Применение шкал наименований и порядка приближает совпадение результатов с абсолютной шкалой до 0,96. Но последними шкалами можно оперировать на начальных этапах проектирования, а, значит, и исключать из дальнейшего рассмотрения огромное число вариантов, не удовлетворяющих ТЭТ. Оставшиеся варианты могут использоваться для дальнейшего проектирования с существенным уменьшением мощности множества. Это подмножество назовем *эффективным*.

Ниже рассматривается синтез устройств с помощью линейных элементов с постоянными и перестраиваемыми параметрами (электронным или программным путем), нелинейных элементов с однозначными характеристиками.

Что касается синтеза параметров S_{Par} элементов схем и синтеза допусков S_{Tol} (*tolerance*) на отклонение их от номинального значения, то здесь проблемы решаются с помощью современных программных продуктов с использованием методов оптимизации.

Традиционно проектирование устройств и подсистем выполняется следующим образом. Вновь возникшая острая потребность в новом объекте лицом, принимающем решения (ЛПР), оценивается уровень объема выпуска нового объекта, его востребованность сейчас и в среднесрочном плане. Оценивается возможность производства объекта на существующей технологической базе.

При положительном решении составляются технические, технологические, эксплуатационные, экономические, экологические и эргономические требования (ТЭТ). ЛПР обращается к известным решениям подобных объектов и анализирует их. В результате анализа оно получает аналитическое описание, например для линейных цепей передаточную функцию $K(s)$. В ней i-е коэффициенты оператора Лапласа s^i состоят из суммы произведений операторных проводимостей элементов и безразмерных коэффициентов передачи усилителей (J). Следовательно, все коэффициенты являются символьными выражениями и с размерностью равной размерности коэффициента при s^0. Далее, анализируя $K(s)$, ЛПР приходит к выводу о степени пригодности структуры этого устройства для решения его конкретной задачи.

Если эта структура оказывается непригодной, то разработчик изучает разнообразную литературу в надежде найти готовое решение. Когда решение таким способом не найдено, команде разработчиков приходится самим изобретать новую структуру или отказываться от этого задания.

Подобной технологии проектирования в общем случае и обучают студентов. Они не изучают инструменты, помогающие им создавать новые объекты. По-видимому, в связи с этим выпускника инженерного профиля в России стали называть специалистом (в скобках заметим, *эксплуатационником*, а в лучшем случае – *по применению методов анализа*), а не гордым именем *инженер*.

Рассмотренная технология требует значительных временных и материальных затрат. Например, время проектирования (100 %) «систем на кристалле», содержащих цифровые и аналоговые устройства, соотносится как 20 к 80 % соответственно, но площади, занимаемые ими, противоположны. Столь существенное сокращение времени проектирования цифровых устройств связано с возможностью выполнения формального синтеза логических систем.

В теории проектирования цифровых устройств и ПО известны спиралевидные модели, содержащие соответственно три (Гайский, Кан, Угрюмов) и четыре (Райс, Боем) аспекта. У последних авторов спираль раскручивается, а у первых – закручивается. При этом число этапов у них одинаково и равно четырем. Однако самая сложная часть задачи разработки схемотехнических решений представлена одним этапом – проектированием, (эквивалентный термин в аналоговой схемотехнике – *реализация*), а в моделях ПО – реализацией программирования и тестированием.

Раскручивающаяся спираль соответствует известному подходу к проектированию от элементов к компонентам, подсистемам, системам и т. д. Для проектирования сложных устройств это тупиковый путь, т. к. при переходе от одной структуры прототипа к другой можно не понять, что перешли к принципу или способу, который может порождать структуры устройств и программ плохого или очень плохого качества. Каждый из них может быть реализован достаточно большим числом вариантов. Например, при минимальном числе из трех независимых решений на каждом этапе до этапа параметрического синтеза может порождаться около $3 \cdot 10^4$ вариантов структур. Этот вывод подтверждается существующей практикой выявления ошибок в программах большого объема путем бесплатного распространения β версий продукта среди огромного числа пользователей, но так и не удается выявить все ошибки.

Один из видов ошибки ПО – нефункциональные ошибки, которых по данным компании Coverity в среднем содержится 0,25 на 1000 строк исходного кода. Обнаружение таких ошибок – одна из самых сложных и трудоемких задач в процессе разработки ПО. В многопоточных программах встречаются дополнительные ошибки – ошибки синхронизации. Их обнаружению посвящены исследования, проводимые в многочисленных российских и зарубежных университетах

Только системный подход обеспечивает эффективное решение задач проектирования сложнофункциональных систем за время, сопоставимое с временем проектирования цифровых устройств.

Изложенная ситуация характерна практически для любой области деятельности человека и особенно там, где пока нет или весьма слабо развиты формальные методы решения новых задач, например, при разработке программных кодов в информатике, в медицине, педагогике, изобразительном искусстве и т. д.

Прогресс в этих областях достигается путем выработки на основе экспериментов некоторых рецептов, требующих в дальнейшем проверки независимыми экспертами или тестирования (как при проверке ПО и в медицине). Отсюда и возникают задержки по времени применения нового объекта и материальные затраты.

В работе [1] описан системный подход, решающий эти проблемы проектирования формально. В основе подхода лежит спиралевидная четырехаспектная, с обратными связями, сжимающаяся модель (рис. 1).

Необходимость указанных на рисунке этапов доказана в работах [9, 1]. Модель приведена для синтеза одного слоя сложных систем, состоящих из компонент, т. е. устройств, построенных из элементов. В микро- и наноэлектронике элементами на структурном уровне являются транзисторы, диоды, конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности, а компонентами – усилители, ограничители, логические элементы и т. п.

На этом слое создаются компоненты, в совокупности позволяющие выполнять все основные и вспомогательные функции, т. е. позволяющие осуществлять в аналоговом виде любые необходимые преобразования сигналов (это некоторый аналог логических элементов для цифровых систем). Более высокий слой синтеза подсистем по этой же модели осуществляется из необходимого набора компонент (в этом случае они рассматриваются уже как элементы).

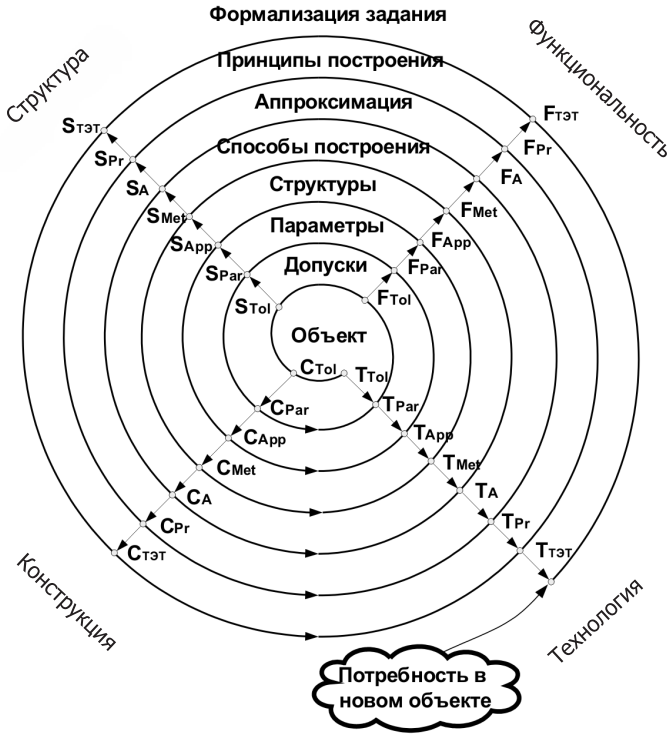


Рис. 1. Спиралевидная модель процедуры проектирования

Оригинальность идеи, заложенной в модель, заключается в синтезе символьного выражения, например для передаточной функции $K(s)$ на этапах $S_{\text{ТЭТ}} - S_{\text{Met}}$. Выражение отвечает всем сформулированным в ТЭТ требованиям, а уже потом по нему синтезируют структуру электронного устройства. Обычно такое выражение получают в результате анализа известной структуры объекта.

Таким образом, большая часть этапов проектирования направлена на синтез этого выражения. В известных моделях проектирования (см. ниже) этапы носят название готовых структур, которыми оперируют на этапе, а не процедур, которые надо выполнить, чтобы синтезировать необходимые структуры согласно модели на рис. 1.

Процедуры проектирования построены так, что они не указывают, куда надо идти из первоначально *NP*-полного множества возможных решений. Но они показывают, куда не надо идти, т. е. отсекаются решения, не удовлетворяющие ТЭТ. Следовательно, не требуется перечислять для каждого этапа иерархии все элементы множества решений, т. к. все они неразличимы (одинаково эффективны) согласно ТЭТ и функциям выбора для рассматриваемого этапа проектирования. Для следующего этапа ЛПР выбирает одно из решений синтезированного множества.

Следует отметить, что наши знания и представления о новом объекте под влиянием новой информации в процессе синтеза изменяются. Применение формальных и неформальных методов к синтезу (и анализу) объекта предполагает реализацию процесса, описанного Д. Пойа и названного «правдоподобным рассуждением» такого типа: B_1 – сформулированные ТЭТ обеспечивают решение проблемы создания объекта, B_2 – ТЭТ позволяют связать проблему создания и возможности реализации объекта, B_3 – аналогичные ТЭТ позволили решить подобную задачу синтеза нового объекта , …, B_n. A – новый объект устраивает ЛПР.

Фактически, в процессе синтеза нового объекта, согласуя ТЭТ и возможности их реализации, мы действуем согласно фундаментальной индуктивной схеме Д. Пойа:

$$\frac{\begin{array}{c}A \to B \\ B \text{ истинно}\end{array}}{A \text{ более правдоподобно}}.$$

Правдоподобные рассуждения, согласно Д. Пойа, расширяют обычный логический вывод и отличаются от него (в частности, от доказательства): открытостью множества аргументов, использованием правил не только достоверного, но и правдоподобного вывода. Доказательные (формализованные) и правдоподобные (неформализованные) рассуждения дополняют друг друга. Принятие решений по синтезу нового объекта основывается на доводах, которые следует относить к правдоподобным рассуждениям. Согласно Д. Пойа, выражение «из A следует B» ($A \to B$) не совпадает с обычной импликацией, рассматриваемой в математической логике. На самом деле неявно предполагается, что A и B некоторым образом связаны между собой, и переход от посылки (посылок) к следствию носит не достоверный (как при дедукции), а лишь правдоподобный (проблематичный) характер.

Формализация процесса правдоподобных рассуждений основывается на упорядочении ТЭТ – от самых важных с точки зрения ЛПР, в т. ч., обеспечивающих безусловную устойчивость, к наименее важным. Сформированный вектор ТЭТ представляется в виде функции выбора. Используя лексикографическое сравнение[2] разных структур, можно отсеять на самых ранних стадиях проектирования структуры, не удовлетворяющие ТЭТ [11].

По векторному критерию качества i-го этапа $Ef_i = (f_{i1}, ..., f_{i\eta}, ..., f_{i\lambda})$ сравнивают l синтезированных структур. Считают, что структура W_k не хуже структуры W_t ($W_t \cong W_k$), если выполнено $f_{i\eta}(W_k) \geq f_{i\eta}(W_t)$; **$\eta = (1, \ldots, \lambda)$ и структуры эквивалентны** ($W_k \sim W_t$) в смысле критерия f_i, если $f_{i\eta}(W_k) = f_{i\eta}(W_t)$.

Частные критерии не все равноценны, поэтому ранжируют их по важности, объединив равноценные в комплексы. В этом случае можно добиваться приращения более важного критерия за счет потерь по всем остальным менее важным критериям. Отыскание в указанном смысле эффективных структур можно осуществить, решив лексикографическую задачу оптимизации [11]:

$$\operatorname*{lex\,inf}_{W \in W_\gamma}(F_{fi}(f_i(W))),$$

[2] Сравнение двух лексикографически упорядоченных векторов осуществляют по принципу первого различия (как слова упорядочены в словаре). Например, $(x_1, ..., x_n, ...) > (y_1, ..., y_n, ...)$, если для некоторого k выполняется $x_k > y_k$ и $x_i = y_i$ для всех $i < k$.

где W_γ – множество всех возможных структур.

В соответствии с лексикографическим отношением предпочтения структур $W_k \overset{\text{lex}}{>} W_t$, которое будет справедливо, если выполняется одно из λ условий

1) $f_{i1}(W_k) > f_{i1}(W_t)$;

2) $f_{i1}(W_k) = f_{i1}(W_t); f_{i2}(W_k) > f_{i2}(W_t)$; ...;

λ) $f_{i\lambda}(W_k) = f_{i\lambda}(W_t),\ k = \overline{1, \lambda - 1};\ f_{i\lambda}(W_k) > f_{i\lambda}(W_t)$.

Когда лексикографически эффективные структуры существуют, то задачу лексикографической оптимизации решают следующим образом: найти $\operatorname{lex}\min_{W \in W\gamma}(F_{fi}(f_i(W))),\ i = \overline{1,6}$.

Любое проектирование предусматривает изготовление объекта, поэтому проектирование начинают с технологического аспекта, на котором указываются все технологические ограничения на параметры элементов и всей системы, а также используют модели элементов адекватные технологии.

На функциональном аспекте для каждого этапа i формируются критерии эффективности $Ef_i = (f_{1a}, \cdots; f_{2a}, \cdots)$, основанные на анализе результатов выполнения предыдущих этапов и ТЭТ, отражающих представление ЛПР о качестве проектируемой структуры данного слоя.

На структурном аспекте порождаются этап за этапом множество решений, которые сразу же передаются на последующие аспекты для реализации. Процедура структурного проектирования представлена композицией отображения S [9, 1]:

$$S = S_{\text{Tol}} \circ S_{\text{Par}} \circ S_{\text{El}} \circ S_{\text{App}} \circ S_{\text{Met}} \circ S_{\text{A}} \circ S_{\text{ТЭТ}} \circ F_{\text{ТЭТ}}. \quad (3)$$

Экспликация элементов композиции и последовательность ее раскрытия видна из рис. 1. В композицию (1) включены также задание на проектирование и синтез характеристики элемента S_{El}, если существующие на фабрике-изготовителе элементы (*elements*) не позволяют решить поставленную задачу. Чаще всего этот этап в микросхемотехнике пропускают, т. к. элементы жестко задаются существующей технологией фабрики-изготовителя. Но совершенствование транзисторной технологии, происходящее уже почти 50 лет примерно с двухлетним циклом, приводит к созданию новых элементов.

Завершает проектирование этап синтеза S_{Tol} – допусков на параметры элементов. Если допуски не могут регулироваться технологией, то проблему уменьшения отклонения характеристик решают структурным путем.

Составление ТЭТ входит в процедуру $F_{\text{ТЭТ}}$ синтеза, т. к. его формирование и уточнение занимает заметное время у проектировщика и заказчика, а последний чаще всего не знает все данные, необходимые проектировщику. Только совместная, плодотворная работа позволяет в дальнейшем избежать ошибочных решений. В процедуру $F_{\text{ТЭТ}}$ входит также обзор существующих решений для предлагаемого к синтезу объекта с тем, чтобы существенно сократить мощность множества возможных решений.

На каждом этапе для сокращения времени и стоимости перепроектирования из-за неверно или не сформулированного критерия на любом аспекте в процедуру проектирования введены обратные связи на каждом из аспектов. Такая технология проектирования сокращает время разработки, локализует место возможной ошибки на любом из четырех аспектов проектирования.

На всех аспектах синтезируется некоторое множество решений, образующих в совокупности эффективное проектирование всего объекта. Декомпозиция процедуры проектирования выполнена открытой и все ее этапы полностью обеспечены исходными данными, содержащимися в задании на проектирование и полученными на предыдущих этапах синтеза.

Открытость процедуры позволяет полностью использовать ранее накопленные знания и сокращать число обязательных шагов при повторном проектировании объекта с несколько другими данными.

Для функционального и структурного аспектов разработаны методы схемотехнического проектирования электронных устройств для вновь введенных этапов. Разработано исчисление способов построения электронных устройств различного назначения [9], сделаны некоторые упрощения для методов параметрического синтеза, разработан новый квазикаскадный принцип построения устройств [7]. Все семь этапов проектирования распространены и на оставшиеся два аспекта: конструкторский и технологический, т. к. при ближайшем рассмотрении оказалось, что они имеют те же этапы, но называемые иначе.

Высокий уровень качества устройств обеспечивается построением структур с низкой чувствительностью вектора характеристик к изменению параметров элементов под воздействием внешних факторов и технологического разброса [7, 10].

Традиционные методы определения функции относительной чувствительности к изменению параметров элементов разработаны только для анализа систем с уже известной структурой и параметрами. Поэтому впервые в работе [7] сделан переход с сохранением эквивалентности от нахождения функции относительной чувствительности к устойчивости систем. Далее, в рамках критериев Рауса, Гурвица [2, 10] выведен критерий безусловной устойчивости, обеспечивающий функцию относительной чувствительности ко всем элементам компонента или подсистемы в пределах 0–1 как для пассивных цепей.

Таким образом, были решены многокритериальные проблемы качества систем на структурном уровне путем синтеза выражения для $K(s)$, удовлетворяющего критериям безусловной устойчивости, а потом синтеза структур с этой особенностью. Подчеркнем, что хотя использовался критерий Гурвица, справедливый для линейных цепей, благодаря критерию безусловной устойчивости в системе могут быть и нелинейные элементы с однозначной характеристикой, а также элементы, изменяющиеся во времени, если скорость изменения их параметров значительно ниже скорости изменения сигналов.

2. Системно-структурный синтез передатчика дифференциальных сигналов стандарта LVDS

При наблюдаемом устойчивом росте сложности современных интегральных электронных устройств и разнообразии их функционального назначения, для экономической успешности проекта следует сокращать время проектирования нового актуального устройства, обладающего необходимым качеством.

Традиционно окупаемость заказных интегральных схем повышается при повторном использовании ранее найденных эффективных решений для отдельных функциональных узлов (IP блоков). Однако стандартные решения слабо адаптированы к конкретным технологическим требованиям и чаще всего ориентированы исключительно на классические схемотехнические решения.

Обычно требования к процессу проектирования являются противоречивыми (малое время и высокое качество). Поэтому успех проекта в борьбе за рынок определяется уже на стадии выбора стратегии проектирования. Следовательно, очень важно разрабатывать и внедрять новые методы проектирования, направленные на сокращение времени проектирования и создания баз знаний.

В основу разработки положена спиралевидная модель проектирования (см. рис. 1), охватывающая все аспекты проектирования заказных СБИС.

На первом этапе в большинстве случаев недостаточно данных для решения задач всех этапов и формализации их функциональности из-за вербальности значительной части ТЭТ. На аспекте F каждого этапа выполняется системный анализ результатов синтеза предшествующего этапа и к исходным ТЭТ формулируются дополнительные требования, обеспечивающие возможность решения задач следующего этапа. Совокупность этих требований формирует функцию выбора эффективных решений для следующего этапа $F(\mathrm{Ef})$.

На структурном аспекте (S) выполняется синтез структур в соответствии с названием этапов. Подчеркнем, решения этапов 2, 4 и 5 во всем мире относят к изобретательскому уровню, а синтезированные решения в большинстве своем носят нечисленный характер. Из-за этого возникает проблема выделения из множества NP-полных решений только подмножества эффективных, т. е. удовлетворяющих функции выбора каждого этапа. Ее решение изложено в первом разделе статьи.

На конструкторском аспекте (C) осуществляется размещение подсистем, компонентов и элементов на кристалле или плате; каналов отвода тепла, выделяемого элементами системы; разводка их соединений для минимизации паразитных влияний элементов, компонентов, подсистем друг на друга, а также минимизации длины соединительных проводников при заданных на аспекте S ограничениях. На этом аспекте широко применяются методы оптимизации и в существующих комплексах систем автоматизированного проектирования (САПР) такие программы имеются.

На технологическом аспекте (T) осуществляется проектирование на физическом уровне элементов компонент, подсистем и всей системы. Как правило, самой первой разрабатывается САПР этого аспекта, т. к. она задает параметры всех используемых элементов, но их размещение и другие особенности указываются на предыдущих аспектах.

Принцип построения по стандарту передачи дифференциальных сигналов LVDS появился сравнительно недавно, однако уже успел получить широкое распространение [3, 17, 18]. Основное его преимущество – низкое энергопотребление

(в 5–10 раз ниже, чем у CML или ECL [19]), достигаемое за счет снижения напряжения питания $U_{\text{п}}$ при достаточно высоком быстродействии.

Дифференциальные сигналы стандарта LVDS широко применяются в различных областях электроники: для подключения жидкокристаллических панелей, быстродействующих аналого-цифровых преобразователей, видеокамер. Также LVDS используется на физическом уровне компьютерных шин, например, Hyper Transport и SerialATA. Поэтому разработка IP блока LVDS передатчика с пониженным напряжением питания при сохранении высокой скорости передачи сигнала – актуальная задача.

Предлагаемая методика синтеза использует стандартизированный принцип построения LVDS передатчиков, изложенный в [18, 20].

На первом этапе аспекта F выполняется формирование набора показателей качества LVDS передатчика. Здесь же создаются лексикографически упорядоченные функции выбора F_i для всех аспектов, формируемые после каждого i-го этапа, основанные на исходных ТЭТ и дополнительных критериях, создаваемых на каждом этапе. С помощью этих функций из исходного NP-полного множества решений без перечисления элементов множества отсекаются решения, не удовлетворяющие F_i.

Часть требований к синтезируемому передатчику определяется стандартом и должна учитываться в любом случае. Такие требования называются *абсолютными*. Если синтезированные решения не удовлетворяют хотя бы одному из таких требований, то они исключаются из процедур дальнейшего синтеза. Остальные показатели качества могут иметь допуск, выбираемый проектировщиком в соответствии с доступной технологией и требованиями к конкретному проектируемому передатчику.

Возможно, что с самого начала некоторые показатели качества будут упущены из-за вполне естественной слабой подготовки потребителя продукции или невозможности описать показатель качества на языке вышестоящего этапа i. В этом случае на одном из аспектов не удастся построить эффективное множество решений. ЛПР этого аспекта формирует дополнительное ограничение или зависимость и передает для включения их в функцию выбора предыдущего этапа, возвращаясь по спирали и обратной связи на функциональный аспект i-го этапа.

На функциональном аспекте после анализа причины определяется возможность использования предыдущего решения после его модернизации. В случае отрицательного заключения из множества вариантов построения объекта исключается ранее синтезированный вариант и формируется новая функция выбора для подмножества вариантов i-го этапа и осуществляется проектирование с учетом дополнительных ограничений.

Сформированная система показателей качества применительно к LVDS передатчикам приведена в табл. 1, ее строки 1–4 соответствуют абсолютным показателям качества. Для неабсолютных показателей качества следует выполнить ранжирование в соответствии с приоритетными задачами проектирования.

Ниже проведем синтез передатчика, питающегося от низкого напряжения $U_{\text{п}}$ = 2,0 – 1,8 В (f_5), имеющего возможно меньшую площадь и частоту передачи не менее 500 МГц (f_6). Выбор таких значений обусловлен тем, что с миниатюризацией КМОП-элементов, уменьшается напряжение питания кристалла. По этой причине наиболее технологичными являются IP блоки с возможно более низким напряжением питания. Также использование пониженного напряжения питания предпочтительно при проектировании встраиваемых систем.

Функция выбора, содержащая только исходные лексикографически упорядоченные ТЭТ, как видно из табл. 1, имеет вид:

$$F_{\text{ТЭТ}} = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8, f_9, f_{10}).$$

Структурный аспект (S). Принцип построения передатчика задан стандартом. Для обеспечения двунаправленного протекания тока через нагрузку (f_{Pr} 1) в разные моменты времени при использовании одного источника питания передатчика требуется ввести в его структуру ключевые элементы (f_{Pr} 2). От LVDS передатчика требуется обеспечивать постоянный уровень тока (f_{Pr} 3) через нагрузочный резистор. Для этого целесообразно использовать источник постоянного тока заданного номинала 3,5 мА (f_{Pr} 4).

Показателями эффективности структуры передатчика выбраны низкий уровень питающего напряжения и малая площадь, поэтому целесообразно при построении передатчика использовать компоненты, объединяющие несколько функций (f_{Pr} 5).

Таблица 1

Показатели качества LVDS передатчика

Название показателя	Допустимый диапазон	Диапазон выбора
Уровень дифференциального. сигнала V_{OD} (f_1), мВ	±350 ± 100	
Уровень синфазного сигнала V_{OS} (f_2), мВ	1,25 ± 50	
Номинал согласующего резистора R_{term} (f_3), Ом	100	
Ток короткого замыкания I_{SC} (f_4), мА	0–24	
Напряжение питания VCC (f_5), В	1,8	1,8–3,6
Частота передачи (f_6), ГГц	0,25	0,1–2
Площадь на кристалле S (f_7)		Возможно меньше
Стабилизация выходных параметров сигнала (адаптивность) (f_8)		Есть/нет
Симметричность (f_9)		Есть/нет
Запас по динамическому диапазону для компонентов структуры (f_{10})		Возможно больше

Для управления синфазным уровнем выходного сигнала требуется использовать регулируемый компонент – управляемую проводимость ($f_{\text{Pr}}6$), источник напряжения ($f_{\text{Pr}}7$) или, например, управляемый источник тока с возможной функцией его коммутации ($f_{\text{Pr}}8$) (рис. 2 *ж*).

Сформулированные выше критерии выбора определили компонентный базис для синтеза подсистемы передатчика (рис. 2). Управляемые элементы (рис. 2 *в*, *г*) представляют собой четырехполюсники. Два их выхода включаются в цепь регулирования синфазного уровня в соответствии с сигналом управления. Ключевые элементы также представляют собой четырехполюсники ($f_{\text{Pr}}9$), но их вольтамперные характеристики цепи регулирования дискретно зависят от цифрового управляющего сигнала ($f_{\text{Pr}}10$)

Таким образом, функция выбора принципов построения имеет вид:

$$S_{\text{Pr}} = Ef_{\text{Pr}}(f_{\text{Pr}}1, f_{\text{Pr}}2, f_{\text{Pr}}3, f_{\text{Pr}}4, f_{\text{Pr}}5,$$
$$f_{\text{Pr}}6, f_{\text{Pr}}7, f_{\text{Pr}}10, f_{\text{Pr}}8, f_{\text{Pr}}9).$$

Этап аппроксимации. Функциональный аспект F_{A}. Так как статические состояния передатчика заданы в стандарте, то они будут обязательно выполнены, а задача синтеза математической модели направлена на уменьшение времени переходных процессов, протекающих в передатчике.

Сначала воспользуемся кусочно-линейной аппроксимацией выходного импульса передатчика ($s_{\text{A}}1$). Для повышения частоты его работы можно применить одну из аппроксимаций по Бесселю ($s_{\text{A}}2$), Баттерворту ($s_{\text{A}}3$) или Чебышеву ($s_{\text{A}}4$) до второго порядка ($s_{\text{A}}5$).

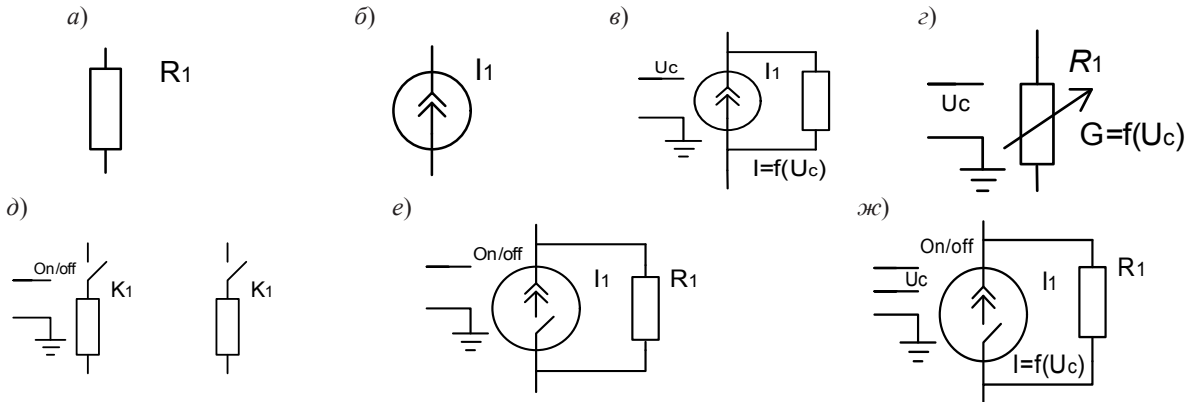


Рис. 2. Элементный базис для синтеза структур:
а – постоянное сопротивление; *б* – источник тока; *в* – регулируемый источник тока;
г – регулируемая проводимость; *д* – ключ с остаточным сопротивлением; *е* – регулируемый источник тока;
ж – регулируемый источни тока, управляемый напряжением

Этап аппроксимации. Структурный аспект S_A. Будем считать, что передача возможна, если переходные процессы занимают не более половины периода колебаний (s_A6) передаваемого сигнала. Поэтому длительности времени нарастании $t_{нар}$ и $t_{спада}$ импульса в сумме составят $t_{нар} + t_{спада} = T_и / 2$, где $T_и$ – минимальный период колебаний передатчика, задающего скорость передачи информации. Функция выбора в общем случае имеет вид

$$F_A = \mathrm{Ef}_A(F_{ТЭТ}, \mathrm{Ef}_{Pr}, s_A1, s_A5, s_A2, s_A3, s_A4, s_A6).$$

При использовании кусочно-линейной аппроксимации s_A1 получим форму выходного сигнала (рис. 3) в соответствии с этими требованиями.

Функциональный аспект способов построения, F_{Met}. Из-за ограниченного объема статьи рассмотрим только структурный аспект. Из имеющегося элементного базиса (см. рис. 2) выбираются несколько элементов устройства, позволяющие непротиворечиво реализовать требуемые принципы построения и достигнуть значений $t_{нар}$ и $t_{спада}$ в соответствии с s_A1.

При этом удобно синтезировать модель устройства с помощью направленных нераскрашенных графов ($s_{Met}1$), вершины которых соответствуют узлам структурной схемы передатчика ($s_{Met}2$), а дуги отражают пути протекания тока ($s_{Met}3$). Конечная цель данного этапа – синтез множества графов, позволяющих удовлетворить ранее сформулированным функциям выбора $F_{ТЭТ}$, S_{Pr}, S_A:

$$F_{Met} = \mathrm{Ef}_{Met}(F_{ТЭТ}, \mathrm{Ef}_{Pr}, \mathrm{Ef}_A, s_{Met}1, s_{Met}2, s_{Met}3).$$

Структурный аспект этапа. Способы построения S_{Met}. Исходя из результатов анализа принципов построения LVDS передатчика, следует, что граф должен содержать не менее четырех вершин (s_{Met} 1). При этом необходимо в каждый момент времени обеспечить путь протекания тока от источника к земле через нагрузку ($s_{Met}2$). Таким образом, вес дуг графа должен дискретно меняться во времени (s_{Met} 3).

Требование минимизации напряжения питания (f 5) передатчика, связанное с уменьшением потребляемой мощности, диктует способ построения, использующий структуры, графы которых содержат минимальное число последовательных ребер s_{Met} 4. В этом случае легче обеспечить требуемый динамический диапазон у элементов s_{Met} 5, реализующих управляемые источники тока и проводимости.

Следует учитывать, что каждое ребро графа структуры LVDS передатчика реализуется не менее чем одним мощным транзистором ($s_{Met}6$). Поэтому граф с меньшим числом ребер будет также предпочтителен с точки зрения минимизации площади, занимаемой на кристалле ($s_{Met}7$). Однако, возможно, что при минимальном графе не удастся непротиворечиво разместить на кристалле конструкцию устройств, реализующих все выбранные способы построения. Поэтому предусмотрим возможность расширения минимального графа $s_{Met}8$. Итак, функция выбора для способов построения имеет вид:

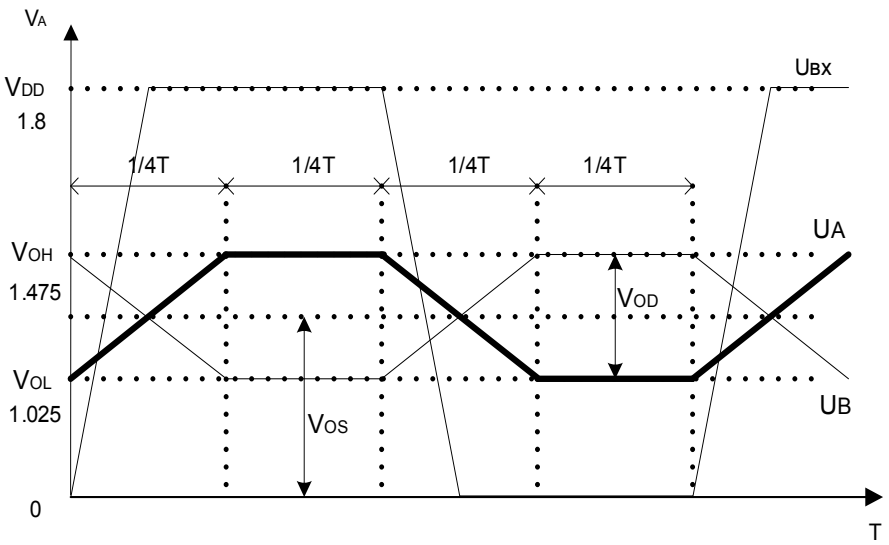


Рис. 3. Форма выходного сигнала LVDS передатчика

$$S_{\text{Met}} = \text{Ef}_{\text{Met}}\left(F_{\text{ТЭТ}}, F_{\text{Pr}}, F_{\text{A}}, F_{\text{Met}}\left(\begin{matrix} s_{\text{Met}}1,\ s_{\text{Met}}2,\ s_{\text{Met}}3,\ s_{\text{Met}}4, \\ s_{\text{Met}}5,\ s_{\text{Met}}6,\ s_{\text{Met}}7,\ s_{\text{Met}}8 \end{matrix}\right)\right).$$

Исходя из функции выбора, несложно построить направленные графы, отражающие способы построения S_{Met} (рис. 4).

Переходим к следующему этапу, сформировав для него функцию выбора. На этапе синтеза множества структур S_{App} выполняется раскраска графов, изображенных на рисунке. Для LVDS передатчика, исходя из симметричности выходов передатчика (s_{App} 1), пары ребер графа VCC-A, VCC-B (s_{App} 2) и A-GND, B-GND (s_{App} 3) должны быть одинаковыми. Для обеспечения двунаправленного протекания тока через нагрузку структура должна содержать хотя бы одну пару ключевых элементов (s_{App}4).

Для обеспечения номинального уровня тока через нагрузку путь протекания тока в каждый момент времени должен содержать источник тока (s_{App}5). Функция выбора для данного этапа имеет вид:

$$F_{\text{App}} = \text{Ef}_{\text{App}}(F_{\text{ТЭТ}}, F_{\text{Pr}}, F_{\text{A}}, F_{\text{Met}}, s_{\text{App}}1, s_{\text{App}}2, s_{\text{App}}3, s_{\text{App}}4, s_{\text{App}}5).$$

Выполненный синтез дал 9 вариантов таких структур. Из них одна не содержит ключей, и еще три не содержат источников тока. Оставшиеся структуры приведены на рис. 5. Для каждой структуры существует ее модификация, в которой коммутируемый источник тока заменен коммутируемым источником с регулируемым уровнем тока (s_{App} 3). Оценки качества для исходной структуры и ее модификации одинаковы за исключением того, что структуры на регулируемых источниках обладают свойством адаптивности (s_{App} 4).

Функциональный аспект (*F*). После генерации набора структур следует оценить их в соответствии с системой показателей качества (табл. 2).

Структура 1 на рис. 5 не проходит по абсолютному требованию (ток короткого замыкания) и остаются четыре конкурирующих структуры.

Различие в их качестве незначительно, поэтому необходимо ввести дополнительные показатели, которые помогут разделить структуры: потребляемый ток (предполагается использование у всех передатчиков одинакового источника питания) и симметричность процессов переключения выходного сигнала из низкого уровня напряжения на высокий уровень и обратно. В результате получим табл. 3.

Таким образом, согласно модифицированной системе показателей качества целесообразно выбрать структуру 5 (см. рис. 5), причем использовать в ней источники тока с управляемым уровнем для того, чтобы структура обладала свойством адаптивности (реализация критерия *f* 8).

Выбранная структура реализована на схемотехническом уровне для КМОП-технологии GPDK, поставляемой компанией Cadence вместе с системой проектирования заказных аналоговых ИС Virtuoso. Минимальная длина канала транзистора в этой технологии составляет 180 нм.

Для синтезированной структуры проведено моделирование устройства во временной области (рис. 6 *а*) и выполнен анализ по методу Монте-Карло для проверки соблюдения допустимого

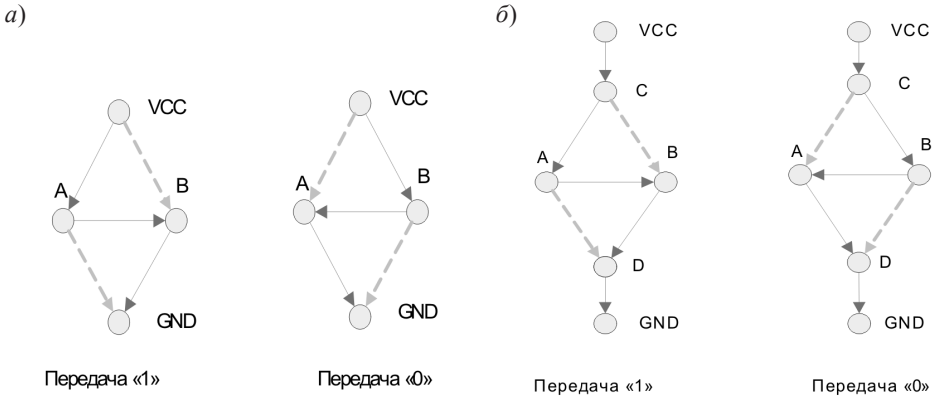
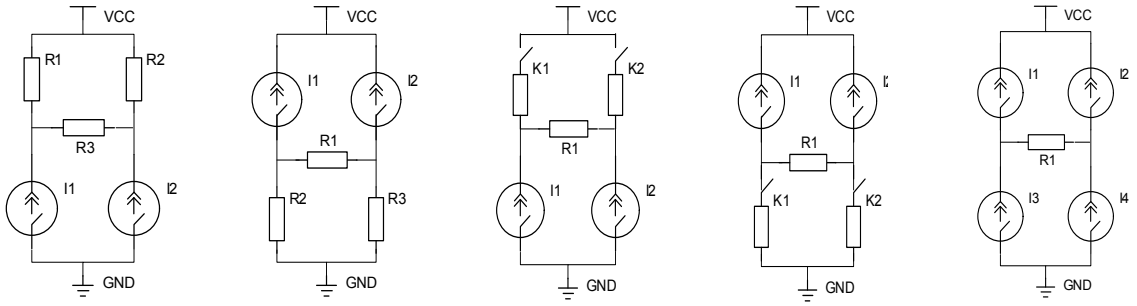


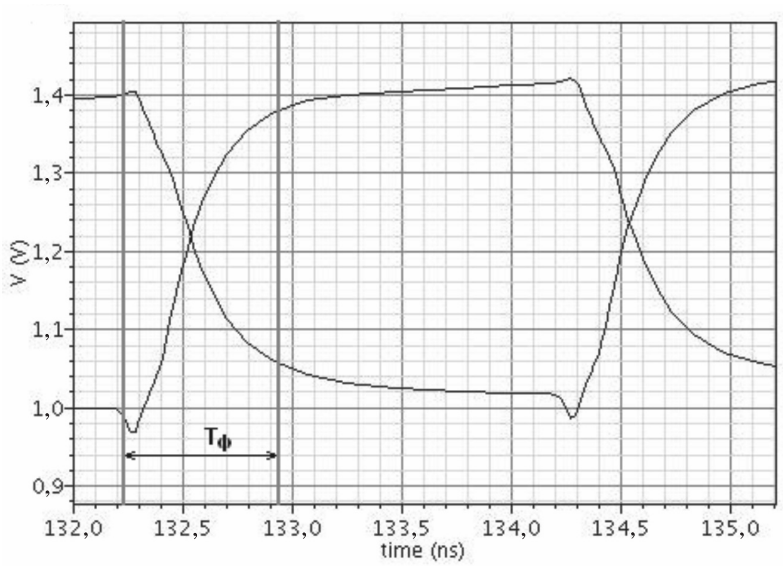
Рис. 4. Графы, отрожающие возможные способы построения LVDS передатчиков:
а – минимальный граф; *б* – расширенный граф



1 2 3 4 5

Рис. 5. Синтезированные структуры LVDS передатчика

а)



б)

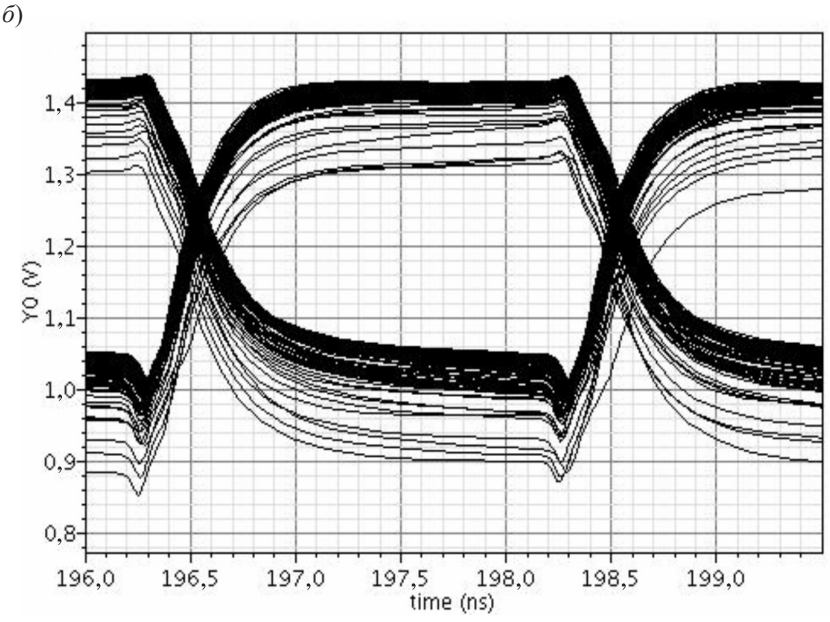


Рис. 6. Результаты моделирования спроектированного LVDS передатчика

Таблица 2

Оценки структур по системе показателей качества

Название показателя	1	2	3	4	5
VOD	+	+	+	+	+
VOS	+	+	+	+	+
R term	+	+	+	+	+
ISC	нет	+	+	+	+
VCC	+	+	+	+	+
F tr	=	=	=	=	=
S	=	=	=	=	=
Адаптивность	нет	нет	нет	нет	нет
Симметричность	+	+	+	+	+
Динамический диапазон источника	1,025	VCC-1,475	1,025	VCC-1,475	VCC-1,475
Динамический диапазон ключа			VCC-1,475	1,025	1,025

Таблица 3

Дополнительные показатели качества

Название показателя	2	3	4	5
Потребляемый ток, мА	12	3,5	3,5	3,5
Симметричность переходного процесса	–	–	–	+

режима работы передатчика при заданных технологией разбросов технологических параметров и изменении температуры в диапазоне 50–85°С (рис. 6 *б*). Время нарастания $t_{нар}$ по результатам эксперимента составило 870 пс (по ТЗ допустимо 1000 пс).

Таким образом, максимальная частота работы спроектированного передатчика с учетом принятого способа аппроксимации составляет 574 МГц.

Остальные показатели качества также удовлетворяют заданным требованиям, следовательно, задача синтеза является выполненной, причем с запасом. Это позволяет рекомендовать выбранную методику проектирования для применения.

Теория системно-структурного синтеза в настоящее время уже апробирована в различных областях знания. Практическая проверка оригинальности и качества синтезируемых компонент подтверждена тринадцатью авторскими свидетельствами на изобретения СССР (соавторы Ю.И. Лыпарь, Н.Н. Балтруков, Д.А. Скойбедо, А.Н. Малиновский, С.В. Корсуков) и патентом на полезную модель передатчика дифференциальных сигналов, описанного выше [25].

Кроме того, теория использована для формирования и управления портфелем ценных бумаг [16], выполнен синтез структур методик лечения болезней [12, 14], разработки алгоритмов и программного обеспечения синтеза структур [7, 13, 16, 26, 27].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лыпарь, Ю.И.** Системное проектирование. Функциональный и структурный аспекты [Текст]/Ю.И. Лыпарь// Сб. ст. Кибернетика и информатика.−СПб.: Изд-во Политехника, 2006. −С. 217−238.

2. **Захаров В.К.** Электронные устройства автоматики и телемеханики: Учебник для вузов [Текст]/ В.К. Захаров, Ю.И. Лыпарь − Л.: Энергоатомиздат, 1984. − 3-е изд., перераб. и доп. −432 с.

3. National Semiconductors Analog products selection guide [Текст]/ 2009. – Vol. 2.

4. **Бениаминов, А.М.** Алгебраические методы в теории баз данных и представления знаний [Текст]/ А.М. Бениаминов. – М.: Научный мир, 2003. –184с.

5. **Лыпарь, Ю.И.** Теория системно-структурного проектирования − основа интеллектуализации разработки моделей и систем поддержки принятия решений [Текст]/ Ю.И. Лыпарь , И.А. Кацко, Г.Ф. Бершицкая. − Краснодар: Изд-во КГАУ, 2010. − С.49.

6. **Волкова, В.Н.** Теория систем и системный анализ: Учеб. для вузов [Текст]/ В.Н. Волкова, А.Н. Денисов. −М.: Юрайт, 2010. −679с.

7. **Лыпарь, Ю.И.** Автоматизация проектирования избирательных усилителей и генераторов [Текст]/ Ю.И. Лыпарь. −Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. −144с.

8. **Болотова, Л.С.** Концептуальное проектирование модели предметной области при помощи программных систем разработки баз знаний для интеллектуальных систем поддержки принятия решений [Текст]/ Л.С. Болотова // Наукоёмкие технологии. −2009. −Т.10. −№ 8. −С.28−36.

9. **Лыпарь, Ю.И.** Системный синтез структур электронных и электрических цепей: Ч. 1 [Текст] / Ю.И. Лыпарь// Электричество. −2007. −№2. −С. 46−55.

10. **Лыпарь, Ю.И.** Чувствительность, безусловная устойчивость и качество систем [Текст]/ Ю.И. Лыпарь // Сб. ст. Кибернетика и информатика. −СПб.: Политехника. −2006. −С. 239−253.

11. **Подиновский, В.В.** Оптимизация по последовательно применяемым критериям [Текст]/ В.В. Подиновский, В.И. Гаврилов. −М.: Сов. радио, 1975. –192 с.

12. **Лыпарь, Ю.И.** Системно-структурный синтез: Учеб. пособие для вузов [Текст]/ Ю.И. Лыпарь // Системный анализ и принятие решений; Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова.- − М.: Высш. шк., 2004. −С. 427−439.

13. **Лыпарь, Ю.И.** Автоматизация синтеза структуры фильтров третьего порядка [Текст]/ Ю.И. Лыпарь, Н.Н. Балтруков // Автоматизация проектирования и экспериментальных исследований. −Л.: Изд-во ЛПИ, 1980. −С. 107−110.

14. **Лыпарь, Ю.И.** Синтез структур методик лечения болезней [Текст]/ Ю.И. Лыпарь, Е.В. Носикова// Тр. VII МНПК Системный анализ в проектировании и управлении. − СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. −С. 45–460.

15. **Стефанюк, В.Л.** Теоретико-категорный подход к описанию динамических продукционных систем [Текст]/ В.Л. Стефанюк, А.В. Жожикашвили// Тр. X национальной конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием КИИ-2006; В 3-х т.– М.: Физматлит, 2006. –Т.1. –С. 77−82.

16. **Лыпарь, Ю.И.** Системное проектирование и управление портфелем ценных бумаг [Текст]/ Ю.И. Лыпарь, А.Н. Косенков, А.А. Ельцов// Тр. междунар. конф. Интеллектуальные САПР, интеллектуальные системы. −М.: Физматлит, 2005.−Т. 2.−С. 491−498.

17. **Лыпарь, Ю.И.** Синтез баз знаний аналоговых электронных устройств. [Текст]/ Ю.И. Лыпарь // Тр. междунар. конф. Континуальные и алгебраические логики, исчисления и нейроинформатика в науке и технике. −Ульяновск, 2006. −Т. 3. −С. 120−128.

18. **Горелова, Г.В.** Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel [Текст]/ Г.В. Горелова, И.А. Кацко. –Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. –С.480.

19. **Goldie, John.** LVDS, CML, ECL-differential interfaces with odd voltages [Текст] / By John Goldie, applications manager.

20. **Boni, Andrea.** LVDS I/O Interface for Gb/s-per-Pin Operation in 0.35-um CMOS [Текст]/ Andrea Boni // IEEE J. of solid state circuits. −Apr. 2001. –Vol. 36. −№4.

21. **Tinsley, Steven J.** Voltage/current mode TIA/ EIA-644 compliant fast LVDS driver with output current limit [Текст]/ Steven J. Tinsley, Fernando D. Carvajal// US Patent # US 6,369,621 B1. −Apr. 9 2002.

22. **Yamaguchi, Michimasa** Altera. Cyclone III Device Datasheet. LVDS driver circuit and driver circuit [Текст]/Michimasa Yamaguchi//US Patent # US 7,038,502 B2. −May 2006.

23. Dillon, Christopher Daniel. Low voltage differential signaling (LVDS) drivers and systems [Текст]/ Christopher Daniel Dillon// US Patent # US 6,590,422 B1. −Jul. 2003

24. **Wong, Ban P.** Nano CMOS Circuits and Physical design [Текст]/ Ban P. Wong, Anurag Mittal, Yu Cao [et al.]. −Willey Interscience, 2005.

25. **Балтруков, Н.Н.** Патент на полезную модель № 107430 Передатчик дифференциальных сигналов стандарта LVDS [Текст]/ Н.Н. Балтруков, Ю.И. Лыпарь, А.Н. Скворцов. −М.: Бюллетень патент. № 22 от 10.08.2011.

26. **Лыпарь, Ю.И.** Система автоматизированного проектирования структур электронных цепей [Текст]/ Ю.И. Лыпарь, Н.Н. Балтруков, Д.А. Скойбедо // Системы автоматизации проектирования и научных исследований. –Л.: Изд-во ЛПИ, 1984. −С. 85–93.

27. **Лыпарь, Ю.И.** Алгоритм синтеза графов электронных цепей САУ с применением таблиц смежности [Текст] / Ю.И. Лыпарь, Н.Н. Балтруков, Д.А. Скойбедо // Труды ЛПИ.− Л.: Изд.-во ЛПИ, 1984. − № 398. −С.19−21.

УДК 681.5.01

А.Ю. Васильев, В.Е. Куприянов

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ПО ВЫХОДУ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ

При управлении линейными непрерывными стационарными многомерными объектами основная проблема заключается в необходимости выбора управляющих воздействий на основе ограниченной информации лишь о выходных переменных, доступных измерению. Традиционные методы управления [1] предполагают для ее решения построение наблюдателей состояния и формирование управляющих воздействий в функции от восстановленных координат состояния. Такой метод управления может использоваться лишь при точной информации о математической модели объекта и неизменности ее параметров в процессе эксплуатации системы управления. Синтез робастных регуляторов с использованием методов H^{∞}-теории [2] гарантирует устойчивость систем, но приводит к значительному росту порядка системы управления. Кроме того, на практике часто требуется реализовать управление в линейной зависимости от выходных координат (так называемые *типовые регуляторы*). К числу задач, подлежащих решению, в работе [2] отнесена задача стабилизации объектов регулятором заданной структуры. Разработке одного из возможных способов решения таких задач посвящена данная статья.

Пусть математическая модель объекта управления определена соотношениями

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \qquad (1)$$

где $x \in R^n$, $y \in R^m$, $u \in R^r$ – векторы состояния, выхода и управления. Предполагается, что объект (1) вполне управляем и наблюдаем. Ставится задача стабилизации вектора выходных переменных.

Предлагаемый метод синтеза регулятора по выходу осуществляется в два этапа.

На первом этапе осуществляется редукция математической модели (1) объекта управления до порядка, определяемого размерностью вектора выхода m. Для этого предлагается использовать метод уравновешенного сокращения по сингулярным числам Ганкеля [3]. Особенность его использования – заранее выбранная размерность редуцированной модели $n_p = m$, обеспечивающая равенство числа координат состояния редуцированной модели числу координат вектора выхода.

Второй этап заключается в построении регулятора, осуществляющего стабилизацию системы управления. В связи с равенством размерностей вектора состояния редуцированной модели и вектора выхода, для решения задачи синтеза могут использоваться такие методы, как синтез модальных регуляторов, синтез регуляторов по интегральному квадратичному критерию. Завершение процедуры синтеза предполагает проверку устойчивости и качества системы управления при использовании исходной, не сокращенной модели объекта.

В качестве примера, иллюстрирующего возможность использования предлагаемого метода, рассмотрим задачу синтеза системы автоматического управления перетоком активной мощности для энергообъединения «энергосистема – шины бесконечной мощности» [4]. Такому объекту можно сопоставить математическую модель:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2w(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \qquad (2)$$

где $x \in R^5$ – вектор состояния объекта; $u \in R^1$ – управляющее воздействие, направленное на изменение генерируемой мощности энергосистемы; $w \in R^1$ – внеплановое возмущение, приведенное к валу энергосистемы; $y \in R^2$ – вектор выходных переменных, в качестве которых используются переток активной мощности по ЛЭП и отклонение частоты. Параметры объединения определяются элементами матриц:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0{,}1 & 0 & 0 & 0 \\ -47{,}619 & -0{,}12857 & 47{,}619 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -0{,}017 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0{,}5 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0{,}05 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -47{,}619 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Задача управления заключается в стабилизации перетока активной мощности по межсистемной ЛЭП.

На рис. 1 приведена гистограмма сингулярных чисел Ганкеля для заданного объекта. На основе гистограммы видно, что наиболее целесообразным с точки зрения минимизации погрешности приближения является сокращение размерности модели с пяти до четырех. Однако желание сократить число координат вектора состояния до размерности вектора выхода $n_p = m$ приведет к существенной погрешности аппроксимации модели. Использованием процедуры уравновешенного сокращения по сингулярным числам Ганкеля (с учетом методики распределения весов [3]) получена редуцированная модель требуемой размерности, определяемая матрицами:

$$A_r = \begin{bmatrix} -0,0001905 & 2,2305 \\ -2,2353 & -0,037233 \end{bmatrix},$$

$$B_r = \begin{bmatrix} -0,4854 & 0,009939 \\ -6,7866 & -0,02245 \end{bmatrix},$$

$$C_r = \begin{bmatrix} 0,30382 & -0,01696 \\ 0,37871 & 6,7866 \end{bmatrix}.$$

Первый столбец матрицы B_r редуцированной модели соответствует управляющему воздействию, второй – возмущающему.

Для выполнения второго этапа решения задачи выбран синтез оптимальных параметров с использованием для оценки качества квадратичного функционала:

$$J(u) = \int_0^\infty (y_r^T \tilde{Q} y_r + u^T u)\, dt\ .$$

При $\tilde{Q} = \begin{bmatrix} 25 & 0 \\ 0 & 2,5 \end{bmatrix}$ после подстановки $y_r = C_r x_r$ можно получить квадратичный функционал стандартного вида

$$J(u) = \int_0^\infty (x_r^T Q x_r + u^T u)\, dt\ ,$$

где $Q = C_r^T \tilde{Q} C_r = \begin{bmatrix} 386,77 & -9,4481 \\ -9,4481 & 8,0748 \end{bmatrix}$.

LQR-синтез оптимального регулятора обеспечивает получение оптимальных коэффициентов $k_r = [15,75 \quad -7,2361]$ линейного регулятора при управлении по состоянию $u_{\text{opt}}(t) = -k_r \cdot x_r(t)$. Учитывая то, что требуется формировать управление в функции от выходных переменных, линейно связанных с координатами состояния через матрицу C_r, можно получить параметры регулятора при управлении

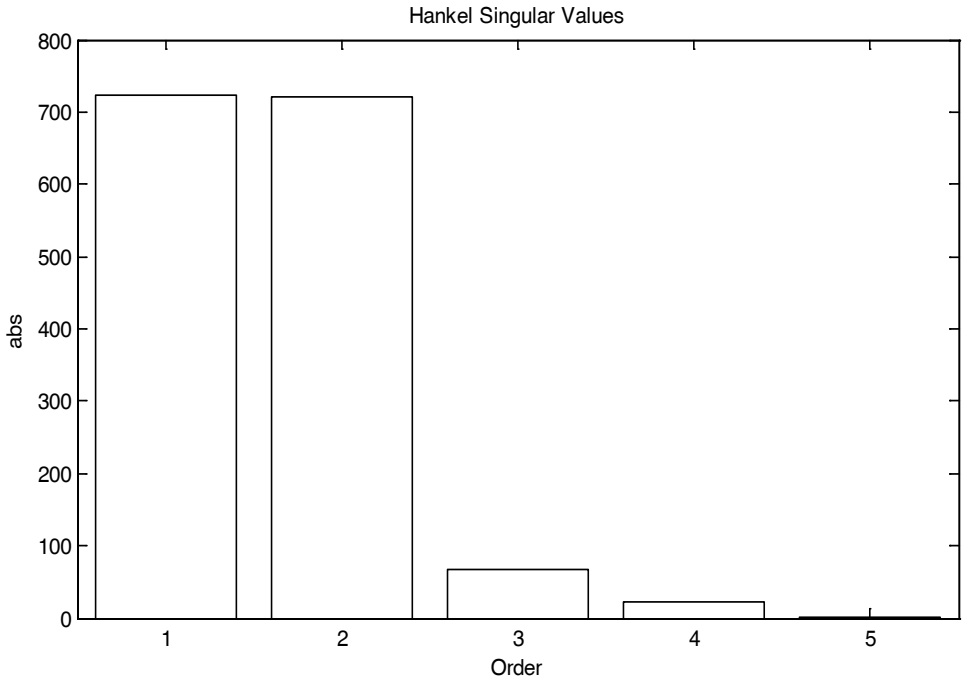


Рис. 1. Гистограмма сингулярных чисел Ганкеля для исходной модели

по выходным переменным $u(t) = -Ky(t)$, где $K = k_r \cdot (C_r)^{-1} = [12,211 \quad -1,286]$. Пропорциональный регулятор с такими параметрами предлагается использовать для исходного полномерного объекта (1). Анализ собственных значений матрицы замкнутой системы

$$A_z = A - B_1 KC,$$

подтверждает ее устойчивость.

Для оценки качества полученной системы произведено ее сравнение с системой синтезированной методом «алгоритмического конструирования оптимальных регуляторов» (АЛКОР) [5]. Методом АЛКОР при использовании того же функционала для оценки качества получены оптимальные параметры регулятора $\tilde{K} = [14,204 \quad -2,0799]$. На рис. 2 представлены графики переходных процессов при отработке ступенчатого воздействия w = 0,1. Сплошной линией отображен процесс при выборе параметров регулятора, определяемых вектором K, пунктирной – вектором $\tilde{K}$.

Для оценки запаса устойчивости САУ будем использовать матрицы замкнутых систем и оценивать нормы минимальных возмущений, приводящих к потере устойчивости. С этой целью удобно применять сингулярное разложение матриц $A = USV^T$, где U, V – унитарные матицы, $S = \mathrm{diag}(\sigma_1, \sigma_2, ..., \sigma_n)$ и σ_i – i-е сингулярное число A.

Известно [6], что норма минимального аддитивного возмущения Δ, приводящего к потере устойчивости, определяется соотношением

$$\min_{\Delta \in C^{m \times n}} \{\|\Delta\|_2 \mid \mathrm{rank}(A + \Delta) < n\} = \sigma_n(A). \qquad (3)$$

Оценка запаса устойчивости будет осуществляться для обеих рассмотренных выше систем. Параметры систем:

$$A_1 = A - B_1 KC = \begin{bmatrix} 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ -47,619 & -0,12857 & 47,619 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -0,017 & 0 & -1 & 1 \\ -0,61055 & 0,0643 & 0 & 0 & -0,5 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = A - B_1 \tilde{K} C = \begin{bmatrix} 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 \\ -47,619 & -0,12857 & 47,619 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -0,017 & 0 & -1 & 1 \\ -0,7102 & 0,104 & 0 & 0 & -0,5 \end{bmatrix}.$$

Анализ устойчивости полученных систем подтверждается приведенными ниже векторами собственных чисел:

$$\lambda(A_1) = \begin{bmatrix} -0,13849 + 2,2626i \\ -0,13849 - 2,2626i \\ -1,9596 \\ -0,19599 + 0,69768i \\ -0,19599 - 0,69768i \end{bmatrix},$$

$$\lambda(A_2) = \begin{bmatrix} -0,18973 + 2,3088i \\ -0,18973 - 2,3088i \\ -2,0822 \\ -0,083476 + 0,71328i \\ -0,083476 - 0,71328i \end{bmatrix}.$$

Сингулярные значения матриц:

$$\sigma(A_1) = \begin{bmatrix} 67,349 \\ 1,7082 \\ 0,85406 \\ 0,54167 \\ 0,099361 \end{bmatrix} \text{ и } \sigma(A_2) = \begin{bmatrix} 67,349 \\ 1,7136 \\ 0,84938 \\ 0,59644 \\ 0,098566 \end{bmatrix}.$$

Для оценки запаса устойчивости используем относительную величину норм минимальных аддитивных возмущений Δ_1 и Δ_2:

$$\gamma_1 = \frac{\|\Delta_1\|_2}{\|A_1\|_2} = \frac{\sigma_5(A_1)}{\sigma_1(A_1)} = 0,0014753$$

$$\text{и } \gamma_2 = \frac{\|\Delta_2\|_2}{\|A_2\|_2} = \frac{\sigma_5(A_2)}{\sigma_1(A_2)} = 0,0014635.$$

Близость полученных процессов и оценок под-

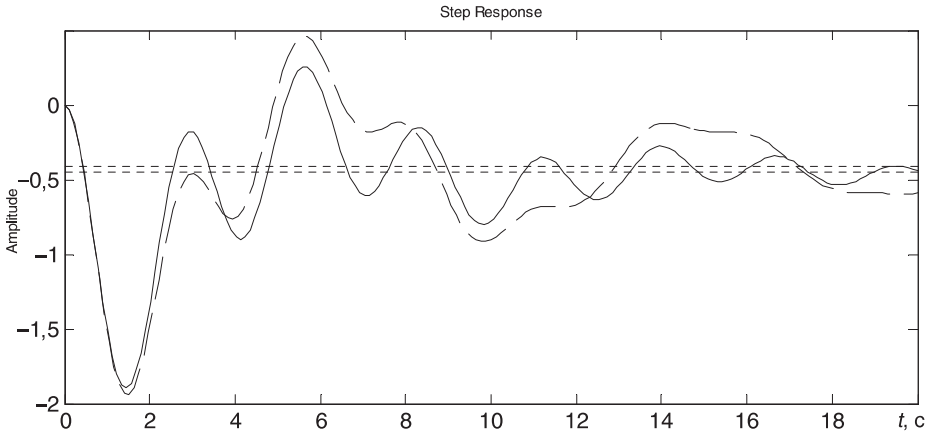


Рис. 2. Графики переходных процессов при ступенчатом воздействии

тверждает возможность использования предлагаемой методики для проектирования регуляторов по выходу. При этом параметры синтезируемых регуляторов близки оптимальным значениям. Это позволяет рекомендовать к использованию данную процедуру для выбора настроек типовых (промышленных) регуляторов и в других случаях синтеза систем управления заданной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козлов, В.Н.** Теория автоматического управления: Учеб. пособие [Текст] / В.Н. Козлов, В.Е. Куприянов, В.Н. Шашихин; Под ред. В.Н. Козлова // Управление энергетическими системами. Ч. 1. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. –316 с.

2. **Поляк, Б.Т.** Робастная устойчивость и управление [Текст] / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков. –М.: Наука, 2002. –303 с.

3. **Васильев, А.Ю.** Редукция многомерных систем на основе распределения весов входных и выходных сигналов [Текст] / А.Ю. Васильев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2011. –№ 2 (120) –С. 118–123.

4. **Козлов, В.Н.** Управление энергетическими системами. Электромеханические процессы [Текст] / В.Н. Козлов; под. ред. Ю.С. Васильева. –СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. –256 с.

5. **Козлов, В.Н.** Вычислительные методы синтеза систем автоматического управления [Текст] / В.Н. Козлов, В.Е. Куприянов, В.С. Заборовский. −Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. –224 с.

6. **Dahleh, M.** Lectures on dynamic systems and control [Текст] / M. Dahleh, M.A. Dahleh, G. Verghese. – Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 2003. –382 с.

УДК 004.8, 004.8.032.26

Е.Н. Бендерская

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗРАБОТКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

С самого момента зарождения научного направления «искусственный интеллект» (ИИ) оно уже было одним из направлений, образовавшихся на пересечении многих наук и объединивших в себе сразу множество различных научных дисциплин [1]. Наверное, можно считать, что именно с началом формирования и становления теории «искусственного интеллекта» началось движение в сторону взаимного проникновения и интеграции наук, в некотором смысле обратного по отношению к тому, что наблюдалось ранее только в виде дифференциации отдельных наук, их отпочковывания от «философии» и т. д.

Термин «ИИ» в последнее время в русско-

язычной литературе стараются несколько избегать, заменяя его терминами «искусственный разум», «когнитивные системы» и прочими синонимами, несущими лишь частичное уточнение о разрабатываемых подходах. Связано это с тем, что в свое время на этапе становления данной научной области были сделаны слишком оптимистические заявления относительно возможности и времени создания машин с ИИ. Определенное разочарование в научном направлении ИИ, не оправдавшем возлагавшиеся на него надежды, до сих пор дает о себе знать в виде определенного скептицизма, хотя многие результаты и накопленный задел уже позволяют пусть осторожно, но все более уверенно говорить о приближении эры умных машин. Здесь используется понятие «ИИ» не только как исторически сложившееся, но и как наиболее общее, с нашей точки зрения, и отражающее суть поисков.

В настоящей статье проводится анализ тенденций развития современных подходов и методов ИИ и изменения роли и уровня мультидисциплинарности, требуемой для качественного скачка в области ИИ. Основное внимание уделено в большей степени выявлению причин, по которым пока еще, несмотря на многочисленные успехи в решении отдельных задач, комплексная задача разработки ИИ, хотя бы в первом приближении сравнимого с человеческим, не решена [1–5]. При этом философский аспект возможности или невозможности решения этой задачи здесь не рассматривается. Исходим из предположения, что это возможно; основной вопрос – каким образом.

Также в данной работе не ставится задача подробного рассмотрения всех имеющихся моделей и методов ИИ, что потребовало бы написания нескольких томов [1, 6], как и детального описания недостатков и достоинств отдельных методов. Цель – анализ направлений ИИ как концепций и определение путей их развития.

Необходимость прибегать к научным заделам других наук в области ИИ связана с тем, что с одной стороны требовалось хотя бы в первом приближении охарактеризовать, что такое интеллект естественный, его признаки, круг задач и затем уже привлекать теорию синтеза технических систем, включая формальную логику и функциональный анализ, и другие теории. Для определения естественного интеллекта пришлось обращаться к знаниям, накопленным в смежных научных областях, – психологии, нейропсихологии и других, заимствовать в какой-то мере термины и определения, осуществляя модификации для удовлетворения потребностей разрабатываемой теории. Об этой стороне сложности разработки теории ИИ написано немало, вспомнить об этом необходимо для лучшего понимания дальнейшего хода развития теории и определения ее перспектив.

При этом необходимо отметить, что по мере развития отдельных научных дисциплин и углубления знаний об объектах исследования тенденции в виде специализации по предметам исследования остались, ввиду значительного усложнения теорий и их методов, что также усложняет задачу разработки единой теории.

Сформировавшиеся первоначально и развивавшиеся независимо друг от друга, основные два подхода к разработке и созданию ИИ – символьный (ассоциируется с экспертными системами (ЭС), базами знаний, вероятностной логикой) и коннекционистский (ассоциируется с нейронными сетями (НС), моделями малых миров и другими сетевыми моделями) в настоящее время уже не конкурируют, а дополняют друг друга, в т. ч. и через множество нейро-нечетких методов, в которых сочетается и обучение, и задание явных знаний в виде некоторого набора правил [1, 5, 7].

Однако несмотря на это взаимное обогащение в целом теория ИИ все еще достаточно далека от той амбициозной цели, которая была поставлена и казалась достаточно легко достижимой в скором времени – создания действительно интеллектуальных систем, способных развиваться, самостоятельно ставить задачи и решать их, находить новые, явно не заложенные в систему решения, т. е. воспринимать информацию, думать, действовать как человек (можно говорить и о просто некотором живом существе, но такое определение менее универсально, т. к. в этом случае пришлось бы говорить о том, какие функции живого существа воспроизводятся) [2, 3, 5, 8].

Наука о мозге и ИИ

В связи с большими успехами в области генной инженерии, накоплением большого объема экспериментальных данных о внешних проявлениях работы мозга, появившихся с развитием технологии неинвазивного наблюдения за функционированием мозга, а также с развитием вычислительной техники, позволяющей обрабатывать огромные объемы данных, о чем раньше и

мечтать не приходилось, удалось узнать достаточно много о различных сторонах работы мозга и с такой степенью детализации, что стало возможным описание на уровне математических моделей процессов записи и извлечения информации из отдельных клеток мозга с оценкой концентрации соответствующих химических соединений и уровня вызванных потенциалов.

Конечно, для некоторых задач необходимо знание процессов, протекающих на достаточно низком уровне, но это не всегда позволяет выйти на более высокий уровень и увидеть всю систему в целом для задач комплексных. Возможно, что развитие вычислительной техники наряду с явно положительными аспектами привнесло и не совсем желательную составляющую – появилась возможность экстенсивного перебора вариантов в поисках похожего на правильное решений, но в итоге больше времени уделяется накоплению данных и поиску решения за счет подбора, что можно сделать и не обладая особой интеллектуальностью. В результате акцент исследований все больше смещается в сторону эксперимента. Теоретическое обобщение и интерпретация со всеми необходимыми согласованиями с теориями других уровней отступают на второй план.

Можно говорить о разрозненности и фрагментарности имеющихся знаний. Задача интегрирования их в единую теорию ставится во многих научных работах, о ее необходимости также написано достаточно много.

Что же может выступить в качестве обобщающего разные уровни знания о такой сложной системе, как мозг? Один из возможных ответов – синергетика, наука о самоорганизации систем [9]. Причем привлечение синергетики для развития теории ИИ является вполне естественным, если учесть, что мозг – динамическая система.

Приходится предположить, что без знаний из области физики, биофизики, химии, биохимии разработать полноценную теорию ИИ невозможно. И, наверное, не зря многие из известных ученых в области нейроинформатики являются профессиональными физиками. Существует новая концепция развития кибернетики – кибернетическая физика, предложенная Фрадковым, т. к. многие кибернетические системы могут быть исследованы только с использованием моделей, изучаемых в физике, и на основе эксперимента – экспериментальной физики [10]. С другой стороны, многие физические эксперименты в настоящее время немыслимы без использования всей мощности вычислительной техники.

Бурное развитие вычислительной техники, наращивание мощности процессорных устройств вряд ли поможет в реализации ИИ, т. к. частоты работы мозга несоизмеримо меньше частот вычислительных процессоров, и ориентирован мозг в большей степени на решение не арифметических, не вычислительных задач, о чем упоминалось не раз в разных работах. Мозг скорее работает с неточными, недоопределенными, неявными образами и «решает» примерно. Во всяком случае, до момента осознания, когда подключается осмысление. То, что решение приходит раньше, чем мы его осознали, озвучили и выполнили, нейрофизиологи выявили уже давно.

До какой степени следует пытаться воспроизвести биологические процессы и до какого уровня абстракции символов можно отойти от биологического прототипа?

Существуют достаточно успешные изолированные узкоспециализированные методы и модели ИИ, позволяющие решать отдельные задачи, но использовать их в качестве основы для общей теории не удается.

Таким образом, получается достаточно большое разнообразие моделей и методов, большой объем разрозненных знаний, во многих аспектах глубоких и обширных, а целостной картины нет. Это, как в известной и часто приводимый в качестве примера басне про слона, где несколько слепых людей ощупывает в отдельности и описывает свою часть слона – есть хобот, есть хвост, есть ноги, а общего видения слона нет.

Понятно, что идея просто взять и проинтегрировать, собрать все известные данные о работе мозга и существующие модели ИИ не даст положительного эффекта. Тогда возникает вопрос, уже не частный, какая модель лучше для какой задачи – здесь как раз обобщений для разного класса задач множество, а вопрос о том, какое направление в ИИ наиболее перспективно в плане создания единой сложной системы ИИ.

Проблемы основных подходов ИИ

Основная проблема, стоящая перед разработчиками ИИ символьного направления – невозможность формального представления всех возможных ситуаций, с которыми может столкнуться система в процессе функционирования. Если ввести некоторые ограничения, то удается

успешно решать задачи определенного класса, представленные именно введенными ограничениями, универсальность оказывается недостижима. Система будет «умна» настолько, насколько полно при ее создании учтены все возможные варианты исходных данных. Во многих приложениях это и не требуется, но при создании ИИ как раз ставится задача получения новых знаний внутри самой системы. При этом часто речь идет не столько об умении логически доказать какую-либо теорему на основе уже доказанной теоремы, сколько о возможности дополнить неполное, а иногда противоречивое описание исходных данных и вариантов принимаемых решений. В этом случае мы сталкиваемся с тем, что должны дать системе достаточно степеней свободы и в принципе, в сложной незнакомой ситуации мы заранее не сможем предсказать действия системы, можем лишь наложить некоторые ограничения, типа предложенных в известном романе А. Азимова «Я – робот» (нельзя принять решение, которое может причинить вред человеку). Это как и с человеком, поведение которого предсказуемо лишь до определенной степени, и, говоря об интеллекте и нестандартном мышлении (до известного предела), которое так ценится и рассматривается как креативность, имеется ввиду умение генерировать новые, нестандартные (нешаблонные) решения, что особенно важно для операций в сложной, неизвестной обстановке.

С таким же ограничением по представлению всех возможных вариантов исходных данных и ситуаций столкнулись и разработчики коннекционистского направления. Хотя НС и оперируют с невидимыми образами, обучаясь, умеют обобщать и в принципе дополнять недостающие пробелы, тем не менее в целом по большей части статические НС прямого распространения не более чем универсальные аппроксиматоры [11]. Отдельное направление НС с самоорганизующимися картами Кохонена (СОК) также обладает множеством ограничений, несмотря на удобство визуального представления результатов обобщения и выявления неявных знаний в виде кластеров [11, 12]. Ограничения, на преодоление которых направлено множество модификаций СОК, связаны как с необходимостью постобработки при работе с заранее неизвестным числом кластеров, ввиду того, что основой СОК является к-средних, так и с тем, что не любые данные целесообразно представлять в виде типичных представителей – центров кластеров, на основе которых работает СОК.

Особые надежды связаны с динамическими НС (НС с обратными связями или рекуррентные НС). НС этого класса помимо того, что реагируют на входные сигналы, поступающие в текущий момент времени, обладают памятью о прошлых входных воздействиях так же, как и биологические НС, и обработка входных сигналов осуществляется с некоторой задержкой на циркуляцию сигналов по сети за счет обратных связей. Один из типичных представителей динамических НС – НС Хопфилда, выполняющая функции ассоциативной памяти. Функционирование этой сети хорошо согласуется с последними данными нейрофизиологов о том, что память и распознавание неразрывны между собой – это взаимосогласованные процессы. Однако в силу особенностей структуры этой сети, у нее также довольно много ограничений на применение. Разработанное множество модификаций, развивающих данную структуру, направлены на их устранение, но решить весь комплекс вопросов в пределах одной структуры не удается. Специальные структуры динамических нейронных сетей – НС Элмана и Джордана решают сложные задачи определенного класса, но универсальностью не обладают [11].

Дальнейшее развитие динамических нейронных сетей – НС Хакена, значительно расширенный вариант сети Хопфлда, а вернее – НС Хопфилда – усеченный частный вариант сети Хакена. В этой сети хорошо согласуются процессы самоорганизации и распознавания за счет особых параметров – параметров внимания и параметров порядка. О них чуть подробнее будет написано ниже. Несмотря на то, что функционирование НС Хакена может быть описано и на макро- и на микроуровне, тем не менее в силу аттракторного подхода (имеется в виду простой аттрактор в виде точки или предельного цикла), эта модель также ограничена.

Отдельного внимания заслуживают НС в классе так называемых «резервуарных» НС [13]. Началось все с исследования НС со случайной структурой, эти НС интересны тем, что обладают сложной динамикой, использовать которую и предлагается для решения сложных задач.

Более детальное рассмотрение этих моделей будет выполнено в следующем разделе, а здесь для полноты общей картины необходимо отметить еще два направления, в какой-то степени

дополняющие, а в чем-то стоящие несколько отдельно, но связанные с первыми двумя направлениями.

Функциональный и мультиагентный подходы образуют еще одно направление, которое скорее можно отнести к развитию символьного направления, ввиду того, что в этих подходах выделяются отдельные модули, которые снабжаются функциями по усмотрению разработчика, и в этом (обозримость и явное описание набора правил, функций, исходящих из логики нашего представления о том, КАК должен работать и развиваться агент или подсистема) состоит и сила (удобство для нашего анализа), и слабость (ничего нового не может быть сгенерировано) этого подхода. Опять же, несмотря на то, что в таких системах возможны эффекты самоорганизации, они, как правило, ограничены заданными в явном виде правилами и условиями и в большей степени относятся к разработке системы снизу–вверх.

Мультиагентный подход находится на стыке с методами так называемого «распределенного интеллекта». При этом под интеллектуальным агентом уже подразумевается не формально описанная система правил функционирования и взаимодействия отдельного достаточно сложного агента (что ближе к символьному подходу), а агент относительно простой – клетка, нейрон или особь (пчела, муравей), но обладающий большими степенями свободы, т. к. задание функционирования осуществляется на уровне системы, а к каким видам кооперативных эффектов это приведет, зависит от модели системы в целом. В этом случае существует неопределенность в том, какие действия и как будут выполнены при решении глобальной задачи (коррелирует с разработками сверху-вниз), больше напоминает коннекционисткий подход.

Биологические аспекты ИИ и биоинспирированные методы

Несмотря на то что сама идея создания ИИ является уже биоинспирированной, при ее реализации может быть разная степень приближения к биологическому прототипу.

В последнее время все больше внимания уделяется биоинспирированным нейронным сетям на биоподобных нейронах, хотя и классические НС тоже биоинспирированные, но на формальном нейроне. В силу того, что ставшие классическими структуры нейронных сетей на формальных нейронах исчерпали себя в том смысле, что качественного скачка в этих подходах уже не получить, их место среди прочих подходов к решению определенного класса задач уже определено, ясны пределы по достижимому качеству и условия получения решения тоже известны.

Скорее всего, попытки детального воспроизведения процессов, происходящих в отдельных нейронах, без достаточно четкого понимания того, какие принципы взаимодействия и развития заложены в биологических нейронах, и попытки построения искусственных НС на биологически подобных нейронах не будут давать значительного продвижения в получении желаемого результата – ИИ. Воспроизведение во всех деталях химико-физических процессов, протекающих в нервных клетках, представляет интерес скорее для биологических приложений и менее – для ИИ. Даже при условии реализации на подходящей аппаратной базе органического происхождения или прямо с использованием биологической ткани конструирование системы из отдельных биологически подобных элементов пока не позволяет говорить о приближении создания ИИ.

Конечно, отдельные результаты уже получены и дополняют в каком-то смысле наши представления о возможных вариантах работы нервной системы биологических существ, однако, видится, что простое воспроизведение характеристик нейронных ансамблей для частных режимов работы также не позволит получить обобщение для всей системы в целом. Во многих работах прямо указывается, что часть характеристик определенными ухищрениями удалось получить, но при этом другие, уже отлаженные участки, перестали соответствовать желаемым характеристикам. Конструирование общего снизу-вверх, причем с очень низкого уровня, и простое соединение частей не даст целого – системы с новыми свойствами. Для того чтобы синергизм произошел, нужно, чтобы изначально были заложены принципы самоорганизации.

Распределенные вычисления и неустойчивая динамика

Новые структуры на основе случайных НС предложили независимо друг от друга Маас и Джагер [13]. Идея в целом одна и та же – наличие случайной НС и отдельной структуры, которая за этой НС наблюдает. Основное различие в предложенных подходах – НС Мааса реализована на

биологически подобных нейронах (импульсных), а НС Джагера – на формальных сигмоидальных нейронах. Эти две модели дали начало новому направлению «резервуарных» НС.

«Резервуарными» НС названы потому, что в этих моделях выделяется некоторое множество нейронов (резервуар), и они соединяются между собой случайным образом (как правило, задается степень связности или иной параметр, через который определяется полнота связей НС). И это множество нейронов и связей неизменно (не обучается) – обучение проходят связи с некоторым наблюдателем, призванным фиксировать значения на выходах выделенного множества нейронов. На некоторые из нейронов заданного множества подаются входные сигналы, изменяющие динамику работы всего множества за счет множества межнейронных связей, слои внутри множества, как правило, не выделяются, т. е. это случайная рекуррентная сеть.

Представляется, что этот подход заслуживает особого внимания, т. к. идея о том, что сложность структуры НС должна быть адекватна сложности решаемой ею задачи, в этом случае реализуется. Эволюцию подхода к созданию памяти можно представить следующим образом. Вначале множество хранимых (подлежащих распознаванию) образов кодировалось множеством весовых коэффициентов НС (сети статические), далее – множеством образов – множеством точек притяжения (точечных аттракторов) в фазовом пространстве динамической системы (НС Хопфилда и НС Хакена), затем – множеством замкнутых траекторий в фазовом пространстве (аттракторы типа замкнутый цикл, тор), и, наконец, множеством траекторий, определяющих лишь местоположение в фазовом пространстве в виде бесконечного числа сменяющихся состояний. Последний подход может быть определен как использование систем с неустойчивой динамикой, подразумевая под этим отсутствие устойчивых состояний, к которым система приходит со временем.

Основная сложность НС с «резервуарами» состоит в том, что случайно сгенерированная структура не гарантирует того, что она будет производить требуемую динамику. Здесь необходимо оговориться, что это означает. Как показал анализ проведенных экспериментов по решению задач на «резервуарных» НС необходимо, с одной стороны, разнообразие состояний системы, чтобы она не оказалась устойчивой, и, с другой стороны, динамика должна быть восприимчива к действию входных сигналов и не обладать турбулентными режимами, не позволяющими выделять реакцию системы на входные сигналы. Оперируя определениями Пригожина: система должна быть на границе между порядком (упорядоченный режим работы по Канеко) [14, 15] и хаосом (имеется в виду турбулентный режим по Канеко), т. е. производить детерминированный хаос (в частично-упорядоченном режиме по Канеко). Причем как было показано в ряде работ, эта граница представляет собой некоторый интервал возможных значений параметров системы, т. е. это не линия.

Анализ работ по исследованию резервуарных НС и собственных компьютерных экспериментов по моделированию работы этих сетей в различных условиях и при разном сочетании параметров позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, проблема выбора необходимого и достаточного числа нейронов резервуара остается не до конца решенной. То, что нейронов может быть недостаточно для обработки и обобщения необходимого объема информации, интуитивно понятно и строго доказано [16], а вот то, что избыточное число нейронов также плохо сказывается на работе НС, может быть не так очевидно. Однако избыточное число степеней свободы приводит к тому, что сеть прямого распространения не обучается, а просто запоминает представленные примеры или формирует псевдозакономерности, которые может и присутствуют в обучающей выборке, но связаны, например, с особенностями получения данных. Для резервуарной сети, весовые коэффициенты которой неизменны, избыточное число нейронов означает переход сети в режимы работы, в которых она не реагирует на входные сигналы, или эту реакцию трудно выделить на фоне турбулентной собственной динамики. Сеть как бы имеет собственное «мнение» и входная информация его не изменяет. При недостаточном числе нейронов в резервуаре обучить выходной слой вычленять необходимую информацию тоже не удается (слишком мало степеней свободы), и сеть реагирует на разные сигналы одинаковым образом. Проблему обучения наблюдателя (выходного слоя системы в целом) разрешают различными способами, на эту тему написано немало статей. Однако все предлагаемые решения приводят к тому, что огромные возможности неустойчивой динамики не используются. А в некоторых случаях задача, представленная на вход

резервуарной НС, может быть решена лучше без резервуара, только на наблюдателе.

Во-вторых, существуют лишь некоторые разрозненные рекомендации о том, какая должна быть структура наблюдателя. Выбор адекватного по сложности наблюдателя очень важен, т. к. от того, насколько хорошо научится наблюдатель интерпретировать работу резервуара, зависит качество решения задачи в целом. Если наблюдатель не сможет правильно интерпретировать динамику резервуара, то и не сможет выявить сформированный резервуаром ответ на входные воздействия. Здесь уместна аналогия с проблемой извлечения знаний, хорошо известная в теории экспертных систем.

При этом в отличие от сетей прямого распространения, где только производится сравнение с правильным ответом, здесь требуется заложить в наблюдатель разные вариации правильного ответа, чтобы правильно интерпретировать то, что заложено в динамике резервуара. Для структуры наблюдателя это означает, что она должна быть тоже достаточно сложной – иначе наблюдатель может не справиться с интерпретаций ответа выходов резервуара НС.

В-третьих, практически все параметры резервуара, особенно в биологически ориентированной модели Мааса, выбираются интуитивно, исходя из предварительной серии экспериментов. Существует строгое доказательство того, что на резервуаре можно реализовать машину Тьюринга, но это в общем виде, в принципе. При решении практических задач существует неопределенность в назначении параметров системы.

Хаос в порождении виртуальных структур обработки информации

Получить достаточно простую с точки зрения задания связей структуру НС, обладающую сложным поведением, можно посредством использования в рекуррентной нейронной сети нейронов с передаточной функцией, порождающей хаотические колебания выхода нейрона. С одной стороны, дискретных детерминированных преобразований, порождающих хаос, немало, но, с другой стороны, многие из них достаточно просты. Такой подход оказывается в русле с подходами, в которых усложняют нейрон, повторяя или биологический прототип, или включая множество логических операций в базис отдельного нейрона.

Концепция создания сложной системы только за счет связей и огромного числа простых вычислительных элементов – нейронов, сменилась сначала на концепцию относительно сложных элементов, и дошла до очень сложных элементов – биологически подобных (или биологически приближенных). Основные трудности работы с такими НС указаны выше.

Наиболее распространенным среди дискретных преобразований, порождающих хаотические последовательности, является логистическое отображение. Это связано с тем, что при достаточно простой записи и простой реализации в нем присутствует параметр, позволяющий регулировать степень хаотичности порождаемых последовательностей.

Исследование множества связанных логистических отображений проводится в области физики, теории динамических систем и нелинейной динамики. Различным вариантам организации таких систем и снятию характеристик динамических режимов как глобально, так и локально связанных отображений, посвящено множество исследований. Их результаты могут быть частично задействованы при разработке НС на основе логистических отображений, но при этом потребуется исследование влияния внесения в систему внешних воздействий и способов интерпретации измененных под этими воздействиями режимов работы [14]. То есть встает вопрос о включении в систему входных сигналов.

Отчасти такие исследования уже проведены в области решения задач кластеризации [12]. А для построения универсальной системы ИИ необходимо рассматривать ее не изолированно, а в той среде, в которой предполагается ее использовать. Такой же вывод сделан и в работе, посвященной исследованию роли хаоса в НС [17], и во многих исследованиях, связанных с разработкой интеллектуальных агентов [6]. Учет контекста при обобщении, накоплении и интерпретации информации позволит значительно расширить возможности интеллектуальных систем.

Перспективные направления

Для разработки интеллектуальных систем, специализированных для решения определенного класса задач, следует придерживаться уже известных и формализованных подходов или использовать их сочетания – гибридные системы –

для расширения функциональных возможностей и улучшения характеристик работы. Детальное воспроизведение работы отдельных нейронов или их ансамблей, относящихся к тому или иному разделу мозга целесообразно при решении задач моделирования в области нейрофизиологии и смежных областей.

Если же ставится задача разработки достаточно универсальной системы и в бóльшей степени соответствующей работе нервной системы живых существ, то наиболее подходящим представляется использование нейронных ансамблей с неустойчивой динамикой и иерархией синхронизированных сигналов. В этом случае появляется возможность исследования более тонких механизмов работы и подбора сочетания параметров, обеспечивающих необходимые режимы функционирования системы. Этот подход может быть реализован как на компьютерных моделях, построенных на математическом описании таких систем, так и на моделях, связанных с физическим воплощением в искусственной среде типа реакционно-диффузионных сред, или непосредственно на биологическом материале, выращенном в искусственной среде, что уже успешно используется во многих лабораториях. Такие исследования позволят приблизиться к созданию ИИ. Многие математические модели распространения колебаний в сложных средах успешно изучены на таких физических моделях, как, например, физическая модель образования волн.

Следует отметить, что даже если не удастся достаточно быстро выстроить полную и непротиворечивую концепцию того, как осуществляется обработка информации и комплексирование частных решений в реакционно-диффузионных средах (или в искусственно выращенной среде нервной ткани), подходы и методики к их использованию уже можно наметить. В дальнейшем, как и в любой теории возможны уточнения, дополнения и обобщения. Для решения практических задач важнее насколько модель и метод позволяют справиться с решением и описывают видимые эффекты, а соответствие реальным процессам отходит на второй план и часто является вопросом философским.

Широкие возможности моделирования сложных синергетических процессов и их анализа с использованием теории нелинейной динамики и хаоса уже находят применение не только для разработки технических систем, но и для исследования экономических и биологических, социальных эффектов. Скорее всего, в ближайшее время инструментарий нелинейной динамики и хаоса будет самым востребованным и для постижения особенностей человеческого восприятия и для моделирования когнитивных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Люгер, Дж.** Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем [Текст] / Дж. Люгер. –М.:Вильямс, 2005.

2. **Cristianini, N.** Are we still there? [Text] / N. Cristianini // Neural Networks. –2010. –№ 2. –P. 466–470.

3. **Goertzel, B.** A world survey of artificial brain projects. P.II: Biologically inspired cognitive architectures [Text] / B. Goertzel, L. Ruiting, A. Itamar [et al.] // Neurocomputing. –2010. –№74. – P. 30–49.

4. **Kamps, M.** Towards Truly Human-Level Intelligence in Artificial Applications. Cognitive Systems Research [Электронный ресурс] / M. Kamps // j. cogsys. –2011.01.003

5. **Mira, J.M.** Symbols versus connections: 50 years of artificial intelligence [Text] / J.M. Mira // Neurocomputing. 2008. – № 71. –P. 671–680.

6. **Рассел, С.** Искусственный интеллект. Современный подход [Текст] / С. Рассел, П. Норвиг. –М.: Вильямс, 2007.

7. **Lin, C.** Neural Fuzzy Systems: A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems [Text] / C. Lin, G. Lee. –Prentice Hall, 1996.

8. **Baum, S.D.** How long until human-level AI? Results from an expert assessment [Text] /S.D. Baum, B. Goertzel, T. Goertzel // Technological Forecasting & Social Change. –2011. –№ 78. –P. 185–195.

9. **Haken, H.** Synergetic Computers and Cognition: A Top-Down Approach to Neural Nets [Text] / H. Haken. –SSS: Springer, 2010.

10. **Фрадков, А.Л.** Кибернетическая физика: принципы и примеры [Текст] / А.Л. Фрадков. –СПб.: Наука, 2003.

11. **Хайкин, С.** Нейронные сети. Полный курс [Текст] / С. Хайкин. –М.: Вильямс, 2006.

12. **Benderskaya, E.N.** Clustering by chaotic neural networks with mean field calculated via Delaunay triangulation [Text] / E.N. Benderskaya, S.V. Zhukova // Lecture Notes in Artificial Intelligence. –Springer, 2008. –Vol. 5271. –P. 400–416.

13. **Jaeger, H.** Introduction to the Special Issue on Echo State Networks and Liquid State Machines [Text] / H. Jaeger, W. Maass, J. Principe // Neural Networks. –2007. –№ 20 (3). –P. 287–289.

14. **Inoue, M.** Dynamics of Coupled Adaptive

Elements: Bursting and Intermitteny Oscillations Generated by Frustration in the Network Text/ M. Inoue, K. Kaneko // Phys. Rev. –2010. –Vol. 81. –P. 126–203.

15. **Пригожин, И.Р.** Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой [Текст] / И.Р. Пригожин, И. Стенгерс. –М., 1986.

16. **Колмогоров, А.Н.** О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных [Текст] / А.Н. Колмогоров. –ДАН СССР, 1956. –Т. 108. –С. 2– 9.

17. **Потапов, А.Б.** Нелинейная динамика обработки информации в нейронных сетях [Текст] / А.Б. Потапов, М.К. Али // Изв. вузов. Сер. Прикладная нелинейная динамика. –2001. – Т. 9. – Вып. 6. –С. 3–44.

УДК 004.383

Ю.И. Лыпарь, С.А. Молодяков

МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНАЛОГОЦИФРОВЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЦЕССОРОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Один из подходов системного проектирования устройств – подход, который можно назвать *целевым*, позволяющий осуществить проектирование объекта, идя от целей (сверху) к конечной структуре и ее параметрам (вниз) [1]. Данный подход можно применить и к проектированию оптоэлектронных процессоров (ОЭ-процессоров). Он позволяет не только формализовать этапы разработки, но и выявить недостающие элементы стадий проектирования, синтезировать новые устройства.

Особенность проектирования ОЭ-процессоров связана с тем, что они являются функционально сложными устройствами, состоящими из разнородных компонент: оптических и электронных, аналоговых и цифровых. Трудно определить уровень элемента системы. Для описания компонент применяют разный математический аппарат.

В данной статье ставится задача не только разработки системного подхода к проектированию ОЭ-процессоров, но и рассмотрения конкретных примеров на разных уровнях проектирования, что упрощает будущее применение описываемой методологии.

Основы системного проектирования

Рассмотрим базовые принципы системного проектирования в рамках спиралевидной модели [1]. При проектировании используется сжимающаяся спиралевидная модель, содержащая четыре аспекта: технологический (*T*), функциональный (*F*), структурный (*S*) и конструкторский (*C*). На каждом аспекте порождается множество решений, что позволяет соответствующему проектировщику принимать наиболее эффективные из них. Подчеркнем, структурный аспект является системообразующим, его результаты последовательно используются на конструкторском и технологическом аспектах проектирования. Результаты проектирования одного этапа указанных аспектов суммируются на функциональном аспекте. На нем выполняется анализ полученных результатов на соответствие функции выбора $F(E_f)$ и формулируются в виде функций и ограничений выбора для следующих этапов. Начинается проектирование с потребности в новом устройстве и формулировки технических, технологических, эксплуатационных, экономических и экологических требований (ТЭТ).

Множество решений, которое не удовлетворяет функции выбора, из дальнейшего проектирования исключается. Оставшиеся элементы множества решения с помощью функции выбора *i*-го этапа оказываются неразличимыми. Это множество называется *эффективным*, т. к. любой его элемент может быть использован для дальнейшего проектирования. Лицо, принимающее решение (ЛПР), выбирает из множества одно решение для дальнейшего проектирования. На этом же аспекте новая информация об объекте, полученная на *i*-м этапе, используется для формирования более детальной функции выбора следующего этапа $F(E_f(i+1))$.

Особо отметим, что на первых этапах в функцию выбора входит больше вербальных переменных, чем численных. Именно из-за этого попытки решить проблемы синтеза структур с помощью численных методов терпят неудачу. Число возможных решений по разработанной модели превышает $4 \cdot 10^{101}$ [2], что позволяет говорить о ее универсальности. Одновременно это дает основание для использования в функциях выбора шкал наименования, сравнения [3] и только на конечных этапах функции выбора начинают содержать большее число численных критериев. Как показано в работе [3], при большом числе вариантов решения использование абсолютной шкалы и двух нечисленных приводит в более чем 90 % решений к одинаковому результату.

Формальное обоснование этапов проектирования изложено в [1, 2]. Число этапов, их последовательность обоснована необходимостью получения информации на i этапе, достаточной для решения задач синтеза на $i + 1$ этапе. Первый весьма непростой этап – этап формирования требований $S_{\text{ТЭТ}}$, которым должен удовлетворять проектируемый объект.

Так как предполагается изготовление нового объекта, то необходимо определить технологическую базу, ее элементный состав, который будет использован при проектировании, и технологические ограничения. Затем идут этапы: синтез принципов построения S_{Pr}, аппроксимация S_{A} желаемого облика объекта проектирования или его характеристик; синтез способов построения S_{Res}, синтез структуры S_{App}, параметров S_{Par} ее элементов и допусков на них S_{Tol}.

Таким образом, композиция отображений этапов проектирования структур имеет вид

$$\Pi = S_{\text{Tol}} \circ S_{\text{Par}} \circ S_{\text{App}} \circ S_{\text{Res}} \circ S_{\text{A}} \circ S_{\text{Pr}} \circ S_{\text{ТЭТ}}. \quad (1)$$

Композиция начинается с формализации ТЭТ, а заканчивается проектированием допусков на параметры элементов. Заметим, что три этапа S_{Pr}, S_{App} и S_{Res} порождают решения как известные, так и патентуемые.

Учет остальных аспектов проектирования (F, C и T) приводит к спиралевидной модели [1], начинающейся с этапа формализации задания и заканчивающейся получением объекта. После решения задач каждого этапа появляются новые данные, необходимые для формирования функции выбора следующих этапов.

Как часто бывает по разным причинам, не все ограничения и условия могут быть сформулированы и включены в функции выбора на первых этапах, что приводит к невозможности на одном из этапов какого-либо аспекта синтезировать решение, удовлетворяющее соответствующей функции выбора. Поэтому возникает необходимость после уточнения данных для построения уточненной функции выбора вернуться по контуру обратной связи на один этап назад.

Системное проектирование ОЭ-процессоров

Опишем отображение (1) по двум аспектам F и S. Начинают процесс проектирования с функционального аспекта, преобразуя ТЭТ в функциональные соотношения и разделения их по аспектам. Выполняя отображения $F_{\text{ТЭТ}}$, описывающие процесс постепенной формализации ТЭТ для всех последующих этапов, сокращают число вербальных ограничений и увеличивают численные ограничения и показатели качества системы. В результате сформируются первые функции выбора для каждого из аспектов:

$$\text{ТЭТ} \rightarrow F(as);\ F(as)=(F_{\text{ТЭТ}}, F_S, F_C, F_T), \quad (2)$$

где $F(as)$ – совокупность функций выбора, каждая из которых содержит функциональные соотношения, условия и ограничения в задачах принятия решения.

Для каждого аспекта и этапа i формируются критерии эффективности E_{fi} в результате выполнения отображений $i - 1$ уровней и ТЭТ, отражающих представление о качестве проектируемой структуры данного уровня. Для $i = 1$ все критерии (вербальные и формальные) формируются из исходных ТЭТ и общих представлений проектировщика о предметной области.

ОЭ-процессоры являются процессорами обработки сигналов, поэтому ТЭТ функционального аспекта определяется требованиями (задачей) по обработке сигналов в процессоре. Опишем стандартные ТЭТ (f_k) для задачи проектирования устройства обработки сигналов радиоизлучения пульсаров.

Пульсары представляют собой нейтронные звезды с высокой и очень стабильной скоростью вращения [4]. Импульсное шумоподобное радиоизлучение пульсаров наблюдается в широком диапазоне частот от 100 МГц до 10 ГГц (f_1) с периодом повторения импульсов T_P от единиц миллисекунд до единиц секунд (f_2). У большинства пульсаров отношение сигнал-шум много меньше 1 (f_3). Особенность радиоизлучения пульса-

ров заключается в дисперсии радиоизлучения в межзвездной среде. Из-за дисперсии короткий импульс радиоизлучения пульсара дрейфует (f_4) по частоте в полосе приема Δf с центральной частотой f от высоких частот к низким со скоростью $\alpha_{DM} = \frac{f^3}{8{,}3 \cdot 10^3 \, DM}, \frac{МГц}{с}$, где DM – мера дисперсии пульсара, в парсек/см^3, f – частота, в МГц.

Для изучения радиоизлучения пульсаров требуется создавать специальные устройства – пульсарные процессоры или компенсаторы дисперсии, работающие в приемных комплексах больших полноповоротных радиотелескопов [4]. Основная задача пульсарных процессоров – построение временного профиля импульсов радиоизлучения (f_5). Полоса частотного анализа радиоизлучения у пульсарного процессора Δf должна соответствовать полосе частот приемного устройства радиотелескопа (f_6). Для выделения сигнала из-под шума требуется использовать максимально возможные (f_7) на текущем уровне технологий частотные полосы (100 МГц – 1 ГГц).

Известны несколько типов пульсарных процессоров, построенных на основе аналоговых, цифровых и оптоэлектронных элементов. ОЭ-процессоры имеют ряд преимуществ перед другими устройствами, прежде всего из-за их простоты (f_8) и надежности работы (f_9), низкого энергопотребления (f_{10}), малых размеров (f_{11}) и массы (f_{12}) [5].

ОЭ-процессоры используют последетекторной метод компенсации дисперсии [4], который включает операции по спектральному преобразованию, разделению на каналы, суммированию кадров с компенсацией частотной дисперсии (со сдвигом в частотной области). В результате другие ТЭТ функционального аспекта определяются следующим образом. ОЭ-процессор должен проводить операции по получению профилей импульсов радиоизлучения за минимальное время (f_{13}) с использованием последетекторной компенсации дисперсии (f_{14}); временное разрешение δt должно позволять различать элементы структуры профиля пульсара (f_{15}), время полного накопления должно позволять выделять импульсы радиоизлучения как ярких, так и слабых пульсаров (f_{16}). ОЭ-процессор должен позволять получать профили импульсов для всех известных пульсаров от миллисекундных до секундных (f_{17}) в полном диапазоне изменения DM (1–100 парсек/см^3) (f_{18}). Уровень сигнала с антенны радиотелескопа может изменяться, поэтому необходима автоматическая регулировка усиления в тракте прохождения сигнала (f_{19}). Необходимо поддерживать интерактивность процесса наблюдения (f_{20}): наблюдатель должен видеть процесс получения и уточнения профиля пульсара и иметь возможность в этот процесс вмешаться, например, с целью отстройки сигнала от шумов (f_{21}). Критерием эффективности E_{f1} является минимизация $f_{10} - f_{13}$ при заданном отношении сигнал-шум и соблюдении остальных требований.

ТЭТ структурного аспекта определяет общие требования к структуре ОЭ-процессора. Он должен включать минимальное количество элементов (f_{S1}). В соответствии с задачей обработки сигналов таких последовательно соединенных элемента три: оптический вычислитель, выполняющий спектральное преобразование; фотоприемник и цифровой узел (f_{S2}). Последние два элемента выполняют дискретизацию, компенсацию дисперсии и накопление кадров с целью их выделения из-под шума. Здесь же определяются требования к цифровой части: наличие локальной сети (f_{S3}), общего или локального компьютера для каждого процессора (f_{S4}) и др. Критерием эффективности E_{fs1} может быть минимизация f_{S1} при удовлетворении остальных ТЭТ.

Выбор принципов построения

На следующем этапе реализуется отображение S_{Pr}, соответствующее выбору одного из известных принципов построения Pr или синтезу нового принципа. Отображение S_{Pr} имеет область определения на функции выбора функционального аспекта F_{Pr} и множестве универсум структур, при этом учитывается исходная функция выбора $F_{ТЭТ}$. Значение отображения лежит во множестве версий структур $\{K_{Pr}\}$, способных реализовать синтезированный (выбранный) принцип:

$$S_{Pr}: F_{ТЭТ} \cap F_{Pr} \cap Pr \rightarrow K_{Pr}; \quad K_{Pr} = \{ K_{Pri} \}, \; i = 1 \ldots M, \tag{3}$$

где M – число принципов, удовлетворяющих критериям эффективности E_{fPr} для одной из компонент. Известны следующие независимые принципы: последовательный (каскадный), параллельный, иерархический, с обратной связью, квазикаскадный, распределенный и др.

Дополнительно для ОЭ-процессоров на данном этапе решается задача выбора принципа построения оптического узла. Можно выделить

следующие принципы построения оптических вычислителей: с непрерывным введением сигнала (Pr_1); с дискретным введением сигнала (Pr_2); с одним лазером (Pr_3); с вектором (матрицей) лазеров (Pr_4); с динамическим транспарантом (на транспарант, например, на акустооптический (АО) модулятор подается сигнал) (Pr_5); со статической маской (сигнал подается на лазер) (Pr_6) и др. Однако могут возникать практические задачи, не решаемые с помощью известных оптических вычислителей, тогда следует разрабатывать новый принцип построения. Системное проектирование нового вычислителя должно также соответствовать спиралевидной модели.

Для задачи обработки сигналов радиоизлучения пульсаров, как уже было сказано, минимальный набор элементов предполагает включение в ОЭ-процессор трех элементов: оптический вычислитель, фотоприемник (ФП) и цифровой вычислитель. Функция выбора функционального аспекта F_{Pr} определяет уже не вербальные, а числовые требования к принципам построения устройства. Для пульсарного ОЭ-процессора: полоса анализа с учетом частотных характеристик приемного тракта радиотелескопа РТ-64 Δf =100–300 МГц (f_{Pr1}) [4], временное разрешение δt должно позволять получать не мене 100 точек на периоде (f_{Pr2}) радиоизлучения пульсара (15 мкс – 0,1 с), время накопления в зависимости от яркости пульсара должно меняться от 1 мс до 2 ч (f_{Pr3}).

Таким образом, функция выбора принципов построения после лексикографического упорядочивания имеет вид $F(E_f)=E_f(f_1..f_{21}, f_{S1}..f_{S4}, f_{Pr1}...f_{Pr3})$. Указанные параметры F_{Pr} выбора могут потребовать выбрать другие принципы построения. Определим основные из них и укажем особенности, связанные с ОЭ-процессором.

Параллельность (многопоточность). Принцип параллельности (Pr_7) применяется в двух случаях. Во-первых, для увеличения полосы частотного анализа, в этом случае используется несколько параллельно работающих оптических вычислителей (анализаторов спектра), причем оптические вычислители могут быть выполнены как в виде отдельных устройств, так и в едином модуле. Во-вторых, для повышения скорости обработки сигналов с выхода оптического узла. Так, в японском пульсарном ОЭ-процессоре Института связи в Кашиме используется четыре параллельно работающих отдельных оптических вычислителя [6], а в немецком ОЭ-радиометре центра KOSMA четыре канала обработки сигналов находятся в едином оптическом модуле [7].

Параллельно-иерархический принцип (Pr_8). В этом случае используются также несколько параллельно работающих оптических вычислителей, но при этом они используются не для увеличения полосы, а для спектрального анализа выбранного диапазона с разной степенью детализации (частотного разрешения).

Конвейерность является средством обеспечения непрерывности обработки сигналов (Pr_9). Она поддерживается за счет распределенной по узлам последовательной обработки данных (рис. 1).

Конвейер ОЭ-процессоров имеет ряд особенностей по сравнению с конвейером цифровых процессоров [8]. Во-первых, по конвейеру продвигаются не команды, а вектора данных, число элементов в которых задается разрешением в первую очередь оптического узла. Во-вторых, отдельные узлы имеют разное время выполнения операций. В большинстве известных процессоров с АО-узлами входной вектор (матрица) C_i поступает каждые 1 мкс, вектор Q_i из оптического узла появляется через 1 нс, с выхода фотоприемника R_i – через 10 мс, а задержка в цифровом узле определяется выбранным алгоритмом потоковой обработки. В результате частота продвижения данных по конвейеру не выровнена, частоту конвейера задает самое медленное устройство – ФПЗС. В-третьих, схема конвейера может быть более сложной.

Принцип применения ФП для обработки

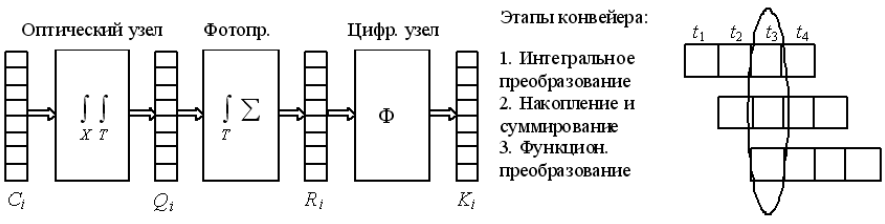


Рис. 1. Схема конвейерного ОЭ-процессора

оптических сигналов ($\mathbf{Pr_{10}}$). В работах [8, 9] предлагается использовать в ОЭ-процессорах возможностей по обработке сигналов в фотоприемниках. КМОП-фотоприемники широко используются для обработки изображений в фотокамерах [10]. Современные фотоприемники на КМОП-матрицах являются практически гибридным процессором, включающим сенсорное поле, набор АЦП и цифровую логику, определяющую тот или иной алгоритм обработки. Фотоприемники на приборах с зарядовой связью (ПЗС-фотоприемники или ФПЗС) также можно рассматривать в качестве процессоров обработки сигналов, алгоритм работы которых легко перестраивать, в отличие от КМОП-фотоприемников. ПЗС-фотоприемники могут выполнять частично другой набор операций, чем КМОП-фотоприемники.

За счет обработки сигналов в ФП можно сжать поток данных, уменьшить время вывода кадров из ФП, тем самым поднять частоту конвейера в ОЭ-процессоре. Так, используя режим временной задержки и накопления, можно на несколько порядков поднять частоту работы конвейера.

Управляемость ($\mathbf{Pr_{11}}$). Данный принцип возникает из необходимости изменения параметров или алгоритмов обработки в зависимости от параметров сигналов и решаемой задачи. Управляемость (реконфигурируемость) можно получить за счет изменения работы оптического узла, в этом случае переключают пути прохождения оптического пучка, состав и параметры элементов. Однако в подавляющем большинстве случаев смену алгоритмов обработки достигают за счет смены режимов работы фотоприемника и программ обработки в цифровом узле.

В рассматриваемом примере пульсарного ОЭ-процессора изменяются параметры обрабатываемых сигналов (для каждого пульсара свой поток радиоизлучения и своя мера дисперсии пульсаров) и переключаются задачи [11]. Управляемость в первом случае достигается за счет изменения частоты работы ФП и смены параметров алгоритма обработки в цифровом узле (ЦУ), а во втором случае – за счет изменения всего алгоритма обработки оптических сигналов как в ФП, так и в цифровом узле.

Можно указать и другие принципы построения, в частности, принцип обратной связи, однако они не являются специфическими для ОЭ-процессоров и не рассматриваются в статье. Некоторые принципы могут возникнуть в процессе проектирования на другом слое спирали, о них будет сказано ниже.

Аппроксимация, создание математической модели

Отображение S_A соответствует этапу создания математической модели компонента для известных из (3) принципов построения. Оно реализуется с помощью известных методов аппроксимации и моделей.

Отображение имеет область определения на множестве значений $K_{\mathrm{Pr}i}$ и функции выбора F_A, задающей характерные точки аппроксимирующей функции для компонента с выбранным принципом построения. В нее же входят критерии оптимальной аппроксимации и физической реализуемости на заданных в ТЭТ ограничениях и элементном базисе. В результате решения задачи $F_A(K_{\mathrm{Pr}i}, E_{fA})$ выделяют из множества K_{Pri} подмножество версий структур K_A, а область значений во множестве функций $D(R)$ и данных для формирования критериев выбора F_m:

$$S_A: K_{\mathrm{Pr}i} \cap F_A \rightarrow D_{\mathrm{Pr}}(R_j); j = 1...J, \qquad (4)$$

где R – вектор сигнала.

Если в базе знаний имеется структура, позволяющая решить задачу (4), то переходят к синтезу параметров S_{Par}. В противном случае переходят к синтезу способов построения.

Модель ОЭ-процессора представлена на рис. 2. Она включает операторы, соответствующие преобразованиям в оптическом узле (АО-анализаторе спектра), в фотоприемнике и цифровом узле. Если в оптическом узле это непрерывное преобразование $F[\ ]$, то в ФП и цифровом узле это дискретные или матричные преобразования.

На первом этапе когерентное излучение $E(t)$ проходит через АО-транспарант: $E(t)s(t–x/v(t))$, где s – входной сигнал; x – координата в плоскости транспаранта; v – скорость волны в звукопроводе АО-модулятора. На выходе оптического узла наблюдается сигнал, близкий к спектру входного сигнала $S(\Omega) = F[s(t)]$. Этот сигнал взвешен аппаратной функцией $h(x,\Omega)$. В плоскости фотоприемника наблюдается сигнал:

$$I(x,t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\Omega,t) \cdot h(x,\Omega)\, d\Omega. \qquad (5)$$

На втором этапе происходит детектирование, дискретизация и интегрирование оптического

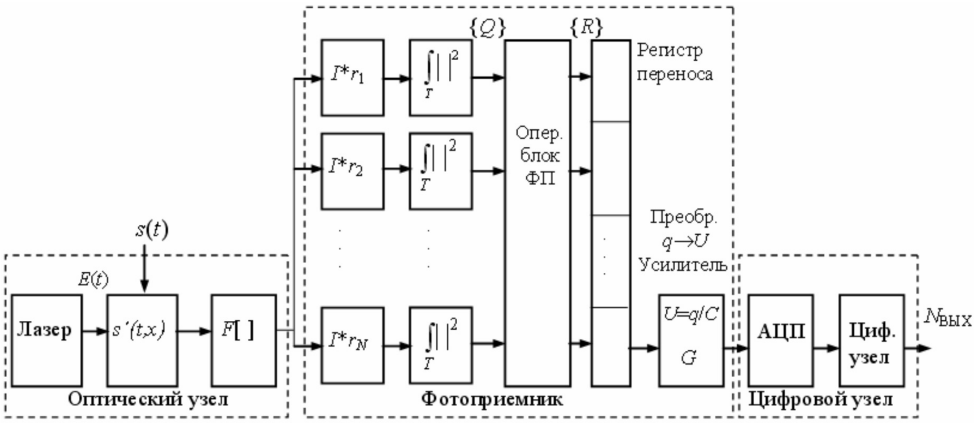


Рис. 2. Модель ОЭ-процессора с ПЗС-фотоприемником

сигнала в элементах ФПЗС; формируется набор элементарных кадров $\{Q\}$:

$$Q_i(n) = \int_0^{T_{\text{int}}} \int_{\Delta x} \left|I(t,x)\right|^2 \cdot r(x_i' - x)\, dxdt, \qquad (6)$$

где $Q_i(n)$ – заряд в i-м элементе ФПЗС в n-й момент времени $\{Q\}=Q_i(n)$; $r(x)$ – апертурная функция элемента.

Третий этап – этап преобразований векторов в операционном блоке ФП $\{Q\} \rightarrow \{R\}$.

Четвертый этап связан с передачей зарядовых пакетов к выходному узлу.

Пятый этап соответствует преобразованию зарядового пакета в цифровой отсчет. Заряд q претерпевает преобразование в выходном узле с емкостью C, усиливается (G – коэффициент усиления) и преобразуется в АЦП. Окончание преобразований связано с обработкой сигнала в цифровом узле $\{R\} \rightarrow \{K\}$.

Описанная модель преобразований соответствует работе ПЗС-фотоприемника. В КМОП-фотоприемнике операционный блок ФП хотя и располагается на кристалле ФП, но в схеме (рис. 3) переносится в цифровой узел ОЭ-процессора. Методы и средства проектирования цифровых устройств можно считать известными [12], поэтому рассмотрим модель преобразования зарядов в операционном блоке ФПЗС.

Модель преобразования зарядовых пакетов в ФПЗС. При разработке ОЭ-процессоров мы вынуждены включить этап проектирования зарядового операционного блока ФПЗС, т. к. он в отличие от цифрового процессора не является универсальным (произвольно программируемым). Каждая модель преобразования матрицы зарядовых пакетов $\{Q\} \rightarrow \{R\}$ требует синтезирования своей схемы операционного блока.

Отображение S_{ACCD} имеет область определения на множестве значений схем операционного блока K_{PriCCD} и функции выбора F_{ACCD}, задающей алгоритм преобразования $\{Q\} \rightarrow \{R\}$:

$$S_{\text{ACCD}}: K_{\text{PriCCD}} \cap F_{\text{ACCD}} \rightarrow (D_{\text{PrCCD}}(Q_i, R_j), F_{m\text{CCD}}). \quad (7)$$

Математическая модель или формализация преобразования (7) определяется набором операций, который выносится на ФП. Первый шаг определения модели – построение графа операций. Основными операциями, которые можно осуществлять в ФПЗС являются:

1) элементарное накопление (накопление кадра массива $\{Q\}$);

2) суммирование кадров во времени (возможно до четырех буферов);

3) объединение зарядов элементов массива;

4) сброс (обнуление) зарядов элементов;

5) перенос кадра в одном или другом направлении на одну или несколько строк;

6) вывод из ФПЗС с аналого-цифровым преобразованием одной или нескольких строк.

Набор операций может расширяться, что связано с разработкой новых ПЗС-структур и освоением соответствующих технологий изготовления.

Приведем пример трех графов операций (рис. 3). Первый граф (*а*) соответствует операциям алгоритма временной задержки и накопления (ВЗН) [10], второй (*б*) – покадрового накопления, которые осуществляются в пульсарном процессоре [8]. Третий граф (*в*) соответствует алгоритму синхронного накопления четных и нечетных кадров, который используется в модуляционных радиометрах [13].

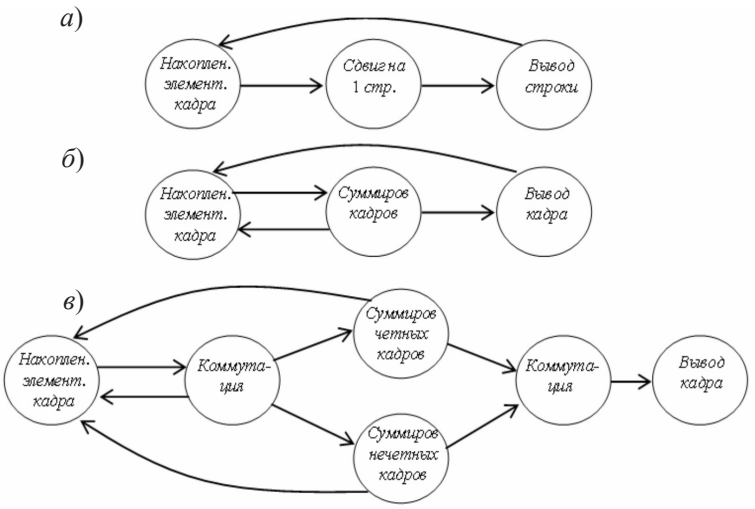


Рис. 3. Графы операций, проводимых в ФПЗС:
а – временной задержки и накопления; *б* – покадрового накопления; *в* – синхронного накопления

В соответствии с графами операций можно построить граф продвижения зарядовых пакетов по элементам ФПЗС. Граф (рис. 4) соответствует операциям алгоритма синхронного накопления (см. рис. 3 *в*). Элементами являются ПЗС-структуры, накапливающие, передающие, коммутирующие, суммирующие зарядовые пакеты. Включение элементов происходит при подаче соответствующих импульсов *T*0–*T*6. Данный граф отражает приблизительно схему операционного блока ФПЗС. Он уже позволяет определить преобразование (7), он же определяет требования к способу построения S_{Res} и синтез структуры S_{App}.

Можно построить целый набор схем, выполняющих алгоритм синхронного накопления. Они будут отличаться набором ПЗС-структур и последовательностью продвижения зарядовых пакетов. Одна из схем описана в работе [13]. Основными критериями эффективности этих схем являются: максимальные скорости обработки (f_{A1}), минимальный набор элементов (f_{A2}), минимальные искажения зарядовых пакетов при переносах (f_{A3}), технологическая реализуемость (f_{A4}).

Для реализации некоторых алгоритмов можно выбрать уже существующие ФП. Так, выпускаются ВЗН-фотоприемники, работающие по алгоритму (см. рис. 3 *а*) [10]. В этом случае выбирается такой ФП.

Выбор способов построения

Оператор синтеза способов построения структур S_{Res} выделяет из множества K_A подкласс $K_{\text{Res}} \subseteq K_A$ структур, соответствующих эффективным способам построения .

$$S_{\text{Res}}: F_{\text{Res}} \cap K_A \cap D(R) \rightarrow K_{\text{Res}}. \qquad (8)$$

Способы соединяют в себе математическую модель (структура коэффициентов и взаимосвязи между ними) и модель наиболее важных фрагментов структуры (описывает веса путей прохождения сигналов, способы перестройки параметров цепей, способы уменьшения постоянных времени, снижающих быстродействие, варианты тестирования). Анализ μ независимых способов и их сочетаний проводится с помощью функций относительной чувствительности и ее инвариантов F_{Res}. На данном этапе формулируются способы, закладывающие базу для эффективного решения

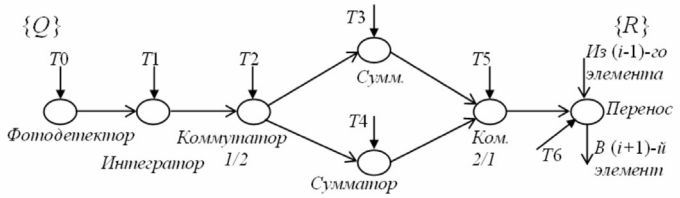


Рис. 4. Граф продвижения зарядовых пакетов по ПЗС-элементам для одного канала операционного блока

задач эксплуатации и технологии, связанных с перестройкой характеристик.

Для ОЭ-процессоров выбор способов построения структур связан с выбором алгоритмов функционирования ФП и ЦУ и с распределением функций между ними. Для ФПЗС алгоритм функционирования определяется временной диаграммой сигналов управления элементами ФП, в примере на рис. 5 – это импульсы *T*0–*T*6. Для цифровой части алгоритм функционирования связан с построением программ. При распределении функций между ФП и ЦУ в первую очередь в качестве критерии выбора рассматриваются временные ограничения.

Рассмотрим вопрос распределения функций между ФП и ЦУ. Максимальные требования к быстродействию ЦУ возникают при отсутствии зарядовой обработки в ФП. В этом случае элементарные кадры $\{Q\}$ регулярно считываются с ФП, а вся многоуровневая обработка проходит в ЦУ и требование к тактовой частоте $f_{\text{Т_ПРОЦ}}$ цифрового процессора определяется в виде

$$f_{\text{Т_ПРОЦ}} \geq f_{\text{Т_ФП}}(N_{\text{УПР}} + m \cdot N_{\text{ВВ}} + \\ + \sum_i N_{\text{АЛГ1_}i} + N_{\text{АЛГ2}}), \quad (9)$$

где N – количество тактов процессора, затраченных на управление, ввод отсчетов, обработку по алгоритмам разных уровней.

Обычно быстродействия цифрового процессора недостаточно. Так, в пульсарном ОЭ-процессоре элементарные кадры нужно считывать с периодом 1–10 мкс, поэтому тактовая частота $f_{\text{Т_ПРОЦ}}$ цифрового процессора должна превосходить 10^{10} Гц.

Преодоление указанной сложности лежит в двух направлениях: применение обработки в ФП и использование параллельно работающих каналов цифровой обработки. Любая обработка в ФП снижает поток данных в ЦУ, и, следовательно, требования к $f_{\text{Т_ПРОЦ}}$. Требование обработки в ФП связано со специальным управлением ФП и вызывает необходимость создания ПЗС-контроллера, который бы работал по программе, формируя необходимую временную диаграмму сигналов управления *T*0–*T*6.

На этом же уровне проектирования выбираются способы калибровки параметров. Калибровка – обязательный элемент большинства ОЭ-процессоров, т. к. параметры оптического вычислителя изменяются (плавают) во времени. В работе [11] описан метод калибровки частотной шкалы пульсарного ОЭ-процессора. Он сводится к переключению входного сигнала, к смене алгоритмов зарядовой обработки в ФПЗС и в ЦУ. Преобразование в оптическом узле не меняется. Применение калибровки заключается в регулярном переключении временной диаграммы сигналов управления ФПЗС (переключение с графа рис. 3 *а* на граф рис. 3 *б*) и смене программы обработки в ЦУ.

Этап синтеза структуры

После завершения формирования функции выбора F_{App} переходят к синтезу структуры. Выполнение этого отображения порождает множество эквивалентных, с точки зрения области значений S_{App}, структур $K_p = \{K_{p1}, K_{p2}, ..., K_{pl}\}$

$$S_{\text{App}}: F_{\text{App}} \cap D(R) \cap K_{\text{Res}} \rightarrow K_p. \quad (10)$$

Для ОЭ-процессоров синтез структуры сводится к созданию схемы ПЗС-фотоприемника со своим операционным блоком и к разработке схемы и программ функционирования цифрового узла. Схем ФПЗС, работающих в соответствии с графами, изображенными на рис. 3 и 4, может быть несколько. Они отличаются реализацией сумматоров, коммутаторов, узлов вывода и др. Одна из возможных схем линейного ФПЗС, работающего по алгоритмам, показанным на рис. 3 *а*, *б*, включает два ПЗС-регистра и электроды управления (рис. 5). В ПЗС-регистре 1 накапливается элементарный кадр, а ПЗС-регистр 2 служит для суммирования элементарных кадров и вывода зарядовых пакетов из фотоприемника. Основные критерии эффективности схем: высокий (до 90 %) коэффициент заполняемости сенсорного поля (f_{App1}), минимальные (менее 100 нс) задержки при передаче (f_{App2}), минимальные (менее 10 электронов) шумы считывания (f_{App3}) [10].

Проектирование структуры цифрового узла сводится к выбору базовых узлов обработки. Выделим два всегда необходимых блока – это ПЗС-контроллер и два модуля буферной памяти размером на один кадр каждая. ПЗС-контроллер формирует сигналы управления ФП в соответствии с выбранным способом. Буферная память обеспечивает непрерывность потока обрабатываемых данных: пока обрабатывается текущий кадр из фотоприемника считывается следующий. Для реализации указанных цифровых узлов имеется большой набор вариантов, начиная от использования одного сигнального процессора [5], до

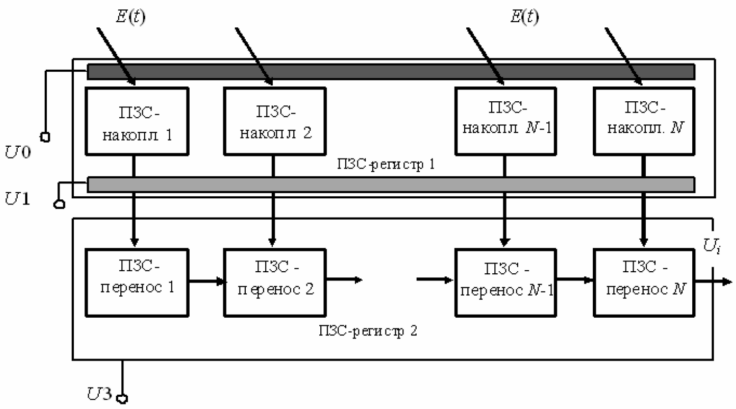


Рис. 5. Схема двухрегистрового ФПЗС

набора модулей, каждый из которых выполняет свою операцию [14]. Выбор из предложенных вариантов связан не только с требованием быстродействия, но и с выбором уровня аппаратно-программного решения ЦУ.

Этапы определения параметров и допусков на них

Множество K_P совместно с функцией выбора F_{Par} является областью определения отображения S_{Par}, имеющего область значений во множестве структур с оптимальными параметрами X^*

$$S_{\text{Par}}: K_P \cap F_{\text{Par}} \rightarrow K_P(X^*). \qquad (11)$$

Завершает проектирование структурного аспекта исследование чувствительности характеристик к вариациям параметров элементов, которые наряду с точностными, стоимостными и эксплуатационными факторами формируют критерии выбора для этапа определения допусков d^*_Σ на параметры X^* элементов. Этап описывается отображением S_{Tol}, имеющим область определения на множестве $K^*_p(X^*)$ эффективных структур с оптимальными параметрами элементов, а область значений во множестве эффективных структур $K^*_p(X^*, d^*_\Sigma)$ с оптимальным допуском d^*_Σ:

$$S_{\text{Tol}}: K^*_P \cap F_{\text{Tol}} \rightarrow (K^*_P(X^*, d^*_\Sigma)). \qquad (12)$$

Для ОЭ-процессоров имеется ряд особенностей проектирования на этих этапах. Они, прежде всего, связаны с функционированием оптического вычислителя. Основные параметры – полоса частотного анализа и частотное разрешение (для пульсарного процессора – временное разрешение) задаются характеристиками АО-модулятора и настройкой узлов оптического вычислителя. Задание этих параметров производится путем последовательного выбора АО-модуляторов и настройки процессора. Экспериментальная настройка и тестирование являются элементом в процессе синтезирования параметров.

Допуски на точность измерения частоты $d^*_{\Sigma_f}$ входного сигнала определяются допусками на изменения (по полю ФП и во времени) аппаратной функции и частотной шкалы процессора. Допуски на точность измерения амплитуды $d^*_{\Sigma_A}$ входного сигнала связаны со стабильностью лазерного излучения. В работах [14, 15] описаны методы измерения, позволяющие оценить долговременную стабильность указанных параметров. В работе [11] предложен метод калибровки частотной шкалы ОЭ-процессора, позволяющий на порядок повысить точность временной привязки профиля радиоизлучения пульсаров.

В данной статье описана методология системного проектирования применительно к ОЭ-процессорам. В качестве элементного базиса выбраны аналоговый оптический вычислитель, многоэлементный фотоприемник и цифровой вычислитель. Разработаны модель и способы применения ПЗС-фотоприемника для обработки сигналов. Представленная методология позволяет пройти этапы проектирования от формулировки ТЭТ до реализации ОЭ-процессора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лыпарь, Ю.И.** Структурный синтез интеллектуальных блоков на примере передатчика дифференциальных сигналов стандарта LVDS [Текст] / Ю.И. Лыпарь, Н.Н. Балтруков, А.Н. Скворцов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 6.1 (138)

2. **Лыпарь, Ю.И.** Теория системно-структурного проектирования – основа интеллектуализации разра-

ботки моделей и систем поддержки принятия решений [Текст] / Ю.И. Лыпарь, И.А. Кацко, Г.Ф. Бершицкая. –Краснодар: Изд-во КГАУ. –2010. –44 с.

3. **Загоруйко, Н.Г.** Проблема выбора в задачах анализа данных и управления [Текст] / Н.Г. Загоруйко, Г.С. Лбов // Сиб. журн. индустр. матем. –2000. –Т. 3. –№1. –С. 101–109.

4. **Манчестер, Р.** Пульсары [Текст] / Р. Манчестер, Дж.Тейлор. –М.: Мир, 1980. –315 с.

5. **Есепкина, Н.А.** Акустооптический компенсатор дисперсии для наблюдения радиоизлучения пульсаров [Текст] / Н.А. Есепкина, А.П. Лавров, С.А. Молодяков // Антенны. –2006. –№ 7. –С. 69–76.

6. **Hanado, Y.** Millisecond Pulsar Observation System Using Acousto-Optic Spectrometer [Text] / Y. Hanado, M. Imae, M. Sekido // IEEE Trans. On Instrum. and Measurement. –1995. –Vol. 44. –№ 2. –P. 107–109.

7. **Horn, J.** A 4 x 1 GHz Array Acousto-Optical Spectrometer [Text] / J. Horn, O. Siebertz, F. Schmfulling [et al.] // Experimental Astronomy. –1999. –Vol. 9. –№ 1. –P. 17–38.

8. **Молодяков, С.А.** Оптоэлектронные процессоры с ПЗС-фотоприемниками. Конвейерная обработка сигналов [Текст] / С.А. Молодяков // Информационно-управляющие системы. –2008. –№ 6. –С. 2–8.

9. **Есепкина, Н.А.** Рассмотрение ПЗС-фотоприемника в качестве аналогового процессора [Текст] / Н.А. Есепкина, С.А. Молодяков // Сб. науч. тр. Вычислительные, измерительные и управляющие системы. –СПб.: Изд-во СПбГПУ. –1998. –С. 50–54.

10. **Holst, G.C.** CMOS/CCD Sensors and Camera Systems [Text] / G.C. Holst, T.S. Lomheim. –SPIE Press, 2007. –376 p.

11. **Esepkina, N.A.** Acoustooptical pulsar processor: application of frequency scale calibration [Text] / N.A. Esepkina, A.P. Lavrov, S.A. Molodyakov [et al.] // Proc. SPIE. –2007. –Vol. 6594. –9 p.

12. **Угрюмов, Е.П.** Цифровая схемотехника [Текст] / Е.П. Угрюмов. –СПб.: БХВ, 2010. –798 с.

13. **Есепкина, Н.А.** Организация синхронного накопления на матричном ПЗС-фотоприемнике в модуляционном спектрометре [Текст] / Н.А. Есепкина, С.А. Молодяков, И.И. Саенко // Письма в ЖТФ. –1986. –Т. 12. –№ 2. –С. 118–123.

14. **Esepkina, N.A.** Acoustooptical pulsar processor for radioastronomy [Text] / N.A. Esepkina, F.P. Lavrov, S.A. Molodyakov // Proc. SPIE. –2004. –Vol. 5381. –P. 258–265.

15. **Ivanov, S.I.** Acousto-optical spectrometers' frequency performance stability [Text] / S.I. Ivanov, A.P. Lavrov, S.A. Molodyakov, I.I. Saenko // Proc. SPIE. – 2004. –Vol. 5381. –P. 253–257.

УДК 517.958:532.5

Д.Х. Нгуен, В.Н. Козлов, А.Н. Фирсов

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ УПРАВЛЕНИИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПО СИСТЕМЕ ТРУБОПРОВОДОВ

В статье дается аналитическое решение задачи о нестационарной транспортировке вязкой жидкости по системе трубопроводов при умеренных скоростях движения и при наличии регулирующих устройств (регуляторы расхода и давления, насосных и компрессорных стаций) с нестационарным режимом работы в начале трубопроводной системы и в узлах ветвления труб. За основу моделирования процесса берется уравнение движения капельной жидкости в длинных трубопроводах, иными словами, – аппроксимируемое уравнение Навье–Стокса для одномерного движения жидкости при условиях, предполагающих ламинарный режим движения жидкости, с нестационарными граничными условиями на концах элементов трубопровода.

Рассматривается система трубопродов для транспортировки вязких жидкостей (в частности, нефти), содержащая последовательности и разветвления труб (рис. 1). Жидкость предполагается вязкой и слабо сжимаемой ($\rho \approx \text{const}$), а движение жидкости по системе трубопроводов происходит в изотермическом режиме.

Для построения математической модели гидродинамики течения жидкости в системе разделим исходную систему на элементарные линейные участки трубопроводов и запишем систему уравнений динамики жидкости для каждого линейного участка, при этом для простоты пренебрежем потерями в точках соеденений между элементами

системы (между трубами или между трубой и насосом). Можно рассматривать давления и расходы на выходе одного элемента в качестве входных давления и расхода для следующего элемента. В точках соединения трех или более труб, на входах и выходах элементов должен выполняться закон сохранения массы. На практике, при исследовании гидродинамики в системе трубопроводов, как правило, применяется одномерный способ описания процессов перекачки жидкости, при этом предполагается, что труба имеет форму круглого цилиндра и постоянную по длине толщину стенок, стенки трубы будем считать упругими; течение в трубе предполагается осесимметричным, сдвиговая вязкость жидкости считается постоянной; объемную вязкость жидкости можно не учитывать; кроме того, при перекачке жидкости по системе трубопроводов скорость движения жидкости можно считать малой в сравнении со скоростью звука в жидкости. Для осесимметричного движения жидкости уравнения Навье–Стокса в цилиндрических координатах x, r, θ записываются следующим образом [1, с. 78]:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left[\frac{4}{3}\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{1}{3}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r}\right)\right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_x \frac{\partial u_r}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} + \nu\left[\frac{4}{3}\frac{\partial^2 u_r}{\partial x^2} + \frac{4}{3}\frac{\partial u_r}{r\partial r} - \frac{4}{3}\frac{u_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{3}\frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{x}\right)\right], \quad (2)$$

где u_x и u_r – проекции скорости соответственно на ось Ox, совпадающую с осью трубы, и ось Or, направленную по радиусу сечения трубы; ν – кинематическая вязкость жидкости, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$; μ – динамическая вязкость жидкости; ρ – плотность жидкости.

Уравнение неразрывности в этом случае имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho\frac{\partial u_r}{\partial r} + \rho\frac{u_r}{r} + \rho\frac{\partial u_x}{\partial x} + u_r\frac{\partial \rho}{\partial r} + u_x\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Уравнения (1)–(2) достаточно громоздкие, для упрощения проведем оценку их членов, выбрав следующие масштабы:

масштаб по длине трубы $x = ct$, $dx = cdt$;

средняя по сечению потока скорость $\overline{u}$.

Предположим далее, что течение жидкости происходит только в направлении оси трубы (точнее, $u_x \gg u_r$); отношение между радиусом и длиной трубы $\frac{r_0}{l} = k \ll 1$; изменением плотности жидкости в процессе движения пренебрегаем, т. е. $\rho \approx \rho_0 = \text{const}$, где r_0 – радиус трубы; l – длина трубы.

При выбранных масштабах и предположениях можно провести анализ и сравнение членов в уравнениях (1)–(3):

при $\overline{u} \ll c$, $dx = cdt$ вторым и третьим членами в левой части уравнения (1) можно пренебречь, т. к. они достаточно малы в сравнении с первом членом;

при $k \ll 1$ и $\overline{u} \ll c$, $dx = cdt$ членом $\frac{4}{3}\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}$ в правой части уравнения можно пренебречь в сравнении с другими членами;

при $u_x \gg u_r$ уравнение (2) можно исключить целиком, принимая при этом одинаковое давление во всех точках поперечного сечения трубы;

при $\overline{u} \ll c$, $k \ll 1$, $dx = cdt$ пятым и шестым членами уравнения (3) можно пренебречь в сравнении с другими членами.

Умножим все члены полученных приближенных уравнений (1), (3) на $2\pi r dr$ и проинтегрируем их в пределах от нуля до r_0 с учетом следующих соотношений:

- массовый расход $\rho\int_0^{r_0} 2\pi r u_x dr = \rho\pi r_0^2 v = \rho S v = q$,

$S = \pi r_0^2$ – площадь поперечного сечения трубы;

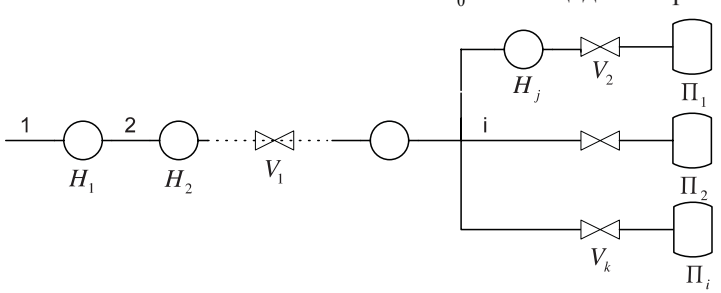


Рис. 1. Система трубопроводов

i – *i*-я труба; H_j – *j*-й насос; V_k – *k*-й клапан; Π_i – *i*-й потребитель

- $\int_0^{r_0} 2\pi r p dr = \pi r_0^2 p$;
- $\int_0^{r_0} 2\pi r \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_x}{\partial r} \right) dr = 2\pi r_0 \left(\frac{\partial u_x}{\partial r} \right)\Big|_{r=r_0}$;
- $\int_0^{r_0} 2\pi r \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \right) dr = 2\pi r_0 u_r\big|_{r=r_0}$.

В итоге получим следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -S\frac{\partial}{\partial x}\left(p - \frac{2\rho\nu u\big|_{r=r_0}}{3r_0} \right) + \frac{2S\rho\nu}{r_0}\left(\frac{\partial u_x}{\partial r} \right)\Big|_{r=r_0}, \quad (4)$$

$$S\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho S\frac{2u_r\big|_{r=r_0}}{r_0} + \frac{\partial q}{\partial x}. \quad (5)$$

С учетом упругости стенки трубы радиус r_0 трубы является функцией от времени $r_0 = r_0(t)$, при этом величина $u_r\big|_{r=r_0}$ определяется соотношением:

$$u_r\big|_{r=r_0} = \frac{\partial r_0}{\partial t}. \quad (6)$$

Если не учитывать инерцию стенки трубы и считать деформацию сечения трубы малой, то изменение радиуса можно принять [1, с. 80]:

$$u_r\big|_{r=r_0} = \frac{\partial r_0}{\partial t} = \frac{r_0}{E_{ст}}\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{r_0}{E_{ст}}\frac{r_0}{\delta}\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{r_0^2}{\delta E_{ст}}\frac{\partial p}{\partial t}, \quad (7)$$

где σ – напряжение в стенке трубы; $E_{ст}$ – модуль упругости материала стенки трубы; δ – толщина трубы.

Принимая масштаб времени $t = \frac{l}{c}$, значения $\frac{2\rho\bar{u}\,u_r\big|_{r=r_0}}{3r_0} = \frac{2\rho\bar{u}r_0}{3\delta E_{ст}}\frac{\partial p}{\partial t} \sim \frac{2\rho\bar{u}r_0 c}{3\delta E_{ст} l}p \ll p$ (при нормальных условиях), видим, что можно пренебречь вторым членом в скобках в уравнении (4).

Воспользуемся далее законом трения для вязкой жидкости Ньютона, касательное напряжение τ_{0H} на стенке трубы вычисляется по формуле [3, с. 69]:

$$\tau_{0H} = -\mu\left(\frac{\partial u_x}{\partial r} \right)\Big|_{r=r_0}. \quad (8)$$

С другой стороны (см. [1, с. 83]):

$$\tau_{0H} = \frac{4\mu}{r_0}\bar{u} + \frac{2\mu}{r_0^2}\int_0^t \frac{\partial u_x}{\partial \tau} f(t-\tau)d\tau. \quad (9)$$

В [2, с. 257] рекомендовано использовать приближенную формулу для подынтегральной функции $f(t)$:

$$f(\bar{t}) = \begin{cases} e^{-26,3744\bar{t}} + e^{-70,8493\bar{t}} + e^{-135,0198\bar{t}} + e^{-218,9216\bar{t}} + e^{-322,5544\bar{t}} & \text{для } \bar{t} \ge 0,02 \\ 0,2821\bar{t}^{-1/2} - 1,25 + 1,0578\bar{t}^{1/2} + 0,9375\bar{t} + 0,3967\bar{t}^{3/2} - 0,3516\bar{t}^{2} \end{cases} \quad (10)$$

для $\bar{t} < 0,02$, где $\bar{t} = \frac{\nu t}{r_0^2}$ – безразмерное время.

Уравнение (4) можно переписать следующим образом:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + S\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{8S\mu}{r_0^2}\bar{u} + \frac{4S\mu}{r_0^2}\int_0^t \frac{\partial u_x}{\partial \tau} f(t-\tau)d\tau = 0$$

или

$$\frac{\partial q}{\partial t} + S\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{8q\mu}{\rho_0 r_0^2} + \frac{4\mu}{\rho_0 r_0^2}\int_0^t \frac{\partial q}{\partial \tau} f(t-\tau)d\tau = 0. \quad (11)$$

Согласно [4, с. 20], $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ можно вычислить по формуле $\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\rho_0}{K_ж}\frac{\partial p}{\partial t}$, где $K_ж$ – модуль объемного сжатия жидкости. Следовательно, уравнение (5) имеет вид:

$$\frac{S\rho_0 . \partial p}{K_ж \partial t} = -S\frac{2\rho_0 r_0}{\delta E_{ст}}\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x}.$$

Пусть $K = \frac{K_ж}{1 + \frac{2r_0 K_ж}{\delta E_{ст}}}$ – приведенный модуль упругости жидкости [3, с. 209]. Тогда, с учетом скорости звука в жидкости, текущей по упругой трубе, равной $c = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}}$, получаем из (12):

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{S}{c^2}\frac{\partial p}{\partial t} = 0. \quad (13)$$

Итак, система уравнений (11) и (13) описывает динамику течения жидкости в одной трубе. На практике с достаточной точностью можно принять квазистационарную модель трения жидкости о стенку трубы, т. е. считать, что $\left|\frac{\partial u_x}{\partial \tau}\right| \ll 1$. Тогда можно пренебречь четвертым членом в уравнении (11). Таким образом, получим линейную модель движения жидкости в трубе. Для каждой *i*-й трубы в системе имеем уравнения для массового расхода и давления:

$$\frac{\partial q_i}{\partial x} + \frac{S_i}{c^2}\frac{\partial p_i}{\partial t} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial x} + \frac{1}{S_i}\left(\frac{\partial q_i}{\partial t} + 2a_i q_i \right) = 0, \quad (15)$$

где p_i – давление жидкости в i-й трубе; q_i – массовый расход в i-й трубе; величину $2a_i = \dfrac{8\mu}{\rho_0 r_i^2}$ назовем *коэффициентом затухания i-й трубы*.

Для корректного решения системы уравнений (14)–(15) каждому линейному участку необходимо задать начальные и граничные условия.

Для задания граничных условий предположим, что в начале работы (при $t = t_0 = 0$) система трубопроводов работает в стационарном режиме, т. е. давления и скорости жидкости в трубопроводах не зависят от времени. Начальные давления и жидкости в i-й трубе обозначим соответственно через $p_{i0}(x, 0)$, $q_{i0}(x, 0)$:

$$q_{i0} = q_{i0}(x,0) = \text{const}, \qquad p_{i0} = p_i(x,0) = p_i(0,0) - \frac{2a_i}{S_i} q_{i0} x. \tag{16}$$

Неустановившийся режим возникает благодаря возмущениям начальных данных (16). Предположим что, при $t > 0$ давление и скорость неустановившегося движения жидкости можно разбить на две части: первая часть – это давление и скорость установившегося движения, а вторая часть рассматривается как возмущения этих значений, т. е. положим:

$$q_i(x,t) = q_{i0} + q_i^*(x,t), \qquad p_i(x,t) = p_{i0} + p_i^*(x,t), \tag{17}$$

где $q_i^*(x,t)$, $p_i^*(x,t)$ – возмущения скорости и давления.

С учетом этого предположения, подставляя (17) в (14) и (15), получим формулировку задачи в переменных $q_i^*(x,t)$ и $p_i^*(x,t)$:

$$\frac{\partial q_i^*}{\partial x} + \frac{S_i}{c^2}\frac{\partial p_i^*}{\partial t} = 0, \; t > 0, \tag{18}$$

$$\frac{\partial p_i^*}{\partial x} + \frac{1}{S_i}\left(\frac{\partial q_i^*}{\partial t} + 2a_i q_i^*\right) = 0, \; t > 0, \tag{19}$$

$$q_i^*(x,0) = 0, \; p_i^*(x,0) = 0. \tag{20}$$

Далее, для упрощения обозначений будем использовать в уравнениях (18)–(20) p_i и q_i вместо p_i^*, q_i^*. Таким образом, получим:

$$A_i \frac{\partial q_i}{\partial x} + \frac{\partial p_i}{\partial t} = 0, \tag{21}$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial x} + B_i \frac{\partial q_i}{\partial t} + C_i q_i = 0, \tag{22}$$

$$q_i(x,0) = 0, \; p_i(x,0) = 0. \tag{23}$$

Здесь $A_i = \dfrac{c^2}{S_i}$, $B_i = \dfrac{1}{S_i}$, $C_i = \dfrac{2a}{S_i}$.

Для системы трубопроводов управление регуляторами расходов и давлений или насосных и компрессорных станций моделируется через задание соответствующих граничных условий.

Ограничимся рассмотрением следующих вариантов линейных граничных условий:

$$p_i(0,t) = \varphi_{i1}(t); \; q_i(l_i,t) = \psi_{i1}(t), \tag{24.1}$$

$$p_i(0,t) = \varphi_{i1}(t); \; p_i(l_i,t) = \varphi_{i2}(t), \tag{24.2}$$

$$q_i(0,t) = \psi_{i1}(t); \; q_i(l_i,t) = \psi_{i2}(t), \tag{24.3}$$

$$q_i(0,t) = \psi_{i1}(t); \; p_i(l_i,t) = \varphi_{i2}(t), \tag{24.4}$$

$$p_i(0,t) = \varphi_{i1}(t); \; q_i(0,t) = \psi_{i1}(t), \tag{24.5}$$

$$p_i(l_i,t) = \varphi_{i2}(t); \; q_i(l_i,t) = \psi_{i2}(t), \tag{24.6}$$

где l_i – длина i-й трубы.

Комбинация начальных условий (23) и любого из соотношений (24.1)–(24.4) дает нам начально-краевую задачу для системы (21)–(22). В сочетании с условием [24.5] или [24.6] получим линейную задачу Коши при $x = 0$ и $x = l$.

Условия сопряжения давлений и расходов в узлах имеют вид:

$$p_{i-1}(l_i,t) = p_i(0,t) \text{ – давление в сечении соединения двух труб,} \tag{25}$$

$$p_{i-1}(l_i,t) = p_{Hj}^{\text{вх}}, \; p_i(0,t) = p_{Hj}^{\text{вых}} \text{ – давление создается насосом,} \tag{26}$$

$$\sum_{i \in C_{\text{вх}j}} q_i = \sum_{i \in C_{\text{вых}j}} q_i \text{ – закон сохранения масс в точке разветвления,} \tag{27}$$

где $C_{\text{вх}j}$ – множество индексов i труб, по которым жидкость попадает в j-й узел; $C_{\text{вых}j}$ – множество индексов i труб, в которые жидкость попадает из j-го узла.

Для решения системы уравнений (21)–(22), при условиях (23)–(27), воспользуемся преобразованием Лапласа по переменной t. Тогда получим:

$$sP_i(x,s) + A_i \frac{\partial Q_i(x,s)}{\partial x} = 0, \tag{28}$$

$$\frac{\partial P_i(x,s)}{\partial x} + (sB_i + C_i) Q_i(x,s) = 0, \tag{29}$$

где $P_i(x, s)$, $Q_i(x, s)$ – изображения соответственно $p_i(x, t)$ и $q_i(x, t)$.

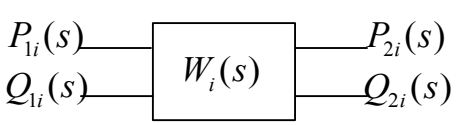


Рис. 2. Математическое представление i-го участка трубы

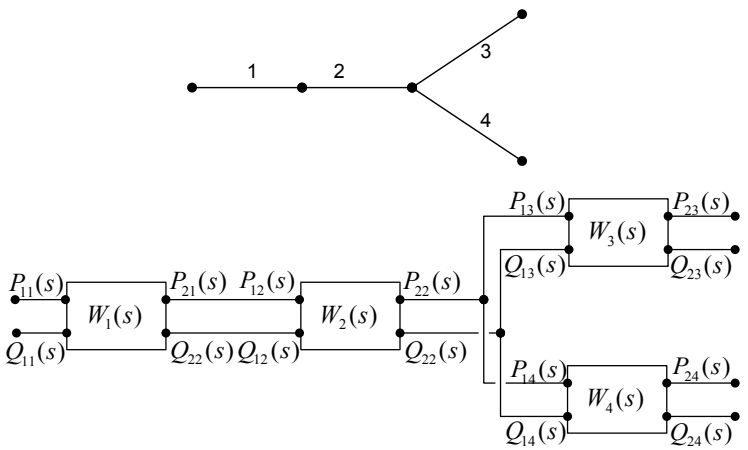


Рис. 3. Представление системы трубопроводов из четырех труб

Решения системы (21)–(22) имеют вид:

$$P_i(x,s) = \alpha_i e^{\lambda_i x} + \beta_i e^{-\lambda_i x}, \quad (30)$$

$$Q_i(x,s) = -\frac{1}{Z_i(s)}(\alpha_i e^{\lambda x} - \beta_i e^{-\lambda x}), \quad (31)$$

где $Z_i(s) = -\frac{A_i\lambda_i}{s}$, $\lambda^2 = \frac{s(sB_i + C_i)}{A_i}$ – величину λ назовем *оперативным коэффициентом распространения возмущений*.

Постоянные α_i, β_i определяются из граничных условий (24.1)–(24.6).

После подстановки граничного условия (24.5) в (30) и (31), получим:

$$P_{0i} = P_i(0,s) = \alpha_i + \beta_i; \quad (32)$$

$$Q_{0i} = Q_i(0,s) = \frac{-1}{Z_i(s)}(\alpha_i - \beta_i). \quad (33)$$

Решая систему (32)–(33), получим:

$$\alpha_i = \frac{P_{0i} - Z_i(s)Q_{0i}}{2}, \ \beta_i = \frac{P_{0i} + Z_i(s)Q_{0i}}{2}, \quad (34)$$

$$P_i(x,s) = \frac{P_{0i} - Z_i(s)Q_{0i}}{2}e^{\lambda_i x} + \frac{P_{0i} + Z_i(s)Q_{0i}}{2}e^{-\lambda_i x}, \quad (35)$$

$$Q_i(x,s) = -\frac{1}{Z_i(s)}\times \times\left(\frac{P_{0i} - Z_iQ_{0i}}{2}e^{\lambda_i x} - \frac{U_0 + ZI_0}{2}e^{-\lambda_i x}\right). \quad (36)$$

Систему (30)–(31) можно записать в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} P_i(x,s) \\ Q_i(x,s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch\lambda_i x & -Z_i(s)sh\lambda_i x \\ -sh\lambda_i x & ch\lambda_i x \end{pmatrix}\begin{pmatrix} P_{0i} \\ Q_{0i} \end{pmatrix}. \quad (37)$$

Формула (37) позволяет определить $P_i(x, s)$, $Q_i(x, s)$ как функцию от входных параметров P_{0i}, Q_{0i}. Матрицу $W_i(s) = \begin{pmatrix} ch\lambda_i x & -Z_i(s)sh\lambda_i x \\ -sh\lambda_i x & ch\lambda_i x \end{pmatrix}$ можно рассматривать как переходную матрицу для системы (21)–(22) при граничных условиях (24.5).

При других граничных условиях получим другие переходные матрицы, позволяющие определить зависимость неизвестных значений $P_i(x, s)$ и $Q_i(x, s)$ от граничных условий. Следовательно, каждый линейный участок системы трубопроводов можно представить в виде четырехполюсника (рис. 2). На этом рисунке обозначено: $P_{1i}(s) = P_i(0,s)$, $Q_{1i}(s) = Q_i(0,s)$, $P_{2i}(s) = P_i(l_i,s)$, $Q_{2i}(s) = Q_i(l_1,s)$.

В таком представлении сложная система трубопроводов может быть изображена графом и четырехполюсниками (рис. 3).

Переход от найденных изображений $P_i(x, s)$ и $Q_i(x, s)$ к их оригиналам $p_i(x, t)$, $q_i(x, t)$ позволяет получить значения расходов и давлений в каждый момент времени в каждой точке каждой трубы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Попов, Д.Н.** Нестационарные гидромеханические процессы [Текст] / Д.Н. Попов. –М.: Машиностроение, 1982.

2. **Чарный, И.А.** Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах [Текст] / И.А. Чарный. –М.: Недра, 1982.

3. **Басниев, К.С.** Нефтегазовая гидродинамика [Текст] / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Г.Д. Розенберг. –М.: Ижевск, 2005.

4. **Гусейнзаде, М.А.** Неустановившееся движения нефти и газа в магистральных трубопроводах [Текст] / М.А. Гусейнзаде, В.А. Юфин. –М.: Недра, 1981.

УДК 004.5:004.738.52:51-78

А.Н. Кузнецов, Е.В. Пышкин

АЛГОРИТМ СРАВНЕНИЯ НОТНЫХ ФРАГМЕНТОВ ПРИ ПОИСКЕ МУЗЫКАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ОБРАЗЦУ МЕЛОДИИ

Интернет предоставляет своим пользователям намного больше возможностей, чем просто просмотр текста на web-страницах. Текущая спецификация HTML5 предусматривает различные средства внедрения мультимедийных и интерактивных элементов. Однако поиск информации по-прежнему осуществляется поисковыми машинами, ориентированными на поиск по ключевым словам. Это приводит к тому, что некоторые ресурсы в Интернете найти практически невозможно. К таким ресурсам можно отнести аудиозаписи, видеоролики, изображения и другие мультимедийные объекты, не содержащие в себе текстовой информации. Несмотря на то, что обычно такие ресурсы сопровождаются текстовыми аннотациями, содержащими информацию об авторе, названии, жанре и т. п., найти ресурс именно по его содержимому (например, напев мелодию или описав, что изображено на картинке), крайне затруднительно.

Описанные трудности обусловлены, в первую очередь, тем, что бинарный формат мультимедийных данных не допускает погрешностей интерпретации, а естественный язык (на котором осуществляется запрос) не позволяет точно описать искомый объект. Свой вклад вносит и память человека, являющаяся источником образов для поиска. Высокочастотная информация запоминается намного хуже, чем низкочастотная, например, легко запомнить оттенок своего письменного стола и его форму, сложнее запомнить узор и крупные сколы или царапины, если они есть, и крайне сложно запомнить расположение мелких царапин и прочих дефектов.

Невозможность прямого сравнения содержимого бинарного файла с пользовательским запросом вынуждает разработчиков поисковых систем извлекать из бинарного файла метаданные и производить поиск по этим метаданным. В данной ситуации существенным является способ извлечения метаданных: ручной, автоматизированный или автоматический. Автоматический способ извлечения наиболее сложный, поскольку связан с проблемой распознавания образов; ручной – наиболее медленный. Перспективным представляется решение, которое сможет повторно использовать огромный объем данных, обработанных ранее (в т. ч. вручную) пользователями различных сервисов. Поясним последнее утверждение на примере музыки.

Музыка занимает особое место в многообразии мультимедийного содержимого. В отличие от других видов искусства, в музыке изначально предполагается, что композитором и исполнителем могут быть разные люди, а значит, необходим формальный язык передачи музыкальной информации от композитора к исполнителю – таким языком и являются ноты. Этот факт может быть использован при поиске следующим образом. Музыка обычно хранится в каком-либо популярном аудио-формате (например, mp3, wma и т. п.). На сайтах, где размещаются музыкальные записи, также хранится имя исполнителя, название композиции, альбома, жанр. Заметим, что любители музыки часто перекладывают сочинения любимых авторов в ноты, сопровождая их теми же аннотациями. В результате мы получаем возможность работать не с бинарными музыкальными файлами, а с нотным текстом – формальным представлением содержимого бинарного файла. Составив метаданные на основе нотной записи, мы обеспечиваем другим пользователям возможность поиска композиций не по названию, а по ее содержимому.

Предмет исследования данной статьи – методы и алгоритмы сравнения музыкальных фрагментов, а также поиск музыки как таковой.

Поиск музыки: проблемы и подходы

Рассмотрим основные сценарии поиска музыки.

Сценарий 1: «Я помню автора/название/альбом». Данный сценарий описывает ситуацию, когда пользователю известны частичные сопроводительные данные к композиции. В этом случае сложностей при поиске практически не возникает, т. к. практически любой Интернет-магазин, специализирующийся на музыке, имеет функцию предпрослушивания с возможностью поиска по автору или названию композиции.

Сценарий 2: «Я помню слова». Если речь идет о песне, и пользователь знает некоторые слова, то задача сводится к текстовому поиску, обеспечиваемому любой поисковой машиной.

Сценарий 3: «У меня есть записанный фрагмент». Нередки случаи, когда у пользователя есть фрагмент записи (с концерта, радиотрансляции или из телевизионной передачи), при этом сопроводительных данных к композиции нет. В подобной ситуации можно рассматривать два основных решения. Во-первых, пользователь может воспользоваться помощью других людей, например, поместив отрывок на тематических форумах (таких, как feelbeat.my.ru, night.kharkov.ua или www.tonnel.ru). Такой подход работает медленно и иногда не приносит результата. Во-вторых, можно применить специализированные поисковые машины, например, AudioTag.info, Tutanic, Magic MP3 Tagger, Picard, TrackID, ShazamID. Данный подход позволяет получать список результатов быстро, однако этот список может оказаться огромным и при этом вообще не содержать искомой композиции.

Сценарий 4: «Я помню мелодию». Данный сценарий является наиболее сложным, поэтому прежде чем непосредственно перейти к проблеме поиска по образцу мелодии, подведем промежуточные итоги.

Анализируя описанные выше сценарии, можно заключить, что первые два сценария являются разновидностями текстового поиска с применением обычных текстовых поисковых машин. Проблема, описанная в третьем сценарии, может быть решена с использованием специализированных музыкальных поисковых машин, в основу работы которых, как правило, положено сравнение так называемых *акустических отпечатков* сравниваемых фрагментов (acoustic fingerprint, audio fingerprint). Для аудиофрагмента фиксированной длины вычисляются его спектральные характеристики с учетом психоакустических особенностей восприятия звуков человеком. Вычисленные характеристики записываются в виде вектора (spectral fingerprint). Затем этот вектор сравнивается с образцами подобных векторов, хранящихся в базе известных композиций [1].

Данный метод широко используется различными коммерческими и бесплатными программами для определения исполнителя и композиции по записанному фрагменту. Известны также открытые реализации, например, Library Open Fingerprint Architecture, с открытой для публичного пользования базой данных образцов. Размер образца, по которому осуществляется поиск, обычно составляет около трех секунд, поэтому здесь речь не идет о поиске по мелодии или даже по фрагменту мелодии.

Наряду с личными потребностями пользователей необходимость поиска по фрагменту мелодии может быть обусловлена разнообразными причинами как коммерческой, так и некоммерческой природы.

- В музыкальном магазине часто встречается ситуация, когда покупатель хочет приобрести запись, зная только мелодию из композиции, но не зная названия, автора, исполнителя и т. п. Идентификация композиций, напетых пользователем, может быть очень полезной функцией для увеличения продаж магазина.
- Композиторы часто цитируют в своих произведениях как свои ранние произведения, так и отрывки из произведений других авторов, народные или религиозные мелодии. Возможность поиска фрагментов, похожих на заданный образец, может помогать музыковедам в их исследованиях о развитии композиторского творчества, взаимовлиянии композиторов, школ, культур, временных и национальных контекстов.
- Музыкальные поисковые машины могут способствовать решению проблем в области авторских прав [2].

Поиск, основанный на образце мелодии

Рассмотрим основные возможности поиска композиции по образцу мелодии.

- Напеть мелодию, записать в файл и воспользоваться тематическим форумом.

• Напеть/насвистеть мелодию и отдать ее на идентификацию специальной программе, например, сервисам на www.midomi.com, www.musipedia.org.

• Настучать мелодию (ритм). Данный подход используется сервисами на ritmoteka.ru, www.bored.com/songtapper, www.musipedia.org. Этот метод довольно прост, но все же малоэффективен, поскольку рисунков ритма, в действительности, значительно меньше, чем сочиненных композиций. То есть даже если ритм будет введен правильно, велика вероятность, что придется изучать список из нескольких тысяч наименований.

• Написать ноты для мелодии и передать их в специализированную поисковую машину (например, www.midomi.com или www.musipedia.org).

• Наиграть мелодию на виртуальном инструменте (www.musipedia.org).

Более детальный обзор поисковых машин с описанием принципов их работы можно найти в [2].

С точки зрения разработчика, напетые пользовательские фрагменты могут быть приведены к нотам, что сводит задачу к поиску по нотам. В [3] сформулирована следующая последовательность шагов сравнения аудиофрагментов:

1) вычисление высоты тона;

2) вычисление границ нот;

3) извлечение мелодии из последовательности нот;

4) сравнение извлеченной мелодии с образцами из базы данных.

Более общий подход (query-by-humming) предполагает пропуск шагов 2 и 3. Извлеченные на первом шаге параметры (не обязательно высота тона) сравниваются на четвертом шаге в пространстве этих параметров. Обычно рассматривается двумерное пространство с координатами «тон» и «время». Тон может представлять собой как направление изменения частоты (т. е. в музыкальной терминологии – высоты) «U, D, R» (что означает соответственно «вверх», «вниз» или «без изменения») или «u, U, d, D, R» («слабо вверх», «сильно вверх», «слабо вниз», «сильно вниз», «без изменения»), так и абсолютное значение или абсолютное/относительное изменение частоты звука. Квантование времени и частот можно выбрать таким образом, что представление фрагмента в пространстве «тон-время» окажется эквивалентно нотному представлению [4].

Анализ алгоритма Earth Mover's Distance (EMD)

В реализации музыкальной поисковой машины невозможно обойтись без алгоритма сравнения музыкальных фрагментов. Используемый алгоритм оказывает непосредственное влияние на качество поиска, определяемое как релевантностью результатов, так и скоростью их получения.

Вне зависимости от конкретной реализации все алгоритмы можно разбить на четыре большие группы, сравнивающие: 1) монофонический фрагмент с монофоническим; 2) монофонический с полифоническим; 3) полифонический с монофоническим; 4) полифонический с полифоническим.

Все известные нам алгоритмы работают с представлением музыки так или иначе приводимом к piano-roll. В [5] производится сравнение некоторых алгоритмов между собой, из которого можно сделать вывод, что проблема формального сравнения монофонических фрагментов в настоящий момент проработана хорошо.

В общем виде идея алгоритма проста: мелодия представляется в двумерном пространстве (одна из степеней свободы – высота тона, либо производная от этой величины; другая – время, абсолютное или логическое, или производная от этой величины). Затем вводится функционал $f: a \in P, b \in P \to c \in R$, где $a, b \in P$ – отрезки piano-roll (характеризуются временем наступления события, высотой тона и длительностью события), $c \in R$ – вещественные числа. С помощью введенного функционала вычисляется расстояние между двумя множествами: искомым шаблоном и шаблоном из базы как сумма расстояний между соответствующими отрезками, либо как наименьшая из сумм при некоторых ограничениях на транспозицию отрезков и масштабирование осей (задача оптимизации). Вычисленное расстояние используется для определения порядка возвращаемых результатов.

Различные алгоритмы отличаются, в первую очередь, введенным функционалом. Такой подход к сравнению монофонических фрагментов кажется вполне естественным. На практике его часто применяют и для полифонических фрагментов. Хотя в целом такие алгоритмы часто оказываются эффективными и для сравнения монофонического образца с полифоническим, существует множество ситуаций, когда две совершенно раз-

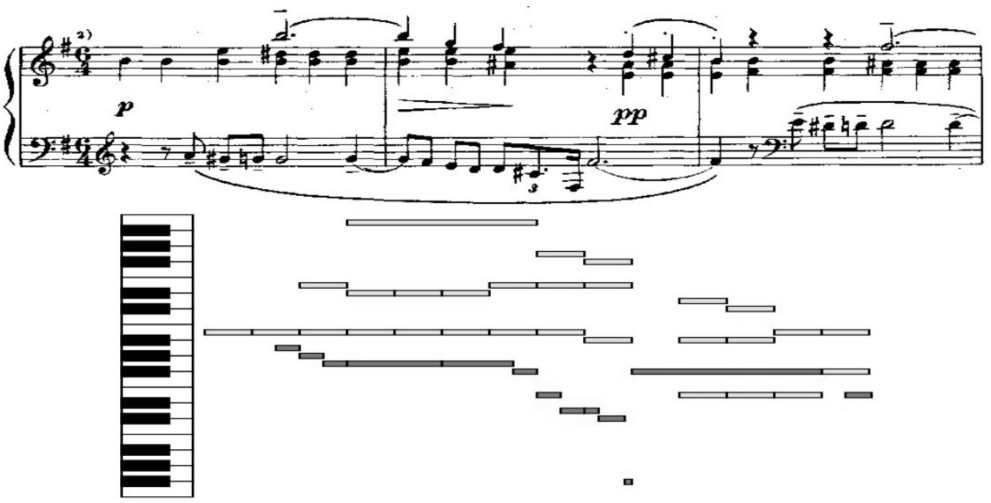


Рис. 1. Нотный фрагмент и его представление в piano-roll

ные монофонические мелодии оказываются одинаково близкими к полифонической. Причины возникновения подобных ситуаций поясним на примере известного алгоритма EMD.

В качестве полифонического фрагмента возьмем отрывок из произведения прелюдии ми минор А. Скрябина (соч. 11 №4). На рис. 1 приведен фрагмент нотной записи и соответствующее представление в формате piano-roll.

Рассмотрим два монофонических фрагмента, представленные на рис. 2.

Очевидно, что первый фрагмент (назовем его *фрагмент A*) является частью аккомпанемента, в то время как второй (*фрагмент B*) – мелодией.

Постановка задачи EMD в терминах линейного программирования имеет следующий вид. Пусть $A = \{a_1, a_2, ..., a_m\}$ – множество взвешенных точек, таких, что $a_i = \{(x_i, w_i)\}$, $i = 1, ..., m$, где $x_i \in R^k$ – координата точки, $w_i \in R^+ \cup \{0\}$ – масса точки. Пусть $W = \sum_{j=1}^{m} w_i$ – суммарная масса множества A. Пусть даны два множества взвешенных точек A, B и функция расстояния d. Обозначим как f_{ij} величину перемещаемой массы из x_i в y_j (на расстояние d_{ij}). Если W и U – суммарные веса множеств A и B соответственно, то множество всех возможных перемещений масс $F = [f_{ij}]$ задается следующими ограничениями [6]:

$$f_{ij} \geq 0,\ i = 1, ..., m;\ j = 1, ..., n$$

$$\sum_{j=0}^{n} f_{ij} \leq w_i,\ i = 1, ..., m$$

$$\sum_{i=0}^{m} f_{ij} \leq u_j,\ j = 1, ..., n$$

$$\sum_{j=0}^{n}\sum_{i=0}^{m} f_{ij} = \min(W, U).$$

Расстояние EMD между двумя множествами вычисляется как минимальное значение:

$$\mathrm{EMD}(A, B) = \frac{\min_{X \in F} \sum_{j=0}^{n} \sum_{i=0}^{m} f_{ij} d_{ij}}{\min(W, U)}.$$

Очевидно, что поскольку искомый отрезок мелодии B является подмножеством полифонического фрагмента, то существует такой набор перемещаемых масс X, что дистанция d_{ij} будет равна нулю для любых i, j. Аналогичные результаты справедливы для фрагмента A. Получается, что $\mathrm{EMD}(A, O) = \mathrm{EMD}(B, O) = 0$.

Рассмотренная выше ситуация может возникать на практике довольно часто. Вместо фрагмента A можно было выбрать произвольное подмножество нот полифонической мелодии и получить значение ноль для алгоритма EMD.

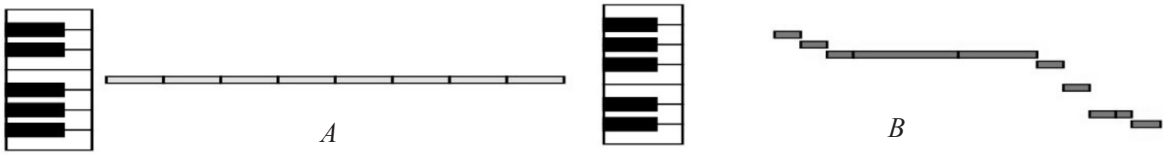


Рис. 2. Фрагменты аккомпанемента и мелодии, представленные в piano-roll

С точки зрения человека дистанция, конечно, должна быть существенно больше нуля.

Суть проблемы в том, что алгоритм формально ищет ноты, общие для двух фрагментов. Человек же ставит оценку, основываясь не на нотах, а на восприятии. Такое отличие человеческой оценки схожести от машинной производит на свет множество ложных срабатываний: если фрагменты похожи, у них будут общие ноты (интервалы), но не все фрагменты с общими нотами похожи (как это видно в рассмотренном выше примере).

Модификация алгоритма EMD

Цель предлагаемой модификации заключается в уменьшении числа ошибок, подобных продемонстрированным в предыдущем разделе. Основная идея подхода состоит в расширении оценки EMD за счет введения третьей координаты, отражающей восприятие музыки человеком. Эта координата z будет влиять лишь на вычисление расстояния d между нотами, но не на массу. Далее будем называть этот алгоритм EMD3D.

Трудно принять во внимание все особенности человеческого восприятия, но некоторые из них могут быть учтены довольно просто.

Учет громкости. Пусть в любой момент времени одновременно звучит не более n нот. Тогда все ноты, звучащие в один момент времени, можно ранжировать и ввести значение $v_i \in \{0, 1, ..., n-1\}$, где v_i – показатель громкости, 0 – самая громкая.

Если пользовательский запрос монофонический, то показатели громкости всех нот в запросе автоматически оказываются равными нулю. При сравнении двух нот одинаковой длительности и высоты дистанция d будет большей нуля, если показатели громкости не совпадают. Громкая нота (с показателем громкости, равным нулю) будет заглушать остальные, поэтому она будет с большей вероятностью воспроизведена пользователем, который вводит монофонический фрагмент со слуха.

Усложняя модель, можно ввести коэффициент затухания громкости; очевидно, для каждого инструмента он будет свой.

Учет повторения ноты. Обратимся еще раз к фрагменту прелюдии на рис. 1. Очевидно, что повторяющаяся нота си первой октавы оказывает влияние лишь на красочность восприятия, но не на саму мелодию. В общем случае, если мы удалим повторяющиеся ноты, то музыкальное произведение изменится, но не так сильно, как если бы мы удаляли неповторяющиеся ноты.

На основе этого наблюдения можно ввести параметр $r_i \in \{0,1\}$, характеризующий значимость ноты для восприятия на основе ее повторения. $r_i = 0$, если непосредственно перед нотой не звучала она же, $r_i = 1$ – если звучала.

По крайней мере, два случая представляют собой исключения:

единственная звучащая нота будет слышна хорошо ($r_i = 0$), даже если она повторяется;

нота после паузы будет звучать отчетливо ($r_i = 0$).

Это же утверждение в более общем виде лежит в основе методов выделения мелодии из полифонического произведения на основе энтропии музыкального трека [7].

Ноты в верхнем или нижнем голосе. Обычно (но далеко не всегда) мелодию образуют либо ноты самого верхнего голоса, либо – самого нижнего. Для учета этой особенности введем параметр $m_i \in \{0,1\}$, такой, что $m_i = 0$, если нота является самой высокой или самой низкой в созвучии, в противном случае $m_i = 1$.

Это же утверждение лежит в основе skyline-алгоритмов выделения мелодии [8]. Хотя этот параметр, по-видимому, является наиболее спорным, его учет часто оказывает значимый положительный эффект на качество работы алгоритма сравнения.

Интегральная оценка сходства образцов, используемая алгоритмом EMD3D. Учитывая все сказанное выше, формулировка алгоритма оценки сходства образцов EMD3D в терминах линейного программирования имеет следующий вид. Пусть даны два множества:

$$A = \{a_1, a_2, ..., a_m\}; B = \{b_1, b_2, ..., b_n\},$$

таких, что

$$a_i = (x_{a_i}, w_{a_i}); b_j = (x_{b_j}, w_{b_j}),$$

где $x_{a_i}, x_{b_j} \in R^3$ и $w_{a_i}, w_{b_j} \in R^+ \cup \{0\}$.

Обозначим индексы a_i и b_j звездочкой (*). Вес w_* приравняем значению длительности ноты (в четвертях, миллисекундах и т. п.). Координата ноты $x_* = \{t_*, p_*, z_*\}$ является трехмерным вектором, где t_* – время начала звучания; p_* – значение высоты тона; z_* – значимость ноты, вычисляемая с учетом перечисленных выше факторов:

$$z_* = c_1 v_* + c_2 r_* + c_3 m_*,$$

где $v_* \in N$ – показатель громкости; $r_* \in \{0,1\}$ –

признак повторения; $m_* \in \{0,1\}$ – признак самого высокого/низкого голоса; c_1, c_2, c_3 – масштабирующие коэффициенты (использовались значения $c_1 = 2$, $c_2 = 1$, $c_3 = 0,5$).

Для оценки сходства образцов используется выражение, аналогичное выражению, используемому в EMD:

$$\mathrm{EMD}(A,B) = \frac{\min_{X \in F} \sum_{j=0}^{n} \sum_{i=0}^{m} f_{ij} d_{ij}}{\min(W,U)}$$

с теми же ограничениями:

$$f_{ij} \geq 0,\ i = 1, ...,\ m;\ j = 1, ...,\ n$$

$$\sum_{j=0}^{n} f_{ij} \leq w_i,\ i = 1, ...,\ m$$

$$\sum_{i=0}^{m} f_{ij} \leq u_j,\ j = 1, ...,\ n$$

$$\sum_{j=0}^{n} \sum_{i=0}^{m} f_{ij} = \min(W,U),$$

где d_{ij} – расстояние в трехмерном евклидовом пространстве между координатами нот (t_i, p_i, z_i) и (t_j, p_j, z_j):

$$d_{ij} = \sqrt{(t_i - t_j)^2 + (p_i - p_j)^2 + (z_i - z_j)^2}\ .$$

Несложно продемонстрировать, что при таком представлении музыки в трехмерном пространстве расстояния $\mathrm{EMD3D}(A,O)$ и $\mathrm{EMD3D}(B,O)$ (для примера, рассмотренного выше) будут разными, и мелодия (фрагмент B) оказывается ближе к оригиналу, чем фрагмент аккомпанемента:

$$\mathrm{EMD3D}(A,O) = 4,17,$$
$$\mathrm{EMD3D}(B,O) = 0,56.$$

Дополнительные критерии поиска

Поиск по образцу – важный элемент функциональности, однако поисковая машина не должна ограничиваться исключительно этим. Образец воспроизводится пользователем с некоторой точностью, т. к., например множество мелодий из трех нот равной длительности составляет $88^3 = 681\,472$ элементов для стандартного пианино или $12^3 = 1\,728$ элементов, если все ноты лежат в пределах одной октавы. Получается, что вероятность ошибки в определении мелодии велика хотя бы из-за большого количества элементов множества мелодий из n нот. Более того, размер множества растет со скоростью показательной функции. Поэтому важно также использовать при поиске информацию, более достоверную статистически, например, набор музыкальных инструментов. В то время как множество мелодий из n нот составляет 88^n элементов, стандарт General MIDI допускает только 128 инструментов, не считая ударных. Вероятность ошибки в определении инструмента значительно меньше, поэтому информация об инструменте более надежна, чем, скажем, мелодия. Аналогично можно выделить и другие параметры: музыкальный инструмент, тональность, размер, темп и др. В случае если пользователь испытывает затруднения при определении точного значения параметра, предоставляется возможность выбора нескольких инструментов, тональностей, размеров.

Всю описанную выше информацию для поиска можно легко извлечь из midi-файлов, которые предлагается использовать как основной источник информации. Сами midi-файлы могут быть автоматически найдены в сети по расширению. Базовым алгоритмом для сравнения фрагментов предлагается использовать EMD3D, который может быть расширен с учетом дополнительных критериев восприятия.

Отметим, что внедрение и даже широкое применение поисковой системы еще не является конечной точкой исследований. На этапе активного использования поисковой системы можно собирать статистическую информацию, которую затем применять для динамического изменения значимости нот в шаблонах в базе.

Например, сместим плоскость Z на число x и введем четвертое слагаемое $p_i \in [-1;1]$ – статистическую значимость. Тогда значимость ноты:

$$z_i = x + c_1 v_i + c_2 r_i + c_3 m_i - x p_i\ .$$

Начальное значение $p_i = 0$. В процессе работы пользователей с поисковой системой это значение может изменяться в пределах диапазона [–1;1]: в сторону положительных значений для нот, по которым пользователь идентифицировал композицию, в сторону отрицательных значений для нот, не имеющих отношения к мелодии. Чтобы обеспечить работоспособность такого подхода, необходимо иметь возможность получать от пользователя отзыв, нашел ли он композицию или нет (например, добавив в интерфейс кнопки «Это то, что я искал!» и «Это совсем не похоже на то, что я искал!»). На этапе составления базы можно повторно использовать знания, накопленные такими проектами, как musipedia.org, midomi.com и пр. Базы данных этих проектов уже содержат тысячи записей мелодий (монофонических фрагментов), которые можно использовать для вычис-

Правила для вычисления значимости нот

Факторы	Правила												
Нота самая громкая в созвучии	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	*
Нота повторяется	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	*
Нота сразу после паузы	*	*	0	1	0	1	*	*	0	1	0	1	*
Единственная звучащая нота	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Нота самая высокая/низкая в созвучии	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	*
	Решение												
Значимость	2,5	0,5	3,5	0,5	1,5	0,5	2	0	3	2	1	0	0

ления начального значения p_i соответствующих композиций в базе разрабатываемой системы.

Рассмотренные выше правила вычисления значимости нот в форме инструкций «если – то» представляют собой базу знаний, являющуюся ключевым элементом инженерии знаний. В нашем случае база знаний может быть представлена таблицей.

В строках таблицы перечислены факторы. Содержимое ячейки показывает, активен ли фактор. Символ * используется, чтобы показать, что данный фактор не имеет значения. В столбцах перечислены ситуации (все возможные комбинации факторов). Таким образом, значимость ноты может быть вычислена с использованием формулы $z_* = c_1 v_* + c_2 r_* + c_3 m_*$, представленной в подразделе «Интегральная оценка сходства образцов, используемая алгоритмом EMD3D», при этом значения переменных вычисляются по правилам, изложенным выше.

В дальнейшем данная база может расширяться с учетом выявления новых знаний. Использование баз знаний позволяет компенсировать недостатки алгоритмов формального сопоставления музыкальных фрагментов, не позволяющих учесть некоторые особенности человеческого восприятия.

С точки зрения пользователя поисковая система представлена интерфейсом, обеспечивающим доступ к возможностям системы. Среди ключевых функций предлагается реализовать поиск по одному или нескольким параметрам: музыкальным инструментам, музыкальному размеру, тональности, названию, автору, монофоническому или полифоническому образцу. При сравнении по образцу можно использовать накопленную статистическую информацию, позволяющую выделить из композиции действительно важные ноты. Статистически значимые ноты можно в дальнейшем использовать для индексирования базы шаблонов. Например, в [9] для задач поиска в полифонических фрагментах указывается на сложности, связанные именно с количеством обрабатываемой информации. В качестве решения предлагается удалять ноты, не имеющие отношения к мелодии, на основе некоторого формального алгоритма. Наше предложение сводится к тому, чтобы удалять ноты на основе их статистической значимости.

Рассматривая жизненный цикл поисковой системы, можно предположить, что алгоритм, используемый для сравнения, является переменной величиной [10]. При этом накопленная база знаний может использоваться для улучшения свойств любого выбранного алгоритма (а не только EMD). Поскольку в настоящий момент, похоже, не существует алгоритмов, работающих во всех ситуациях в близкой к человеку манере, одним из перспективных направлений является разработка и применение баз знаний, позволяющих учесть разнообразные (и часто противоречивые) аспекты человеческого восприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hatch, W.** A quick review of audio fingerprinting: Technical report [Электронный ресурс] / W. Hatch. –McGill University. –2003. –Режим доступа: http://www.music.mcgill.ca/~wes/docs/finger2.pdf

2. **Typke, R.** A survey of music information retrieval systems [Текст] / R. Typke, F. Wiering, R. C. Veltkamp // In Proc. of the 6th International Conf. on Music Information Retrieval (ISMIR). –2005. –№ 1020.

3. **Isikhan, C.** A survey of melody extraction techniques for music information retrieval [Электронный ресурс] / C. Isikhan, G. Ozcan // In Proc. of 4th Conf. on Interdisciplinary Musicology (SIM'08). –2008. –Режим доступа: http://cim08.web.auth.gr

4. **Shasha, D.** High Performance Discovery in Time Series: Techniques and Case Studies [Text] / D. Shasha, Y. Zhu. –Springer Verlag, NY, 2004.

5. **Ukkonen, E.** Sweepline the Music! Lecture Notes in Computer Science [Text] / E. Ukkonen, K. Lemstrom, V. Makinen // Comp. Sci. in Perspective (Ottmann Festschrift); Ed. R. Klein [et al.]. –2003. –P. 330–342.

6. **Typke, R.** Using transportation distances for measuring melodic similarity [Электронный ресурс] / R. Typke [et al.] // In Proc. of the International Conf. on Music Information Retrieval (ISMIR). –2003. –Режим доступа: http://ismir2003.ismir.net

7. **Madsen, S.T.** A complexity-based approach to melody track identification in midi files [Электронный ресурс] / S.T. Madsen, G. Widmer // In Proc. of the International Workshop on Artificial Intelligence and Music (MUSIC-AI 2007) held in conjunction with the 20th International Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI 2007). –2007. –Режим доступа: http://www.ofai.at/~soren.madsen/pub/music-ai07.pdf

8. **Uitdenbogerd, A.I.** Manipulation of music for melody matching [Text] / A. L. Uitdenbogerd, J. Zobel // In Proc. of the 6th ACM international Conf. on Multimedia. –ACM NY, 1998. –P. 235–240.

9. **Madsen, S.T.** Automatic reduction of midi files preserving relevant musical content [Text] / S.T. Madsen, R. Typke, G. Widmer // In Proc. of the 6th International Workshop on Adaptive Multimedia Retrieval (AMR'08). –Springer-Verlag. –2008. –P. 89–99.

10. **Kuznetsov, A.** Searching for Music: From Melodies in Mind to the Resources on the Web [Text] / A. Kuznetsov, E. Pyshkin // In Proc. of the 13th International Conf. on Humans and Computers (HC-2010), University of Aizu Press, 2010. –P. 152–158.

УДК 004.415

В.П. Котляров

КРИТЕРИИ ПОКРЫТИЯ ТРЕБОВАНИЙ В ТЕСТОВЫХ СЦЕНАРИЯХ, СГЕНЕРИРОВАННЫХ ИЗ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИЛОЖЕНИЙ

Ключевая проблема современного тестирования – проверка соответствия семантики реализованного программного продукта семантике, заданной заказчиком в требованиях. Суть проблемы в том, что набор тестов, проверяющий выполнение требований, не гарантирует проверку их семантики. В статье, в отличие от традиционных критериев [9], предложен критерий, позволяющий согласовать с заказчиком и проверить при тестировании семантику требований.

Формализация требований

В современной проектной документации формулировка требований задается либо конструктивно, когда из текста требования на естественном языке удается реконструировать процедуру контроля или сценарий проверки выполнения данного требования, либо неконструктивно, когда заданное в требовании свойство не содержит пояснения способа его проверки.

Поведенческие требования при наличии заданного сценария проверки являются конструктивно заданными и допускают для проверки реализуемости использование верификации или тестирования. Неповеденческие требования часто задаются неконструктивно, что заставляет в процессе формализации привлекать дополнительную информацию, позволяющую реконструировать сценарий их проверки, т. е. привести неконструктивную форму задания требования к конструктивной.

Процедура или сценарий проверки некоторого требования заключается в задании перечислимого упорядоченного набора событий, фиксация которого в процессе исполнения приложения будет для заказчика критерием выполнимости соответствующего требования. Подобную последовательность событий в дальнейшем изложении будем называть *критериальной последовательностью* или *цепочкой* [1]. Каждому требованию может быть сопоставлена одна или несколько критериальных цепочек. Отслеживая в поведенческом сценарии системы факт выполнения критериальной цепочки, можно утверждать, что соответствующее требование в анализируемой системе удовлетворено.

Специальная структура данных (Traceability Matrix) на рис. 1 проектирует исходные требова-

	A	B	C	D	E
1	ID	Identifier	Requirements	Scenario of Requirements	Traceability
	1	1639	When the CCGW is ready to send the conventional channe out-of-service ICP message to the ZC to take the channel out of service, it shall send a proper STOP ICW message to the BS before it stops sending the link management packets. Note: This is when an active call is in progress. Transmission of STOP IMBE message is optional	1) Receive CChannelDown 2) Send XisStopBS 3) stop link 4) Send ChannelOutOfServiceRequest	:1639 rChannelDown1
2					

Рис. 1. Требование, цепочка (сценарий) и имя соответствующего BP, кодирующего цепочку

ния (колонка Requirements) на критериальные цепочки (колонка Scenario for the Requirement). Каждая цепочка содержит события, выполнимость которых необходима для покрытия требования. В процессе формализации этот сценарий кодируется базовым протоколом (BP) [2] rChannelDown1 (Колонка Traceability).

Базовый протокол кодирует минимальный наблюдаемый шаг поведения системы. BP – это аналог тройки Хоара, содержащий предусловие, постусловие и процесс (наблюдаемое действие, последовательность действий). Пред- и постусловия описывают подмножество состояний системы перед и после действий процесса, заключающегося в посылке сигналов или изменении значений переменных приложения. BP могут содержать символьные или конкретные значения параметров, причем для символьных задается диапазон возможных значений. BP может относиться к одному или нескольким требованиям, равно как и несколько BP или несколько цепочек BP могут относиться к одному требованию.

Множество BP составляет модель требований. Объединяя непротиворечивые пред- и постусловия различных BP, можно построить сценарии или трассы, позволяющие наглядно отображать возможные поведения проектируемой системы. Трассы, использующие символьные параметры, называются *символическими*. Корректность варианта поведения, фиксируемого конкретной или символической трассой, доказывается верификатором [3].

Совокупность трасс, покрывающая все цепочки всех требований, формирует модель требований разрабатываемого приложения. Эта модель может использоваться для генерации полного набора тестов, проверяющего функциональное покрытие всех конструктивно заданных требований.

Формализация архитектурной модели

Формальная модель требований на основе BP обладает серьезным недостатком: она содержит все возможные трассы, которые можно построить из BP. Даже для индустриальных проектов среднего размера это обстоятельство приводит к взрыву числа вариантов, которые следует учитывать при анализе. В то же время в приложениях важны не все поведенческие трассы, а только те, которые можно будет использовать для реализации функциональности, заданной требованиями [4].

Модель, отображающую реализацию функциональности, называют *архитектурной*. Она часто задается в нотации Use Case диаграмм (UCM [5]). UCM диаграммы (рис. 2) изображают причинно-следственные связи событий (Responsibilities) на путях от начальной точки (Start point) до конечной точки (End point). Каждое событие (Responsibility) на пути UCM диаграммы может быть закодировано BP. Путь может разветвляться в точках альтернатив (OrFork) или точках распараллеливания (AndFork), ветви могут соединяться в точках (OrJoin и AndJoin) и если необходимо – синхронизироваться. В путях могут использоваться таймеры (Timer) и поддиаграммы (Stub). Последовательность событий, описывающих поведение системы, задается набором взаимодействующих между собой диаграмм.

На сегодняшний день UCM представляет наиболее высокоуровневое описание проектируемой системы, сохраняющее при этом все сценарии поведения, она понятна и проста [11]. Высокоуровневое описание можно многократно детализировать, добиваясь ясности и корректности описания архитектуры системы.

Эта форма описания позволяет представителю заказчика участвовать в принятии решений на уровне архитектуры проекта, в текущем контроле проекта, в отслеживании расхождений семантики постановки задачи и ее реализации.

Критерии поведенческих сценариев

Критерии покрытия требований в тестовых сценариях генерируются из поведенческих моде-

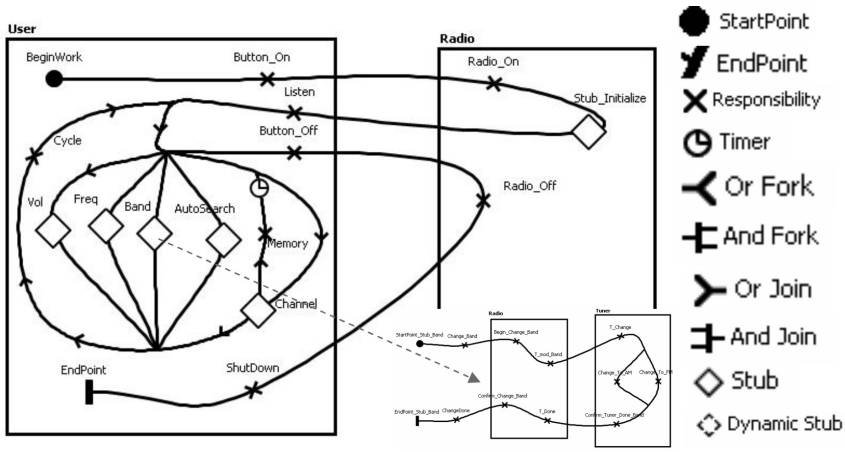


Рис. 2. Представление поведения системы и взаимодействий между ее компонентами с помощью UCM

лей приложений. В данной статье как и в [10] используются архитектурные UCM модели.

Поскольку для событий UCM диаграммы возможно однозначное отображение через ВР, критерием выполнения отдельных требований могут служить согласованные с заказчиком цепочки из ВР, содержащие последовательности активностей и состояний, подлежащих проверке в процессе тестирования.

Функциональным критерием стопроцентного выполнения требований на программный продукт служит покрытие всех цепочек на множестве всех исходных формализованных требований. Частным функциональным критерием качества является покрытие всех цепочек на фиксированном заранее подмножестве требований [1]. При этом детальность цепочек может различаться в зависимости от целей ее использования для верификации или тестирования.

Для целей верификации цепочкам достаточно описывать лишь наблюдаемую (измеряемую) часть функциональности, т. е. описывать последовательности событий и состояний в поведении системы, гарантирующих покрытие требования, но не обязательно следующих непосредственно друг за другом. Трассы, генерируемые в этом случае, могут не учитывать некоторые промежуточные события и состояния, не используемые при оценке покрытия.

Для целей тестирования в цепочке необходимо воспроизвести детальную последовательность событий, связанную с взаимодействием тестируемой системы с окружением, другими словами, учесть события обмена внешними сигналами, прерываниями (например, от таймеров) и т. д. Трассы, генерируемые для целей тестирования, должны кроме воспроизведения поведения, необходимого для реализации некоторой функциональности, содержать полную последовательность событий и состояний, связанных с коммуникацией с окружением.

Таким образом, если в цепочке порядок поведения приложения (в виде последовательности ВР) задан частично, то в генерируемой для целей тестирования трассе необходимо полностью воссоздать этот порядок.

Рассмотрим структурные критерии тестирования поведения, использование которых совместно с функциональными обеспечивает необходимый уровень качества на этапах интеграционного и системного тестирования.

Структурные критерии связаны с покрытием определенных путей исходных UCM диаграмм генерируемыми трассами (тестовыми сценариями). Можно выделить структурные критерии базовых протоколов и цепочек.

По критерию базовых протоколов [6, 7] итоговый набор трасс состоит из трасс, покрывающих все базовые протоколы, т. е. каждый базовый протокол встречается, по крайней мере, один раз в трассах. Однако такой критерий достаточно слаб. Он соответствует известному критерию C0, который заключается в покрытии всех операторов тестируемой программы, по крайней мере, один раз в ходе исполнения тестового цикла. Данный критерий гарантирует покрытие всех функциональных требований только в случае, если каждое требование покрывается одним базовым протоколом. Однако критерий не гарантирует покрытие всех UCM путей, поскольку не учитывается тот

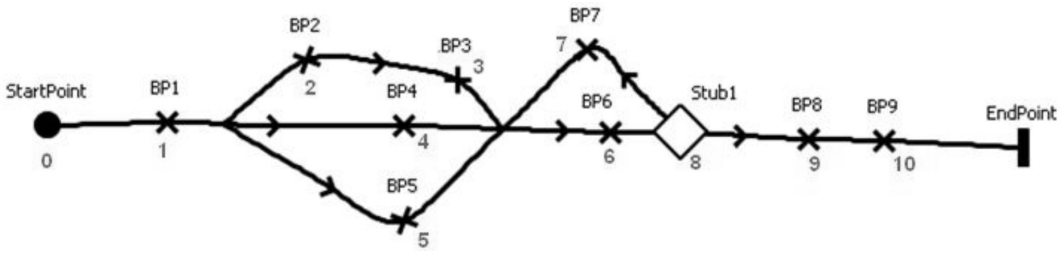


Рис. 3. UCM диаграмма верхнего уровня с элементом Stub1

факт, что несколько трасс могут содержать один и тот же базовый протокол. В результате в итоговом наборе трасс может присутствовать только одна из трасс, содержащих этот базовый протокол, соответственно другие пути, заданные UCM диаграммой, будут потеряны.

Например, если требуется покрыть требование, представленное элементом 6 на рис. 3, используя критерий базовых протоколов, то совсем не важно, по какому пути следует достичь элемента 6 из начального состояния 0. Достаточно только одной из трех трасс (1-2-3-6, 1-4-6 или 1-5-6), в то время как две другие не будут рассматриваться и будут потеряны. В результате два пути на UCM диаграмме не будут покрыты.

В случае использования критерия цепочек будут заданы все пути, содержащие цепочки базовых протоколов, ведущие к элементу 6. Критерий цепочек гарантирует присутствие соответствующих событий в итоговой трассе именно в той последовательности, которая необходима для покрытия требования.

По критерию цепочек итоговый набор трасс содержит трассы, покрывающие все цепочки из BP для всех требований. В этом случае ограничение на соответствие каждого требования одному BP снимается: каждое требование может быть представлено цепочкой BP, и покрытие требования означает, что все BP и соответствующие события произойдут в итоговой трассе в точно таком же порядке. Данный критерий соответствует известному критерию путей C2 («все пути потока управления программы должны быть покрыты»), ограниченному набором путей, учитывающих только важные для заказчика сценарии поведения тестируемого приложения. Без данного ограничения применение критерия в промышленных проектах становится бесполезным из-за экспоненциального взрыва числа возможных путей поведения.

Например, на рис. 3 трассы 1-2-3-6-8-9-10, 1-4-6-8-9-10 и 1-5-6-8-9-10, построенные по UCM диаграмме, гарантируют покрытие не только базовых протоколов BP6 (6 на рисунке), BP8 (9) и BP9 (10), но также задают пути, на которых выполняются важные события, необходимые для покрытия соответствующих требований: элемент Stub1 (8) и базовые протоколы BP2 (2), BP3 (3), BP4 (4), BP5 (5).

Если цепочка для требования содержит альтернативу (например, 1-2-3-6, 1-4-6, 1-5-6, описываемую тремя цепочками), то необходимо сгенерировать три трассы для покрытия альтернативных цепочек. Если трассы, покрывающие альтернативные цепочки, не зависят от этой альтернативы, то трасса для некоторых тестов может быть укорочена путем удаления повторяющегося поведения. Например, набор трасс 1-2-3-6-8-9-10, 1-4-6-8-9-10 и 1-5-6-8-9-10 может быть заменен набором 1-4-6-8-9-10, 1-2-3-6 и 1-5-6.

Если трассы содержат абстрактные фрагменты с описанием поведения, заданного с помощью элемента Stub (например, Stub1 (8) на рис. 3), то трассы, представляющие поведение внутри элемента Stub, могут быть получены отдельно и

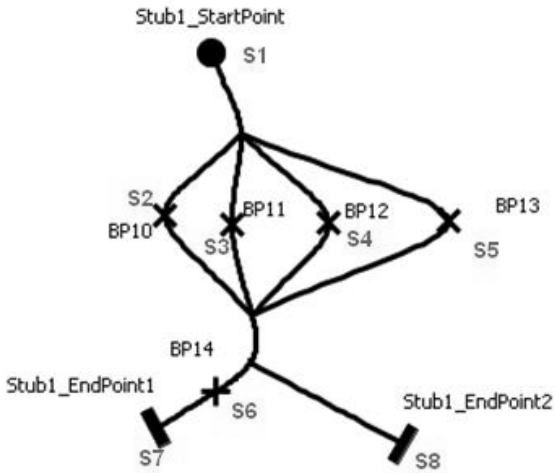


Рис. 4. UCM диаграмма элемента Stub1

затем добавлены в итоговую трассу с детальным поведением.

Например, UCM диаграмма элемента Stub1 представлена на рис. 4. Поведение элемента описывается следующими трассами: S1-S2-S6-S7, S1-S3-S6-S7, S1-S4-S6-S7, S1-S5-S6-S7, а также идентичным набором трасс, оканчивающихся элементом S8 вместо последовательности элементов S6-S7. При подстановке детального поведения Stub1 в трассу, описывающую полное поведение системы, вход в Stub1 соединяется с элементом S1, выход S7 – с элементом 9, выход S8 – с элементом 7 на рис. 3.

Критерий цепочек – достаточно сильный критерий, т. к. из полного набора сгенерированных трасс выбираются лишь те, которые содержат определенные критериальные цепочки событий и состояний в определенной последовательности.

Итоговый набор выбранных трасс минимизируется и в результате содержит вхождение каждой цепочки в трассы по крайней мере один раз. Минимизированный набор трасс покрывает все требования на программный продукт. По этому набору осуществляется кодогенерация тестов.

Однако возможны ситуации, когда пользователю (тестировщику) необходимы определенные трассы, не вошедшие в итоговый набор. Существуют две причины такого непопадания:

трасса может присутствовать в полном наборе сгенерированных трасс, но исключаться из минимального набора, покрывающего все цепочки. Для исправления ситуации должны быть добавлены дополнительные условия (события или состояния), т. е. измененные или дополнительные цепочки, чтобы сделать эту трассу отличной от других и, таким образом, добавить в минимальный набор трасс;

трасса не может быть представлена ни одним из путей на UCM диаграмме, т. к. на диаграмме отсутствуют необходимые дополнительные сценарии поведения. Обычно эти дополнительные пути состоят из тех же событий, что и начальные пути, но относятся к другим состояниям системы, что и создает различия. Различия, как правило, вызываются разными режимами функционирования системы, что приводит к уточнению спецификации в виде UCM диаграммы, и соответственно, к добавлению новых цепочек.

Описанный подход применен при тестировании индустриальных проектов, использующих VRS/TAT технологию верификации и тестирования [8], где показал существенную экономию трудоемкости на этапах формализации, генерации тестов и анализа тестовых циклов.

Использование критерия цепочек для оценки покрытия функциональных требований на систему сгенерированными тестовыми сценариями обеспечивает надежный базис при тестировании промышленных систем, гарантирующий высокое качество реализации по отношению к исходным спецификациям.

Работа поддержана грантом РФФИ 11-07-90412-Укр_ф_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баранов, С.Н.** Индустриальная технология автоматизации тестирования мобильных устройств на основе верификационных поведенческих моделей проектных спецификаций требований [Текст] / С.Н. Баранов, В.П. Котляров, А.А. Летичевский // Космос, астрономия и программирование. Лавровские чтения. –СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008. –С. 134–145.

2. **Letichevsky, A.A.** Basic Protocols, Message Sequence Charts, and the Verification of Requirements Specifications [Text] / A.A. Letichevsky, J.V. Kapitonova, V.P. Kotlyarov, O.O. Letichevsky [et al.] // Proc. of ISSRE04 Workshop on Integrated -reliability with Telecommunications and UML Languages. –IRISA Rennes France. –2 Nov. 2004.

3. **Baranov, S.** An Industrial Technology of Test Automation Based on Verified Behavioral Models of Requirement Specification for Telecommunication Applications [Text] / S. Baranov, V. Kotlyarov, A. Letichevsky // Proc. IEEE Eurocon. –SPb, 18–23 May 2009. –8p.

4. **Baranov, S.** Implementation of an integrated verification and testing technology in telecommunication project [Text] / S. Baranov, V. Kotlyarov, A. Letichevsky // Proc. IEEE Russia Northwest Section, 110 Anniversary of Radio Invention Conf. –SPb, 2005. –11 p.

5. Recommendation ITU-T Z.151 User requirements notation (URN) – Language definition [Электронный ресурс] / Nov. 2008. –190 p.

6. **Летичевский, А.А.** Спецификация систем с помощью базовых протоколов [Текст] / А.А. Летичевский, Ю.В. Капитонова, В.А. Волков [и др.] // Кибернетика и системный анализ. –2005. –№ 4. –С. 3–21.

7. **Baranov, S.** Tools For Requirements Capturing Based on the Technology of Basic Protocols [Text]/ S. Baranov, J. Kapitonova, A. Letichevsky [et al.] // Proc. of SPb. IEEE Chapters. –2005. –P. 92–97.

8. **Котляров, В.П.** Автоматизация проектирования программного продукта под контролем заказчика [Текст] / В.П. Котляров, П.Д. Дробинцев // Ершовская конф. по информатике. Тр. рабочего семинара Наукоемкое программирование, 27 июня – 1 июля 2011. –Академгородок, Новосибирск. –С.124–131.

9. **Carel, M.** C0, C1 and C2 Coverage [Электронный ресурс] / M. Carel // Режим доступа: http://dev-logger.blogspot.com/2008/06/c0-c1-and-c2-coverage.html

10. **Amyot, D.** Generation of Test Purposes from Use Case Maps [Text] / D. Amyot, M. Weiss, L. Logrippo // Computer Networks. – 2005. –№ 49 (5). –P. 643–660.

11. **Hassine, J.** Use Case Maps as a property specification language [Text] / J. Hassine, J. Rilling, R. Dssouli // Software and Systems Mod. –2009. –№ 8 (2). –P. 205–220.

УДК 004.056.53

С.А. Нестеров

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА РИСКОВ

В настоящее время большое распространение получил подход к построению комплексов средств защиты информационных систем (ИС), основанный на анализе и управлении рисками. Подобный подход позволяет рассматривать затрачиваемые на обеспечение безопасности средства и ресурсы как инвестиции в снижение рисков, связанных с информационной безопасностью (ИБ), и, в конечном счете, – в увеличение стабильности работы предприятия. Это позволяет в дальнейшем использовать общепринятые экономические показатели для оценки их эффективности.

Широко известен ряд методик проведения анализа рисков. Однако на практике их применение затрудняется сложностью получения требуемых достоверных оценок частот реализации различных угроз. Кроме того, большинство современных методик и основанных на них программных продуктов не рассматривают технические вопросы, связанные с совместной работой средств и механизмов защиты в той «внешней среде», которую формирует защищаемая ИС. Поэтому, несмотря на то что проведение подобного анализа позволит оценить риски, выбор конкретного набора средств защиты является отдельной задачей, один из подходов к решению которой описывается в данной статье.

Примеры методик анализа рисков

По типу используемой оценки существующие методики анализа рисков можно разделить на три группы:

использующие оценку риска на качественном уровне (например, по шкале «высокий», «средний», «низкий») – к таким методикам, в частности, относится Facilitated Risk Analysis Process (FRAP);

количественные (риск оценивается через числовое значение, например размер ожидаемых годовых потерь) – к этому классу относится методика RiskWatch;

использующие смешанные оценки (такой подход применяется в CRAMM, методике Майкрософт и т. д.).

Для примера рассмотрим методику анализа рисков, реализованную в системе RiskWatch [1]. Эффект от внедрения средств защиты количественно описывается с помощью показателя ROI (Return on Investment), характеризующего отдачу от сделанных инвестиций за определенный период времени. Рассчитывается он по формуле:

$$\mathrm{ROI} = \sum_i \mathrm{NPV}(\mathrm{Benefits}_i) - \sum_i \mathrm{NPV}(\mathrm{Costs}_i), \quad (1)$$

где Costs_i – затраты на внедрение и поддержание *i*-й меры защиты; $\mathrm{Benefits}_i$ – оценка той пользы (т. е. ожидаемого снижения потерь), которую приносит внедрение данной меры защиты; NPV (Net Present Value) – функция, приводящая значения аргумента к ценам на один момент времени (учитывающая поправки на инфляцию и т. д.).

Для вычисления показателя Benefits необходимо ввести количественную оценку риска, и разница оценок до и после внедрения средств защиты даст искомое значение. Если рассматривать

риск реализации определенной угрозы в отношении конкретного ресурса в течение одного года, то оценка для данного риска рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$R = C \cdot k \cdot \omega, \qquad (2)$$

где C – стоимость ресурса; k – коэффициент «разрушительности», показывающий отношение ожидаемого размера потерь к стоимости ресурса; ω – оценка частоты реализации данной угрозы за год. В качестве оценки ω RiskWatch использует определенные Американским институтом стандартов NIST показатели LAFE и SAFE. LAFE (Local Annual Frequency Estimate) показывает, сколько раз в год в среднем рассматриваемая угроза реализуется в данном месте (например, в городе). SAFE (Standard Annual Frequency Estimate) определяет, сколько раз в год в среднем угроза реализуется в данной части света (например, в Северной Америке).

Основная проблема, связанная с применением подобной методики в наших условиях, заключается в том, что реализация ряда преднамеренных угроз ИБ – явление не слишком частое и существенным образом зависящее от специфики деятельности конкретной фирмы. Поэтому набрать достоверную статистику для корректной оценки частоты возникновения подобных инцидентов во многих случаях не представляется возможным, что в целом характерно для методик, использующих количественную оценку.

Другой подход к оценке рисков реализован в методике FRAP, предлагаемой компанией Peltier and Associates. Оценка производится для вероятности возникновения угрозы и ущерба от нее по следующим шкалам. Вероятность (Probability):

высокая (High Probability) – очень вероятно, что угроза реализуется в течение следующего года;

средняя (Medium Probability) – возможно, угроза реализуется в течение следующего года;

низкая (Low Probability) – маловероятно, что угроза реализуется в течение следующего года.

Ущерб (Impact), наносимый активу:

высокий (High Impact) – остановка критически важных бизнес-подразделений, приводящая к существенному ущербу для бизнеса, потере имиджа или неполучению существенной прибыли;

средний (Medium Impact) – кратковременное прерывание работы критических процессов или систем, приводящее к ограниченным финансовым потерям в одном бизнес-подразделении;

низкий (Low Impact) – перерыв в работе, не вызывающий ощутимых финансовых потерь.

Оценка определяется в соответствии с правилом, задаваемым матрицей рисков, изображенной на рис. 1. Полученная оценка уровня риска может интерпретироваться следующим образом:

уровень A – связанные с риском действия должны быть выполнены немедленно и в обязательном порядке;

уровень B – связанные с риском действия должны быть предприняты;

уровень C – требуется мониторинг ситуации (но непосредственных мер по противодействию угрозе принимать, возможно, не надо);

уровень D – никаких действий в данный момент предпринимать не требуется.

Методики, использующие смешанные оценки, могут (в случае с CRAMM) приводить оценки к условным баллам или (как в методике Майкрософт) предполагать проведение оценки на качественном уровне для всех угроз, после чего – на количественном, – для наиболее значимых.

Но, как отмечалось выше, анализ рисков не является полностью достаточной процедурой для выбора средств и механизмов защиты. В частности, выявленные таким образом наиболее эффективные с экономической точки зрения средства защиты могут быть несовместимы между собой или их внедрение в защищаемую систему затруднено.

Использование в этом случае только оценок по формуле (2), по сути близких к математическому ожиданию потерь от реализации угрозы, может исказить общую картину состояния дел предприятия в сфере ИБ.

IMPACT

PROBABILITY	High	Medium	Low
High	**A**	**B**	**C**
Medium	**B**	**B**	**C**
Low	**B**	**C**	**D**

Рис. 1. Матрица рисков FRAP
A – Corrective action must be implemented;
B – Corrective action should be implemented;
C – Recuires monitor; D – No action required at this time

Кроме того, для любой ИС всегда есть недопустимый риск, для снижения которого надо принимать меры, даже если частота реализации нежелательных событий данного класса оценивается как не очень высокая. Поэтому при проектировании важно показать и само значение ожидаемых потерь, связанных с каждым классом угроз безопасности, и то, как внедрение предлагаемых средств и механизмов защиты повлияет на изменение данного значения.

Предлагаемое решение

Предлагаемое решение заключается в том, чтобы сначала сформировать множество допустимых проектов, которые могут быть реализованы в данной ИС и обеспечат в обязательном порядке некий минимально допустимый уровень функциональности, после чего выбрать из сформированного множества наиболее эффективный проект.

Таким образом, если говорить о построении нового или оптимизации состава существующего комплекса средств защиты, то этот процесс можно представить в виде последовательности следующих этапов:

описание ИС и выделение зон безопасности;

сопоставление зонам безопасности наборов требований к функциональности подсистемы защиты ИС;

задание ограничений (на стоимость проекта, сертификацию СЗИ и т. д.);

формирование множества допустимых проектов инфраструктуры обеспечения ИБ;

выбор оптимального проекта.

Необходимо отметить, что под термином «зона безопасности» здесь понимается логически выделенная область ИС, в которой действуют единые требования к функциональности подсистемы защиты. Первые четыре этапа исследования предлагается проводить в рамках разработанной теоретико-множественной модели (табл).

Элементы теоретико-множественной модели ИС

Название	Описание
Множество зон безопасности в ИС	Z
Множество требований к подсистеме обеспечения ИБ	R
Множество значений для требования $r_i \in R$	$V_i = \{v_i\}$, задана операция $\leq$, множество линейно упорядочено
Множество наборов требований	$P = \{p \mid p = \{<r_i,v_i>\}, r_i \in R, v_i \in V_i\}$
Задание на разработку подсистемы обеспечения ИБ в ИС	$T = \{t \mid t = <z,P',R'>, z \in Z, P' \subseteq P, R' \subseteq R\}$ Для $\forall z'' \in Z \ \exists t'' \in T \mid t'' = <z'',P'',R''>, P'' \subseteq P, R'' \subseteq R$
Множество аппаратных платформ	H
Множество операционных систем	OS = {os | os = <os_name, os_ver>}
Встроенные механизмы защиты операционных систем	OSS = {oss | oss = <os, RV, SERT>} os∈OS, RV = $\{<r_i,v_i> \mid r_i \in R, v_i \in V_i\}$, SERT – множество сертификатов, подтверждающих функциональность механизмов защиты
Множество универсального программного обеспечения (ПО)	$S = \{s \mid s = <s$_name, s_ver, H_OS >}, где H_OS = $\{<h,os> \mid h \in H, os \in OS\}$
Встроенные механизмы защиты ПО	SS = {ss | ss = <s, RV, SERT>}
Множество специализированных средств защиты	SEC = {sec | sec = <sec_name, sec_ver, H_OS, RV, SERT, cost>}
Множество элементов ИС	$E = \{e \mid e =$ <name, h, os, S', Z', R', N>, $h \in H$, os∈OS, $S' \subseteq S$, $Z' \subset Z$, $R' \subseteq R$ } name – название элемента S' – установленное ПО Z' – зоны безопасности, к которым относится элемент R' – множество требований к защите, которые нужно выполнить в отношении данного элемента N – число однотипных элементов в данной зоне

Набор требований (обозначим его *P*) – это заранее сформированное множество двоек <*название требования, значение*>, описывающее некоторый функционально законченный набор требований к подсистеме защиты ИС.

Предполагается, что каждому из требований (множество требований обозначим *R*) заранее сопоставлено линейно упорядоченное отношением «≤» множество значений (если *значение*_1 ≤ *значение*_2, то *значение*_2 определяет не менее строгие требования, чем *значение*_1). Подобные наборы требований могут формироваться, например, на базе профилей защиты, введенных стандартом ISO 15408.

В формализованном описании технического задания на проектирование инфраструктуры обеспечения ИБ, каждой зоне безопасности *z* ставится в соответствие одна или несколько двоек <*P*, *R'*>, где *P* – набор требований, *R'*⊆ *R* – подмножество требований, которые надо выполнить в отношении всей зоны в целом, а не отдельных элементов ИС (например, требования по физической защите помещений).

Таким образом, задача создания проекта комплекса средств защиты может рассматриваться как задача построения множества средств и механизмов защиты, суммарная функциональность которых перекроет заданный набор требований. При этом могут использоваться как встроенные механизмы защиты (например, механизмы защиты, которыми располагают операционные системы и прикладное ПО, уже используемое в ИС), так и специализированные средства защиты информации (СЗИ).

В процессе построения комплекса должны учитываться требования применимости внедряемых средств, совместимости их между собой, наличия разрешений и сертификатов и т. д. Все эти требования описываются как ограничения (в виде неравенств, равенств, условия принадлежности к заданному множеству).

Если удалось описать все элементы защищаемой системы (в качестве элементов рассматриваются серверы, рабочие станции, сетевые устройства и т. д.) и есть специальным образом подготовленное формализованное описание доступных средств и механизмов защиты, то можно использовать переборные методы для синтеза проектов инфраструктуры обеспечения ИБ. Например, если процесс формирования проектов отобразить в форме ориентированного дерева (рис. 2), то для того, чтобы сформировать все возможные проекты инфраструктуры обеспечения ИБ, отвечающие поставленным условиям, можно использовать алгоритм поиска с возвратом.

На рис. 2 каждый узел дерева соответствует некоторому подмножеству средств и механизмов защиты. В корне дерева это будет пустое множество. Переход по дуге от исходного узла к порожденному приводит к добавлению в формируемое подмножество очередного СЗИ, обеспечивающего выполнение части еще не выполненных требований из заданного для зоны набора. Достижение концевого (терминального) узла дерева означает, что все требования выполнены (на рисунке это подчеркнутые узлы *C* и *E*) или дальнейшее построение проекта невозможно в силу действующих ограничений (узел *D*). Наличие дуги указывает, что добавление СЗИ не противоречит наложенным ограничениям и не вносит избыточности. Избыточность проявляется в том, что добавление нового СЗИ позволяет безболезненно исключить часть СЗИ, добавленных на предыдущих шагах. Если предполагается дублирование некоторых функций защиты, это указывается с помощью специальных значений для требований. Из узла не может выходить двух или более дуг, соответствующих добавлению одного и того же СЗИ.

Когда множество проектов построено, из него выбирается экономически наиболее эффективный. Выбор предлагается проводить с помощью математического аппарата теории игр, а если точнее – используя одношаговые конечные игры двух игроков (матричные игры) [3]. Использование данного класса моделей определяется следующими свойствами решаемой задачи и допущениями относительно ее характера:

имеется конфликт двух участников (в качестве первого игрока будем рассматривать владельца

Рис. 2. Дерево поиска
для построения фрагмента проекта

или защитника системы, в качестве второго – условный источник всех угроз как преднамеренного, так и непреднамеренного характера);

присутствует фактор неопределенности и отсутствует достоверная статистика (заранее неизвестно, какие угрозы будут реализованы, и как часто будут происходить нежелательные события);

у каждого участника имеется конечное множество альтернатив (чтобы выполнить это требование, множество угроз безопасности предлагается разбить на подмножества, именуемые *обобщенными угрозами*);

можно количественно оценить каждый исход игры;

действия сторон являются однократными или могут быть сведены к суммарному однократному воздействию (выбор проекта производится только один раз).

Множество стратегий первого игрока, назовем его «защитник», определяется тем, что он может выбрать один из сформированных ранее проектов или отказаться от проведения дополнительных мероприятий по увеличению защищенности ИС. Таким образом, если на предыдущих стадиях было сформировано N «допустимых» проектов, то у защитника будет N+1 стратегия. Обозначим это множество через X.

Стратегии второго игрока – «нарушителя» заключаются в реализации одной из обобщенных угроз или отказе от каких-либо действий. Обозначим это множество через Y.

В зависимости от имеющихся знаний и предположений относительно характера нарушителя может использоваться антагонистическая или биматричная игра. В первом случае предполагается, что цель нарушителя – нанести наибольший вред ИС, он располагает очень широкими возможностями, и игра задается следующим образом:

$$\Gamma = \langle X, Y, \mathbf{H} \rangle, \qquad (3)$$

где $\mathbf{H}$ – матрица выигрышей, ее элементы определяются как $h_{ij} = -h_i - \overline{h}_{ij}$, здесь h_i – стоимость реализации i-го проекта, $\overline{h}_{ij}$ – размер потерь в случае если был внедрен i-й проект, но, несмотря на это, нарушителю удалось реализовать j-ю обобщенную угрозу безопасности. Приведенные значения получаются путем экспертных оценок. В любой комбинации выбранных стратегий, выигрыш «защитника» будет меньше или равен нулю, т. к. он несет затраты на обеспечение безопасности, и реализация угроз также наносит ему потери.

Биматричная игра задается так

$$\Gamma = \langle X, Y, \mathbf{H}, \mathbf{H}_2 \rangle, \qquad (4)$$

где $\mathbf{H}_2$ – матрица выигрышей нарушителя, ее элемент $h_{ij} = \tilde{h}_{ij} - \hat{h}_{ij}$, где $\tilde{h}_{ij}$ – оценка выигрыша нарушителя от реализации угрозы, $\hat{h}_{ij}$ – оценка затрат на проведение атаки. В связи с тем, что игрок «нарушитель» – это источник угроз и непреднамеренного характера, то для подобных угроз значение элементов матрицы $\mathbf{H}_2$ предлагается брать равным по модулю и обратным по значению соответствующим элементам $\mathbf{H}$.

Решение игры в чистых стратегиях в случае, если оно существует, укажет на наиболее предпочтительный проект. Решение в смешанных стратегиях может использоваться в качестве отправной точки для дополнительного анализа проектов.

Для выбора оптимального проекта при наличии подобных матриц могут использоваться и другие критерии оптимальности (не только максиминный, на котором основана теория игр). Выбор критерия характеризует стратегию лица, принимающего решение.

В статье представлен подход к проектированию комплекса средств защиты ИС, позволяющий учитывать как технический, так и экономический эффект от внедрения СЗИ. Это выгодно отличает его от существующих методик. В то же время «узким местом» предлагаемого решения, равно как и большинства других методик анализа рисков в сфере ИБ, является то, что исходные данные приходится получать методом экспертных оценок, и при использовании «точечных» оценок их достоверность может вызвать сомнения. Один из возможных путей решения этой проблемы – переход к интервальным оценкам. По развитию предложенной методики в данном направлении ведутся работы.

Работа проведена при финансовой поддержке ЗАО «Лаборатория Касперского» в форме гранта в рамках Программы поддержки инновационных проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александрович, Г.Я.** Автоматизация оценки информационных рисков компании [Текст] / Г.Я. Александрович, С.А. Нестеров, С.А. Петренко // Защита информации. Конфидент. –2003. –№ 2. –С.78–81.

2. **Нестеров, С. А.** Информационная безопасность и защита информации: Учеб. пособие [Текст] / С.А. Нестеров. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 198 с.

3. **Дюбин, Г.Н.** Введение в прикладную теорию игр [Текст] / Г.Н. Дюбин, В.Г. Суздаль. –М.: Наука, 1981. – 336 с.

УДК 378 (001.891)

В.Е. Магер, А.А. Саралийский, А.В. Стеганцов, Л.В. Черненькая

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СПБГПУ

В рамках реализации Программы модернизации и развития СПбГПУ как национального исследовательского университета предусмотрено развитие и совершенствование системы менеджмента качества (СМК), которая должна аккумулировать данные существующих в Университете информационных систем, обеспечивать сбор и хранение данных о деятельности Университета и его подразделений, а также создавать единое информационное пространство по управлению качеством. Такая система разрабатывается в Корпоративном центре качества (КЦК) СПбГПУ.

Цель разработки информационной системы (ИС) менеджмента качества образовательного учреждения – создание инструмента для предоставления руководству достоверной информации для принятия решений по проведению управляющих и корректирующих воздействий. Существующие методики ориентированы на контроль выполнения вузом показателей государственной аккредитации, оценку динамики рейтинга вуза, но не позволяют проводить анализ причин неудовлетворительного состояния этих показателей, поэтому данный проект подразумевает разработку дополнительных методик оценки качества деятельности вуза.

В настоящее время в СПбГПУ внедрено несколько информационных систем, на их основе создан Информационный портал СПбГПУ, состоящий из нескольких Интернет-приложений. Эти системы используют интегрированную базу данных. Поскольку СМК планируется как продолжение и развитие общей информационной системы вуза, наиболее логичным представляется использование накопленных данных, при этом необходимо обеспечить ввод дополнительных данных, которых нет ни в одной из существующих систем.

На основе проведенных исследований требования к функциональности информационной системы СМК могут быть сформулированы следующим образом:

мониторинг исходных параметров;
расчет показателей качества;
анализ и визуализация результатов контроля;
автоматизация отчетов;
поддержка принятия управленческих решений;
прогнозирование изменения тех или иных показателей деятельности высшего учебного заведения.

При этом необходимо учесть следующие особенности.

• Интерфейс системы должен сочетаться с одновременным вводом большого массива данных. Необходимо предварительное заполнение базы данных (БД) посредством импорта доступных данных, при этом обязательно обеспечение их валидации.

• Помимо разделения данных по временным слоям, необходимо также организовать связность данных между слоями и аудит (логирование) изменений данных.

• Информация в различных базах данных Университета может отличаться.

• Не все данные представлены в существующих базах данных, часть данных необходимо собирать иными средствами, поэтому должен быть реализован модуль удаленного ввода данных на уровне структурных подразделений Университета, а также разработан web-интерфейс, также предоставляющий доступ к импортированным данным для валидации.

• Система должна иметь надежную подсистему защиты информации, т. к. базы данных, входящие в состав разрабатываемой ИС, относятся к государственным информационным ресурсам и требуют обеспечения унификации программных продуктов, а также обеспечения необходимого уровня защиты информации (как на программном, так и на аппаратном уровне).

В процессе разработки СМК проанализированы различные системы безопасности и принят вариант ролевой политики безопасности. В разрабатываемой системе пользователи делятся на несколько групп с разными правами доступа.

На основе анализа требуемой информации составлен список данных, которые необходимо хранить в системе, построена реляционная модель и разработана структура базы данных СМК. Также описаны способы взаимодействия пользователей с системой, разработаны соответствующие интерфейсы.

Особое внимание в процессе создания и развития СМК требует модуль поддержки принятия решений, при этом актуальна задача разработки формального аппарата для поддержки принятия управленческих решений на различных уровнях управления вузом.

Один из способов такой формализации – использование аналитической информации, полученной на базе применения математических методов обработки статистических данных, характеризующих деятельность образовательных учереждений. В соответствии с поставленной целью (разработка инструментов управления деятельностью Университета на базе применения статистических методов), необходимо решить ряд следующих задач:

разработать методики анализа массивов статистической информации, отражающих состояние как вуза в целом, так и его отдельных подразделений и процессов деятельности;

разработать рекомендации по использованию аналитической информации для принятия управленческих решений в вузе;

провести апробацию разработанных методик на базе имеющихся статистических данных.

В КЦК проведены исследования в области прикладных задач, решаемых методами математической статистики, определен круг задач и возможность их формализации применительно к рассматриваемой системе. Выполнен сравнительный анализ программных продуктов, предоставляющих аппарат для статистической обработки информации.

Статистическая обработка данных позволяет изучать разнообразные закономерности и высказывать предположения о природе тех или иных связей. С целью выявления взаимосвязей применяется совокупность методов корреляционного и дисперсионного анализа [1]. Для решения задач восстановления зависимостей и прогнозирования логично использовать регрессионный анализ и анализ временных рядов соответственно, т. к. методы регрессионного анализа ориентированы на работу с данными стационарной системы, а анализ временных рядов – на динамические данные во временном пространстве. Для решения задачи получения интегральных показателей качества можно воспользоваться общими статистическими методами, а также методами анализа вариационных рядов.

Первоочередная задача – выявление взаимосвязей между признаками, характеризующими образовательные объекты. Важная особенность анализируемых данных – неопределенность функции их распределения и возможных видов взаимосвязей. Следовательно, необходимо использовать набор методов, позволяющих выявлять различные виды связей: линейные и криволинейные. Для этого предлагается использовать коэффициенты корреляции Пирсона (как наиболее адекватную характеристику линейной связи), коэффициенты Спирмена и Фехнера (для выявления криволинейных монотонных связей), а также наиболее универсальный показатель связи – корреляционное отношение [2]. На основании сравнения данных коэффициентов для любой пары признаков можно сделать вывод о характере выявленной связи.

Помимо парной взаимосвязи существуют также множественные связи, когда значение признака зависит от нескольких других. Для оценки степени влияния каждого признака в группе взаимосвязанных признаков предлагается использовать коэффициент частной корреляции и соответствующие методы теории графов, позволяющие выявлять многоэлементные группы взаимосвязанных переменных.

Вторая задача – восстановление функциональных зависимостей между признаками на основе выявленных между ними взаимосвязей. По теореме Маркова оценка методом наименьших квадратов (МНК) среди линейных несмещенных оценок является наилучшей оценкой (в смысле наименьшей дисперсии ошибок). Для оценки параметров регрессионной модели в линейном случае целесообразно использовать метод Гаусса как наиболее простой и эффективный. В случае нелинейных моделей метод Гаусса не работает, поэтому предлагается использовать алгоритм Левенберга–Марквардта, т. к. в нем устранены недостатки метода сопряженных градиентов и метода Гаусса–Ньютона [3]. Существенный аргумент в пользу выбора данного алгоритма – его широкое использование в статистических прикладных программных пакетах и статистических исследованиях.

При анализе многомерных моделей предпочтение отдается методу шаговой регрессии как более простому (по сравнению с МНК) и удовлетворяющему решению поставленной задачи: выделению факторов, оказывающих существенное влияние на результативный показатель.

Для решения задачи ранжирования объектов (установления рейтинга) самым приемлемым является метод введения эталонных объектов [4]. Преимущество данного метода заключается в том, что с его помощью можно формировать объекты, имеющие определенные показатели, удовлетворяющие требованиям вышестоящих органов системы высшего образования и требованиям, сформированным непосредственно в вузе, относящимся к выполнению конкретных процессов образовательной деятельности.

Наиболее предпочтительные прикладные статистические пакеты – SPSS, Statistics и MATLAB (Statistics toolbox), что обусловлено высокой скоростью вычислений, удобным интерфейсом и расширенными возможностями визуализации результатов.

Задача прогнозирования показателей деятельности вуза является одной из самых востребо-

ванных в сфере управления [5] и может осуществляться на базе рассмотренных выше методик по следующим признакам:

по конкретному признаку конкретного объекта;

по интегрированным показателям признаков;

по рейтинговым показателям.

При выборе модели прогнозирования необходимо руководствоваться тем, что наиболее вероятная модель анализа динамики показателей деятельности вуза – зависимость уровней динамического ряда от показателей прошлых лет. Тренды, учитывающие сезонность, как правило, применимы в случае оценки экономических показателей. Другой аспект выбора модели, не учитывающий сезонность, – интервал измерения показателей деятельности в выбранной системе, обычно составляющий один учебный год. Оценка трендовой составляющей при прогнозировании производится в случае достаточно длительного ряда наблюдений.

В связи с недостаточной глубиной статистических данных трендовую составляющую рассматривать нецелесообразно. Исходя из перечисленных выше доводов, оптимальным методом для решения поставленной задачи является метод экспоненциального сглаживания.

Разработанные методики позволят решать задачи выявления связей между признаками и объектами, строить приближенные функциональные взаимозависимости параметров системы различной размерности, ранжировать объекты по степени соответствия наиболее оптимальным параметрам системы, а также проводить прогноз будущих значений параметров системы и объектов различной глубины декомпозиции.

На базе показателей деятельности СПбГПУ проведена апробация разработанных методик. В настоящее время в КЦК ежегодно собираются данные по базовым показателям деятельности СПбГПУ, предоставляемые в Министерство образования и науки РФ для государственной аккредитации вуза, аттестации и расчета рейтинга вузов. Мониторинг выполнения показателей государственной аккредитации в СПбГПУ проводится не только на уровне Университета в целом, но и на уровне структурных подразделений (факультетов, институтов) с целью выявления критических направлений деятельности вуза [6].

В соответствии с целями исследования в качестве класса объектов, для которых будет проводиться анализ, рассматриваются факультеты и институты СПбГПУ. Это обусловлено тем, что сбор базовых данных по факультетам и институтам является наиболее последовательным в данный момент. В связи с небольшим количеством факультетов предлагается при анализе взаимосвязей использовать данные за несколько лет. При рассмотрении статистической информации необходимо учитывать различные уровни детализации данных. Так, первым уровнем являются базовые показатели, вторым – локальные критерии при расчете рейтинга факультетов, третьим – интегральные критерии. При применении разработанных методик проводится рассмотрение различных уровней детализации данных. Пример использования методики поиска взаимосвязей между показателями произведен на базе локальных критериев оценки деятельности факультетов, выступающих в качестве признаков [7].

В заключение следует отметить, что модель принятия управленческих решений на базе анализа статистической информации, разработанная для оценки деятельности высшего учебного заведения, не является специфичной для конкретной области или конкретного объекта и может быть применена для оценки организаций, независимо от сферы деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моисеев, Н.Н.** Математические задачи системного анализа [Текст] / Н.Н. Моисеев. –М.: Наука, 1981. –487 с.

2. **Демиденко, Е.З.** Оптимизация и регрессия [Текст] / Е.З. Демиденко. –М.: Наука, 1989. –342 с.

3. **Ким, Дж.-О.** Факторный, дискриминантный и кластерный анализ [Текст] / Дж.-О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка [и др.]; Пер. с англ.; Под ред. И.С. Енюкова. –М.: Финансы и статистика, 1989. –215 с.

4. **Шенк, Х.И.** Теория инженерного эксперимента [Текст] / Х.И. Шенк. –М.: Мир, 1972. –388 с.

5. **Козлов, В.Н.** Расчет рейтинга вуза, специальностей и направлений подготовки. Категорирование факультетов: Метод. рекомендации [Текст] / В.Н. Козлов, В.Е. Магер, А.И. Рудской [и др.] // Управление качеством в Политехническом университете. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – Вып. 11. –191 с.

6. **Саралийский, А.А.** Разработка информационной системы менеджмента качества СПбГПУ [Текст] / А.А. Саралийский, Л.В. Черненькая // Управление качеством в Политехническом университете. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – Вып. 14. –159 с.

7. **Козлов, В.Н.** Расчет рейтинга вуза, специальностей и направлений подготовки, внутренний рейтинг СПбГПУ: Метод. рекомендации [Текст] / В.Н. Козлов, В.Е. Магер, А.В. Речинский, А.И. Рудской [и др.] // Управление качеством в Политехническом университете. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –Вып. 16. –136 с.

УДК 621.391:004.421

С.В. Шедов

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ СТАНЦИОННЫХ ПОМЕХ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛЧМ-СИГНАЛОВ

Обнаружение информативных сигналов в условиях шумов и помех – одна из важнейших задач первичной обработки сигналов. Для этого применяются методы частотной и временной фильтрации, оптимальной фильтрации и т. д. [1, 2]. Наиболее сложной задача обнаружения становится, когда свойства помех изменяются со временем. В этом случае применяются адаптивные фильтры, характеристики которых периодически подстраиваются под изменяющиеся свойства шума. Задача обнаружения сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнала) спутников в потоке мгновенных частотных спектров относится именно к таким задачам и может решаться с использованием известных подходов. Однако учет собственной формы и периодичности появления в потоке мгновенных спектров ЛЧМ-сигналов и характерных особенностей шума позволило создать новый, более эффективный способ борьбы с шумами – компенсацию помех.

При детектировании сигналов в сумме с основным информационным сигналом одновременно регистрируются и мешающие сигналы – шумы и помехи самой различной природы. К помехам относят искажения информационных сигналов под влиянием различных дестабилизирующих факторов на процессы измерений. Выделение информационных составляющих из зарегистрированных сигналов или максимальное подавление шумов и помех в информационном сигнале при сохранении его полезных составляющих – одна из основных задач первичной обработки сигналов (результатов наблюдений).

Как правило, случайные шумовые помехи (аддитивные) порождаются различного рода физическими флуктуациями – случайными отклонениями тех или иных физических величин от своих средних значений. Природа флуктуаций обычно определяется статистической природой физических процессов. Многие физические величины представляют собой результаты усреднения определенных параметров физических процессов, дискретных и случайных по своей природе. Дискретной является природа электромагнитных видов излучения – дискретный квант энергии излучения (фотон) определен значением hv, где h – постоянная Планка, v – частота. Флуктуации физических величин, дискретных и случайных по своей природе, принципиально неустранимы, и речь может идти только о том, чтобы уменьшать

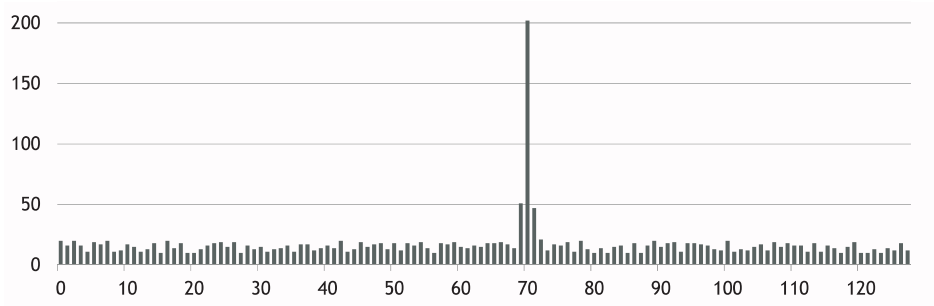


Рис. 1. Частотный спектр, содержащий фрагмент ЛЧМ-сигнала

их относительную величину имеющимися в распоряжении средствами [6].

При решении конкретной задачи – обнаружении и определении параметров (амплитуды, центральной частоты, ширины полосы) спутникового ЛЧМ-сигнала, мы имеем дело с потоком мгновенных спектров ЛЧМ-сигнала, полученных с помощью БПФ. В каждом спектре (кадре), содержащем N (например, 128) дискретных значений, содержится шумовой фон и может содержаться одно или несколько дискретных информативных значений, принадлежащих ЛЧМ-сигналу (рис. 1). В каждом из последующих спектров информативное значение сдвигается в сравнении с предыдущим кадром (анализируемая частота ЛЧМ-сигнала изменяется).

Известным способом реконструкции ЛЧМ-сигнала по полученным мгновенным M спектрам (рис. 2) является суммирование этих M кадров (спектров). Определение параметров ЛЧМ-сигнала (ширина, амплитуда и положение в спектральном окне) производится по реконструированному спектру (нижняя часть рисунка). Если априори девиация частоты (ширина полосы) и скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала или временная длительность излучения одного ЛЧМ-сигнала неизвестны, то количество суммируемых кадров M выбирается исходя из максимально возможной девиации частоты или максимальной временной длительности излучения одного ЛЧМ-сигнала.

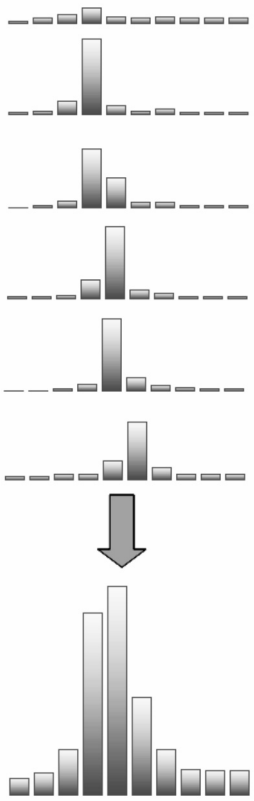


Рис. 2. Последовательность спектров и их сумма

Трудности при анализе таких сигналов возникают тогда, когда в кадре помимо полезного сигнала присутствуют шумы и помехи (реальный сигнал). В этом случае простое суммирование приводит к ошибке при обработке стандартными алгоритмами.

Рассмотрим два примера, когда необходима дополнительная обработка кадров. В первом случае амплитуда в кадрах недостаточно велика, чтобы при суммировании определить параметры ЛЧМ-сигнала. В просуммированном векторе амплитуда полезного сигнала на уровне шума. Во втором случае на фоне полезного сигнала присутствует станционная помеха с амплитудой, превышающей полезный сигнал. Проведя покадровое суммирование, получаем вектор, в котором амплитуда полезного сигнала многократно меньше станционной помехи. При стандартной обработке полезный сигнал будет принят за шум. Обнуление значений вектора помехи в общем случае сделать невозможно ввиду неопределенности ее расположения в спектральном окне.

Для решения указанных проблем разработан адаптивный алгоритм, позволяющий выделять полезный сигнал при наличии флуктуационного шума и станционной помехи [3, 4].

Идея алгоритма заключается в нахождении взаимных коэффициентов корреляции кадров с другими кадрами (в анализируемой группе кадров), суммировании этих значений и получении вектора-признака, указывающего, какие кадры должны участвовать в нахождении среднего кадра группы кадров. Аналогично определяется вектор-признак вхождения элементов (i-й элемент каждого кадра с другими элементами этих же кадров) группы кадров с помощью коэффициентов ковариации. С помощью этих двух векторов определяются элементы в группе кадров, в которых содержится ЛЧМ-сигнал. Далее определяется средний кадр. Для этого суммируются не содержащие ЛЧМ-сигнал элементы группы кадров и делятся на количество таких элементов. На заключительном шаге суммируются исходные кадры и из них вычитается средний кадр, умно-

женный на количество кадров в группе. Таким образом, получается просуммированный и очищенный от шума ЛЧМ-сигнал. Данный алгоритм способен бороться как с флуктуационными, так и с постоянными станционными помехами [5].

Описание адаптивного алгоритма.

1. Начальные установки значений M, $S = 2M$, H, $i = 0$, $P_0 = -M$, $M \geq H / h$, где H – полоса частот ЛЧМ-сигнала, h – ширина полосы частот в мгновенном спектре БПФ.

2. Вычисление начального номера кадра i-й группы кадров $P_{i+1} = P_i + S - M + 1$.

Получаем $P_1 = 1$, т. е. начинаем анализировать с первого кадра. На каждой итерации производится анализ S кадров. Отступая назад на M кадров, производится повторный анализ уже просмотренных спектров. Так как $S = 2M$, гарантированно будут проанализированы все кадры. Такой способ просмотра кадров выбран для того, чтобы увидеть все кадры, содержащие ЛЧМ-сигнал.

3. Накопление S последовательных мгновенных спектров (кадров) из последовательного потока спектров:

$$Z = \sum_{j=1}^{S} X_j ,$$

где X_j – j-й спектр, (одномерный массив), содержащий N дискретных значений сигнала.

4. Вычисление матрицы размерностью $S*S$ коэффициентов корреляции R_{ij} (нормализованную функцию ковариации) каждого из S спектров с остальными, $i, j = 1..S$

$$R_{ij} = \frac{\mathrm{cov}(X_i, X_j)}{\sqrt{D[X_i]} * \sqrt{D[X_j]}},$$

где $D[X_i]$, $D[X_j]$ – дисперсии i-го и j-го спектров.

Вычисление матрицы размерностью $N*N$ коэффициентов ковариации cov_{ij} каждого из N спектров с остальными, $i, j = 1..N$.

Нахождение ковариационной матрицы размерностью $N*N$ связано с тем, что в анализируемой группе кадров i-е элементы могут совпадать. Дисперсия набора этих равных i-х элементов будет равна нулю. Соответственно, взаимная корреляция кадров друг с другом не может быть найдена.

5. Суммирование коэффициентов корреляции в матрице по столбцам и усреднение, т. е. вычисление среднего значения коэффициентов корреляции для каждого спектра с остальными $S - 1$ спектрами:

$$\overline{R}_i = (\sum_{j=1}^{S} R_{ij}) - R_{ii} \ , i = 1..S .$$

Суммируем также матрицу коэффициентов ковариации:

$$\overline{\mathrm{cov}_i} = \sum_{j=1}^{N} \mathrm{cov}_{ij} \ , i = 1..N .$$

6. Суммирование спектров, среднее значение для коэффициента корреляции которых меньше порогового значения L, а также среднее значение для коэффициентов ковариации больше M и усреднение (получение усредненного спектра станционной помехи Y):

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{S}\sum_{j=1}^{N} X_i H(\overline{R}_i - L) H(M - \overline{\mathrm{cov}_j})}{\sum_{i=1}^{S}\sum_{j}^{N} H(\overline{R}_i - L) H(M - \overline{\mathrm{cov}_j})},$$

$$L = \frac{\overline{R}_{\max} + \overline{R}_{\min}}{2}, \ M = \frac{\overline{\mathrm{cov}}_{\max} + \overline{\mathrm{cov}}_{\min}}{2},$$

$$H(x) = \begin{cases} 0, x < 0; \\ 1, x \geq 0. \end{cases}$$

7. Получение результирующего спектра ЛЧМ-сигнала W путем вычитания из накопленных (см. п. 3) спектров усредненной суммы спектров станционной помехи (см. п. 6), умноженной на S:

$$W = Z - Y \cdot S,$$

где W, Z, Y – одномерные массивы размерностью N.

8. Инкремент i и переход к п. 2.

В таблице приведен пример вычисленной матрицы коэффициентов корреляции R_{ij} группы из 20 спектров реальных сигналов спутника, в спектрах с 9 по 19 содержатся частотные линии ЛЧМ-сигнала. Номер столбца таблицы – i, номер строки – j. В аналогичном виде представляется ковариационная матрица. Аналогичная матрица размерностью $N*N$ состоит из коэффициентов ковариации. Пересечение по строкам и столбцам указывает расположение информативного сигнала.

На рис. 3 *а* приведен график среднего значения коэффициента корреляции i-го спектра со всеми остальными и пороговый уровень, на рис. 3 *б* – график коэффициентов ковариации. На рис. 4 *а*, *б* приведены примеры накопленных спектров без обработки и после обработки. С учетом того, что в данном случае $M = 10$, $h = 0{,}6$, ширина полосы частот ЛЧМ-сигнала H составляет 10 * 0,6 = 6 линий дискретизированного спектра.

Нахождение полезного сигнала в группе кадров, представленных матрицей, по сути, являет-

Матрица коэффициентов корреляции

1,00	0,97	0,55	0,25	0,41	0,39	0,40	0,39	0,39	0,40	0,39	0,40	0,39	0,39	0,40	0,38	0,39	0,34	0,40	0,38
0,97	1,00	0,67	0,39	0,45	0,36	0,40	0,38	0,39	0,41	0,39	0,38	0,39	0,38	0,41	0,38	0,38	0,35	0,39	0,38
0,55	0,67	1,00	0,93	0,65	0,41	0,43	0,43	0,43	0,45	0,44	0,42	0,42	0,42	0,41	0,41	0,43	0,42	0,42	0,42
0,25	0,39	0,93	1,00	0,62	0,35	0,37	0,37	0,38	0,40	0,36	0,36	0,37	0,36	0,36	0,35	0,36	0,37	0,37	0,36
0,41	0,45	0,65	0,62	1,00	0,76	0,80	0,80	0,79	0,89	0,78	0,76	0,78	0,80	0,85	0,79	0,81	0,77	0,79	0,90
0,39	0,36	0,41	0,35	0,76	1,00	0,90	0,92	0,90	0,79	0,88	0,87	0,88	0,91	0,74	0,90	0,90	0,91	0,86	0,80
0,40	0,40	0,43	0,37	0,80	0,90	1,00	0,94	0,94	0,84	0,95	0,91	0,92	0,93	0,79	0,93	0,94	0,94	0,94	0,82
0,39	0,38	0,43	0,37	0,80	0,92	0,94	1,00	0,95	0,84	0,92	0,96	0,93	0,93	0,81	0,92	0,95	0,95	0,94	0,82
0,39	0,39	0,43	0,38	0,79	0,90	0,94	0,95	1,00	0,82	0,93	0,96	0,97	0,93	0,81	0,94	0,93	0,95	0,96	0,83
0,40	0,41	0,45	0,40	0,89	0,79	0,84	0,84	0,82	1,00	0,81	0,80	0,82	0,81	0,93	0,81	0,83	0,83	0,82	0,89
0,39	0,39	0,44	0,36	0,78	0,88	0,95	0,92	0,93	0,81	1,00	0,92	0,90	0,92	0,79	0,91	0,94	0,95	0,90	0,82
0,40	0,38	0,42	0,36	0,76	0,87	0,91	0,96	0,96	0,80	0,92	1,00	0,94	0,91	0,80	0,94	0,94	0,94	0,94	0,81
0,39	0,39	0,42	0,37	0,78	0,88	0,92	0,93	0,97	0,82	0,90	0,94	1,00	0,94	0,82	0,93	0,92	0,93	0,95	0,81
0,39	0,38	0,42	0,36	0,80	0,91	0,93	0,93	0,93	0,81	0,92	0,91	0,94	1,00	0,81	0,93	0,93	0,94	0,92	0,83
0,40	0,41	0,41	0,36	0,85	0,74	0,79	0,81	0,81	0,93	0,79	0,80	0,82	0,81	1,00	0,80	0,81	0,80	0,81	0,92
0,38	0,38	0,41	0,35	0,79	0,90	0,93	0,92	0,94	0,81	0,91	0,94	0,93	0,93	0,80	1,00	0,92	0,94	0,94	0,85
0,39	0,38	0,43	0,36	0,81	0,90	0,94	0,95	0,93	0,83	0,94	0,94	0,92	0,93	0,81	0,92	1,00	0,94	0,94	0,84
0,34	0,35	0,42	0,37	0,77	0,91	0,94	0,95	0,95	0,83	0,95	0,94	0,93	0,94	0,80	0,94	0,94	1,00	0,92	0,81
0,40	0,39	0,42	0,37	0,79	0,86	0,94	0,94	0,96	0,82	0,90	0,94	0,95	0,92	0,81	0,94	0,94	0,92	1,00	0,83
0,38	0,38	0,42	0,36	0,90	0,80	0,82	0,82	0,83	0,89	0,82	0,81	0,81	0,83	0,92	0,85	0,84	0,81	0,83	1,00

ся нахождением объекта координат по двум осям. На оси X отложена сумма коэффициентов взаимной корреляции кадров друг с другом, по оси Y – сумма коэффициентов взаимной ковариации i-х элементов с другими группами элементов матрицы. В случае, если полезного сигнала в группе кадров нет, то результатом будет некоторый некомпенсированный шум (рис. 4 *г*), если же в группе есть ЛЧМ-сигнал, то в результате получаем исключительно его (рис. 4 *в*) (координаты по осям X и Y точно указывают на него).

По рис. 4 видно, что в результате вычитания

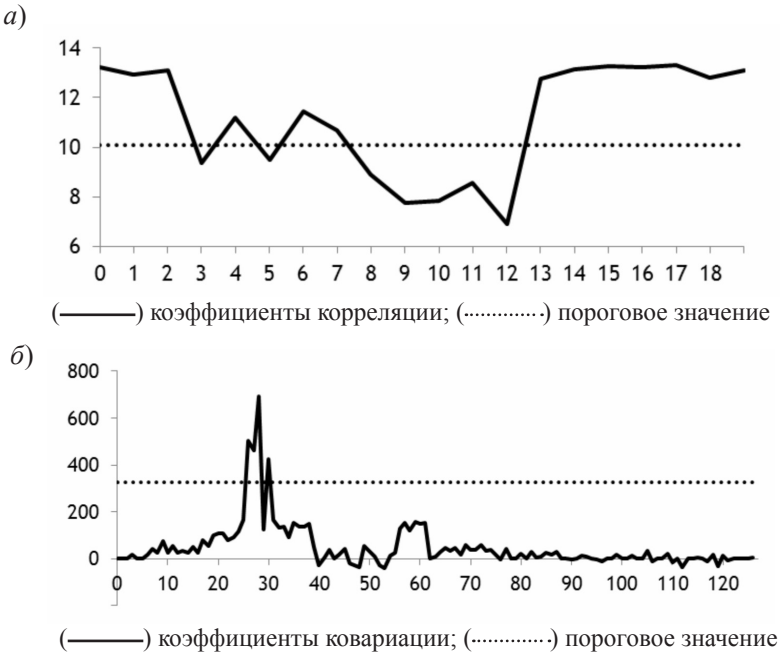


Рис. 3. Значения коэффициентов корреляции i-го спектра со всеми остальными и пороговый уровень (*а*) и коэффициентов ковариации j-х элементов (*б*)

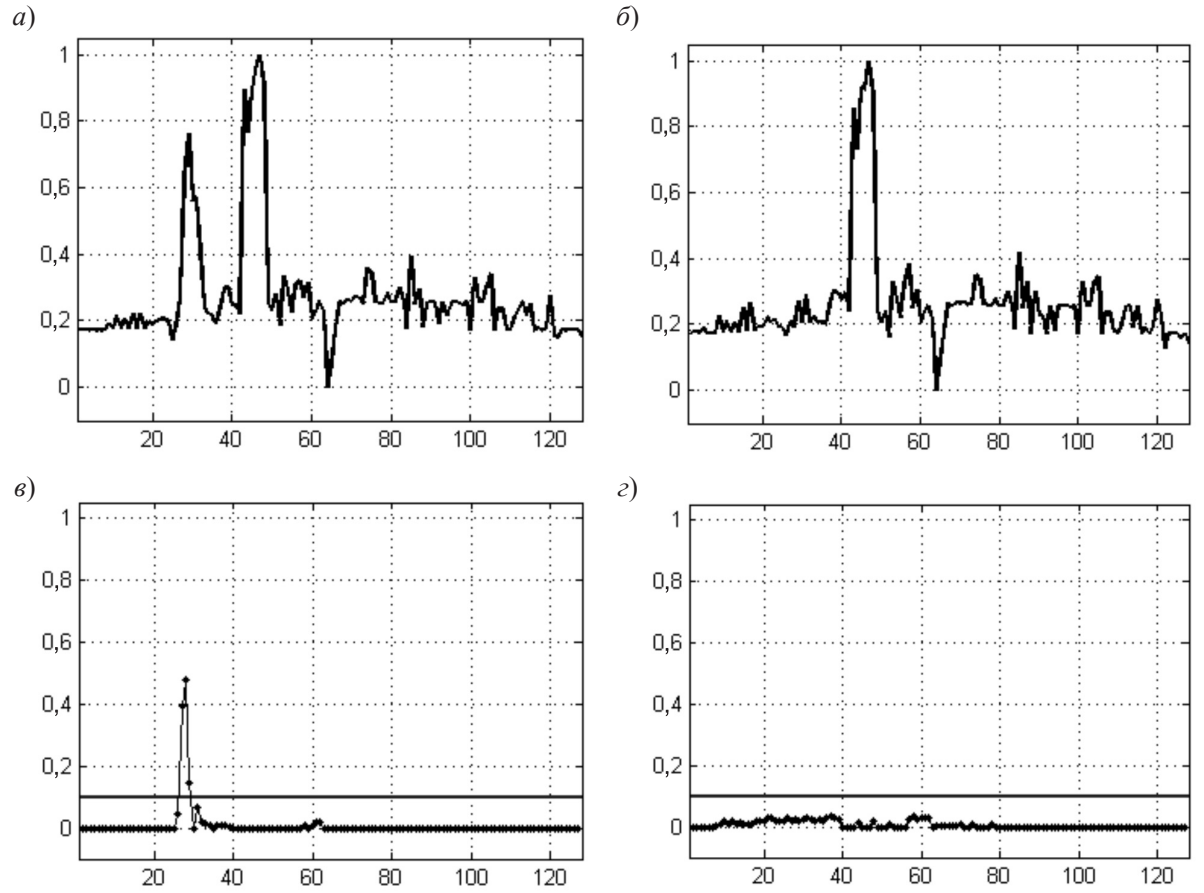


Рис. 4. Результат накопления 20 последовательных мгновенных спектров без вычитания станционной помехи (*а*, *б*) и после вычитания станционной помехи при использовании адаптивного алгоритма (*в*, *г*)

шумоподобной станционной помехи с помощью предлагаемого адаптивного алгоритма, станционная помеха, распределенная по всей полосе частот, ослаблена в несколько раз, а сосредоточенная станционная помеха большой амплитуды полностью скомпенсирована. При отсутствии в накапливаемых спектрах элементов ЛЧМ-сигнала в результате применения предлагаемого адаптивного алгоритма станционная помеха компенсируется полностью (рис. 4 *г*) и уменьшается флуктуационная помеха (которая в реальном сигнале всегда присутствует), благодаря чему уменьшается вероятность ложного обнаружения ЛЧМ-сигнала.

Таким образом, предложенные адаптивные алгоритмы обеспечивают надежное обнаружение ЛЧМ-сигнала, в т. ч. и в случае, когда одновременно с ЛЧМ-сигналом присутствует распределенная и сосредоточенная станционная помеха. Алгоритм может быть применен для обнаружения и определения параметров других спутниковых широкополосных сигналов по их частотным спектрам. Рассмотренные адаптивные алгоритмы обработки зашумленного ЛЧМ-сигнала автоматически подстраиваются под шумоподобную систематическую составляющую помехи.

Использование предложенного нового адаптивного алгоритма дополнительной цифровой обработки спектров позволяет значительно улучшить возможности обнаружения зашумленных ЛЧМ спутниковых сигналов. Работа адаптивного алгоритма была проверена при анализе ЛЧМ-сигналов спутников RadarSat1, RadarSat2, EnviSat и Ers2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макс, Ж.** Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х т. [Текст] / Ж. Макс. –М.: Мир, 1983.

2. **Сергиенко, А.Б.** Цифровая обработка сигналов [Текст] / А.Б. Сергиенко. –СПб.: Питер, 2006. –751с.

3. **Тутыгин, В.С.** Новые адаптивные алго-

ритмы обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигналов [Текст] / В.С. Тутыгин, С.В. Шедов, А.В. Южаков // Цифровая обработка сигналов. –2011. –№1. –С.16–23.

4. **Тутыгин, В.С.** Программа оптимального обнаружения ЛЧМ-сигнала [Текст] / В.С. Тутыгин, С.В. Шедов // Свид. Роспатента № 2010611782 от 28.05.2010.

5. **Тутыгин, В.С.** Программа обнаружения и идентификации параметров дискретизированного ЛЧМ-сигнала [Текст] / В.С. Тутыгин, С.В. Шедов // Свид. Роспатента № 2009615691 от 13.10.2009.

6. **Давыдов, А.В.** Цифровая обработка сигналов [Электронный ресурс] / А.В. Давыдов // Режим доступа: http://prodav.narod.ru/ textbook/index.html

УДК 621.391:004.421

В.С. Тутыгин

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ЗАШУМЛЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ

Известный способ измерения расстояния до объекта основан на измерении времени задержки отраженного радиолокационного эхо-сигнала от возбуждающего радиоимпульса. Такой способ применяется, например, в электромагнитно-акустических (ЭМА) толщиномерах [1], использующих принцип измерения времени прохождения ультразвукового импульса, порождаемого радиоимпульсом, через металлическое изделие.

В этом случае источник радиоимпульса помещается у одной поверхности металлического изделия, и регистрируется эхо-сигнал, отраженный от другой поверхности. По времени задержки эхо-сигнала от возбуждающего радиоимпульса определяется толщина металла. При коррозии металлических изделий эхо-сигнал оказывается значительно зашумлен (рис. 1 *а*), что приводит к уменьшению точности определения временной задержки и, следовательно, к уменьшению точности определения толщины металла.

Для улучшения отношения сигнал/шум в эхо-сигнале могут применяться различные методы, такие, как временная фильтрация (накопление), оптимальная частотная фильтрация, прямое и обратное преобразование Фурье, корреляционный анализ [2, 3].

Влияние шума в регистрируемом эхо-сигнале во временной области можно значительно уменьшать за счет многократного повторения эксперимента и синхронного накопления эхо-сигналов (рис. 1 *б*).

Однако увеличение количества накоплений позволяет улучшать отношение сигнал/шум без искажения формы и уменьшения амплитуды на-

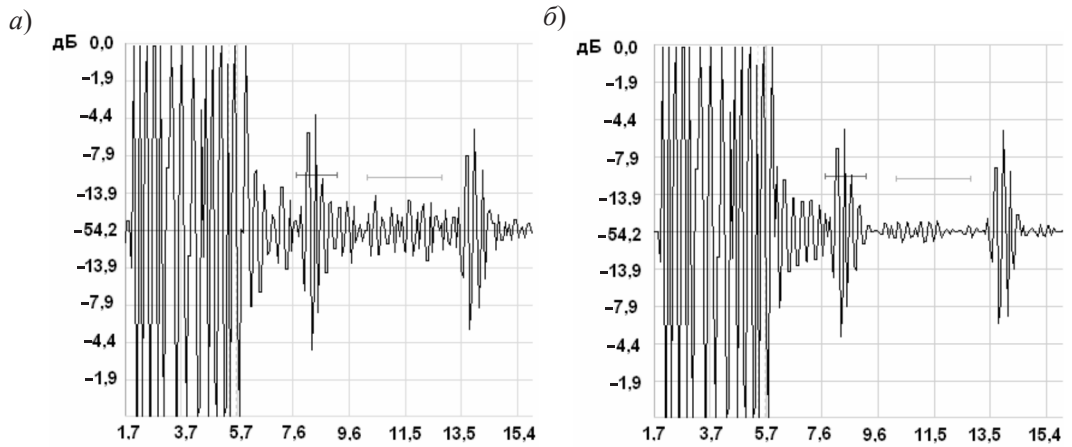


Рис. 1. Исходный (*а*) и накопленный (*б*) эхо-сигнал ЭМА толщиномера
Количество накоплений – 16

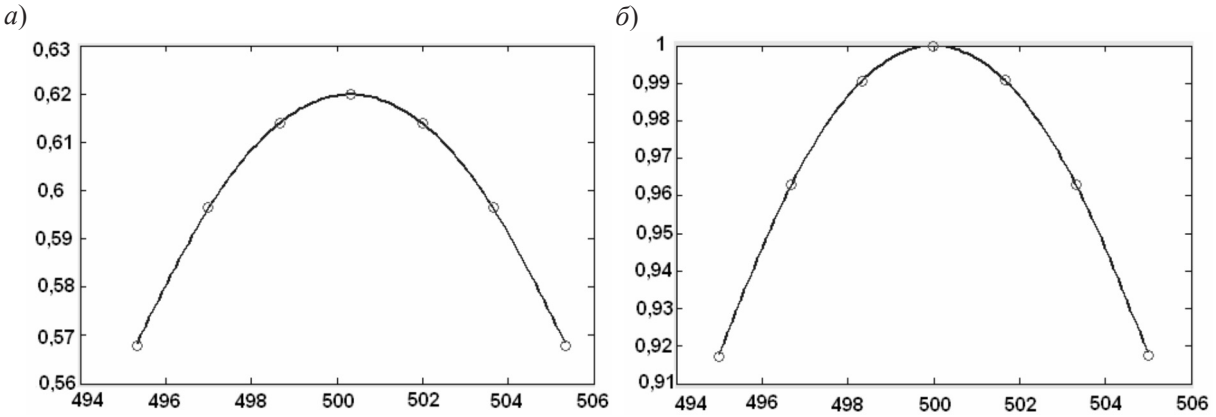


Рис. 2. Зависимость коэффициента корреляции
от временного сдвига при отсутствии шума (*а*) и при отношении сигнал/шум 2/1 (*б*)
Точное значение времени сдвига равно 500. Вычисленное значение времени сдвига равно 499,998 (*а*) и 500,327 (*б*).
Заданная точность вычисления – 0,001. Для построения графиков использована функция сплайн-аппроксимации spaps
в MATLAB

копленного эхо-сигнала лишь до некоторого предела. После этого предела накопление уже не приносит ощутимого улучшения качества. В частности, при большом времени накопления на эхо-сигнал начинают влиять постепенные изменения параметров узлов, входящих в состав прибора для измерения толщины металла. При ограничении времени проведения анализа количество возможных накоплений сигнала должно быть ограничено или вообще должно отсутствовать. Поэтому задача повышения точности измерения временного сдвига зашумленных эхо-сигналов актуальна.

Использование традиционного подхода определения временного сдвига по максимуму эхо-сигнала или автокорреляционной функции для зашумленного сигнала не позволяет получить точное значение временного сдвига. Но, поскольку форма и начальная фаза эхо-сигналов известны, это дает возможность создать эталонные сигналы, соответствующие ожидаемому эхо-сигналу по форме и начальной фазе, и произвести их корреляционное сравнение. Коэффициент корреляции эхо-сигнала с эталонным сигналом будет равен единице, если частоты эхо-сигнала и эталонного сигнала равны и эхо-сигнал не зашумлен. При отсутствии шумов найти временной сдвиг эхо-сигнала можно, производя корреляционное сравнение с эталонными сигналами, временной сдвиг эталонных сигналов подбирать до выполнения условия, когда коэффициент корреляции будет равен единице. Однако коэффициент корреляции уменьшается как при разнице времени сдвига эхо- и эталонного сигналов, так и при совпадении времени сдвига, но из-за наличия шума. Поэтому таким способом определить временной сдвиг зашумленного эхо-сигнала невозможно.

Усовершенствование алгоритма определения времени сдвига эхо-сигнала достигается за счет сочетания положительных качеств известного подхода, позволяющего приблизительно определить временную задержку, и дополнительной цифровой обработки, включающей механизмы генерации серий эталонных сигналов, корреляционное сравнение эхо-сигнала с эталонами, сплайн-интерполяцию, передискретизацию с целью повышения точности определения временного сдвига дискретизированного сигнала. Подобный подход был ранее применен для повышения точности определения частоты эхо-сигналов спектрометров ЯМР [4–7].

Идея предлагаемого алгоритма цифровой обработки в данном случае заключается в том, что в небольшой окрестности от предполагаемого временного сдвига сигнала (приближенное значение временного сдвига сигнала может быть найдено с помощью автокорреляции или по максимуму амплитуды) вычисляются коэффициенты корреляции с несколькими эталонными сигналами в некоторой окрестности от приближенного значения временного сдвига, затем с помощью сплайн-интерполяции и передискретизации строится функция, выражающая зависимость коэффициента корреляции от временного сдвига эталонов и находится максимум этой функции, по положению максимума определяется уточненное

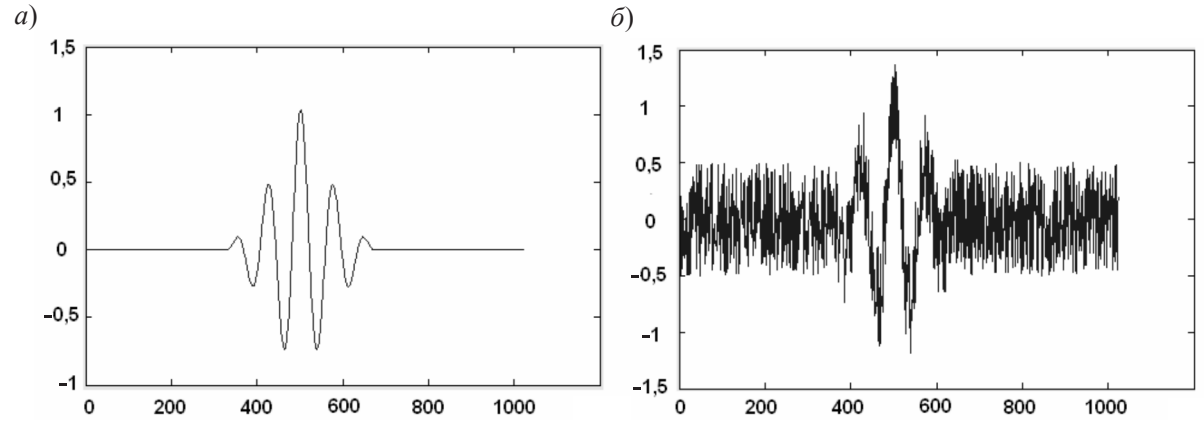


Рис. 3. Вид незашумленного (*а*) и зашумленного (*б*) модельных сигналов, для которых приведены зависимости на рис. 2
Частота сигналов – 2660 кГц, частота отсчетов – 200 000 кГц. Величина сдвига – 500.
Шум – нормально распределенный (функция randn в MATLAB)

значение временного сдвига эталонного сигнала. Функция, построенная таким образом, имеет вид параболы с явно выраженным максимумом (рис. 2 *а*) в случае как незашумленного, так и зашумленного сигнала (рис. 2 *б*), что и позволяет определить временной сдвиг эхо-сигнала более точно. При наличии шума форма функции сохраняется, уменьшается лишь абсолютное значение максимума.

Точность определения временного сдвига эхо-сигнала тем выше, чем ближе начальное приближение к истинному значению. Поэтому предлагаемый алгоритм применяет итерационное вычисление, на каждом этапе итерации в качестве начального приближения используется уточненное значение временного сдвига, полученное на предыдущем этапе. В качестве первого приближения берется временной сдвиг, определенный по максимуму амплитуды эхо-сигнала.

Краткое описание алгоритма.

1. Получение рабочего числового массива исходных данных $X[i]$, $i = 0, ..., n$.

2. Нахождение значения $j_{макс}$, соответствующего максимальному значению X (найденная величина $j_{макс}$ соответствует приближенному значению временного сдвига в числовом массиве $X[i]$).

3. Создание $2k$ +1 эталонных числовых массивов исходных данных $Xs[i]$ с временным сдвигом $j_{макс}$ *(s/k–1)*b, где $s = 0, 1, 2, ..., 2k$, $b = 0..1$, значение b задается с учетом возможной погрешности приближенного значения временного сдвига. Например, $b = 0{,}1$ если погрешность оценки приближенного значения временного сдвига не превышает 10 %.

4. Вычисление коэффициентов корреляции рабочего числового массива со всеми эталонными и формирование числового массива коэффициентов корреляции $KK[m]$, где $m = j\text{max} + j\text{max} *(s/k–1)*b$.

5. Выполнение сплайн-интерполяции для массива $KK[m]$ (нахождение непрерывной функциональной зависимости $F(m)$, соответствующей массиву $KK[m]$).

6. Выполнение передискретизации на основе найденной функциональной зависимости $F(m)$ для массива $KK[m]$ с увеличением количества элементов массива в r раз, т. е. формирование массива $KK1[m_1]$, где $m_1 = m * r$, r – коэффициент передискретизации.

7. Нахождение значения $m_{1макс}$, соответствующего максимальному значению $KK1$ (значение $m_{1макс}/r$ будет представлять вещественное число, соответствующее уточненному (в общем случае нецелому) значению временной задержки в рабочем числовом массиве исходных данных $X[i]$).

8. Вычисление разности $\text{err} = m_{1макс}/r - j_{макс}$.

9. Если $\text{err} < \text{err}_{доп}$, то $j_{макс} = m_{1макс}/r$ и переход к п. 3, иначе переход к п. 10.

10. Вывод найденного точного значения временной задержки (в безразмерной форме) $m_{1макс}/r$ (в общем случае не целого) и временной задержки в ед. времени $T = (m_{1макс}/r)*dt$, где dt – шаг дискретности по времени при измерении сигнала $X(t)$.

Программа, реализующая данный алгоритм, приведена в [8].

Точность определения основной частоты при использовании предложенного алгоритма зави-

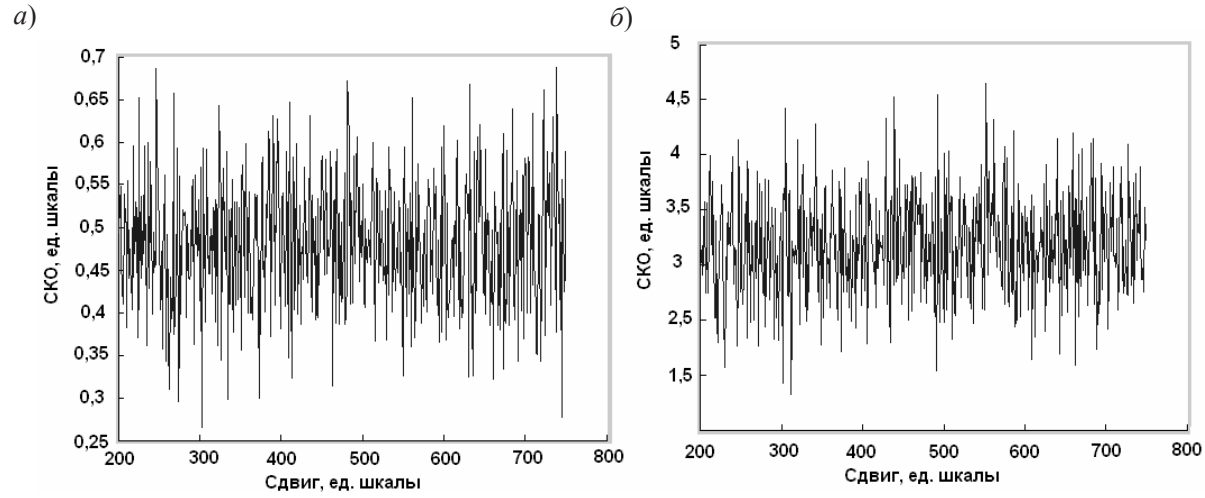


Рис. 4. Среднеквадратическое отклонение от среднего значения вычисленного временного сдвига при использовании традиционного (*а*) и предлагаемого (*б*) алгоритмов

сит от значений k и r и тем выше, чем они больше, однако, если анализируемый сигнал зашумлен, существенное ее увеличение происходит при росте k и r лишь до некоторого предела. В частности, при соотношении сигнал/шум >2/1, $k = 3$ и $r = 10$, как показали проведенные исследования, оказывается наилучшим выбором по критерию точность/время анализа.

Количество итераций для расчета частоты с заданной точностью с помощью описанного алгоритма зависит от того, насколько близко к искомой частоте будет находиться начальное приближение.

На рис. 4 приведена экспериментально полученная в режиме компьютерного моделирования зависимость погрешности определения временного сдвига зашумленных эхо-сигналов при частоте радиолокационного сигнала 2660 кГц и частоте отсчетов 200 000 кГц. Генерация нормально распределенного шума выполнена с помощью функции randn в среде MATLAB с амплитудой, равной 0,5, при амплитуде эхо-сигнала, равной единице. Усреднение произведено по 20 реализациям, значение временного сдвига изменялось с шагом 1.

Максимальное среднеквадратическое значение погрешности определения временного сдвига при использовании предлагаемого алгоритма, как следует из рис. 4, в этих условиях не превышает 0,65 ед. шкалы, а при использовании традиционного алгоритма – 4,5 ед. шкалы. С учетом диапазона шкалы измерения от 200 до 800 относительная среднеквадратическая погрешность измерения составит не более 0,3 % при использовании предлагаемого алгоритма и 2,25 % – при использовании традиционного алгоритма. Эффективность предлагаемого алгоритма возрастает с увеличением зашумленности эхо-сигнала. Временной сдвиг эхо-сигнала может быть вычислен с высокой точностью даже в условиях, когда амплитуда шума превышает амплитуду эхо-сигнала в 1,5–2 раза. Обработка таких значительно зашумленных эхо-сигналов должна производиться при $b >> 0{,}1$ и $k >> 3$. При $b \to 1$, $k \to n$ погрешность определения приближенного значения временного сдвига не имеет значения. На рис. 5 приведен пример зависимости коэффициента корреляции от временного сдвига при $b = 0{,}9$, $k = 50$ на этапе первой итерации (*а*) и последней (*б*). Отношение сигнал/шум в эхо-сигнале – 1/2.

Описанный алгоритм исследован в режиме компьютерного моделирования с нормальным (функция randn MATLAB) и белым шумом (функция awgn MATLAB). Программа обработки данных реализована в среде MATLAB.

Эффективность предлагаемого алгоритма и программы измерения временной задержки радиолокационных эхо-сигналов исследовалась путем моделирования. Моделируемые эхо-сигналы подобны реально получаемым, приведенным на рис. 1.

Зависимость коэффициента корреляции от рассогласования гармонических сигналов во времени и оценка положения максимума этой зависимости получены аналитически в непрерывной форме для сигнала x и эталона y:

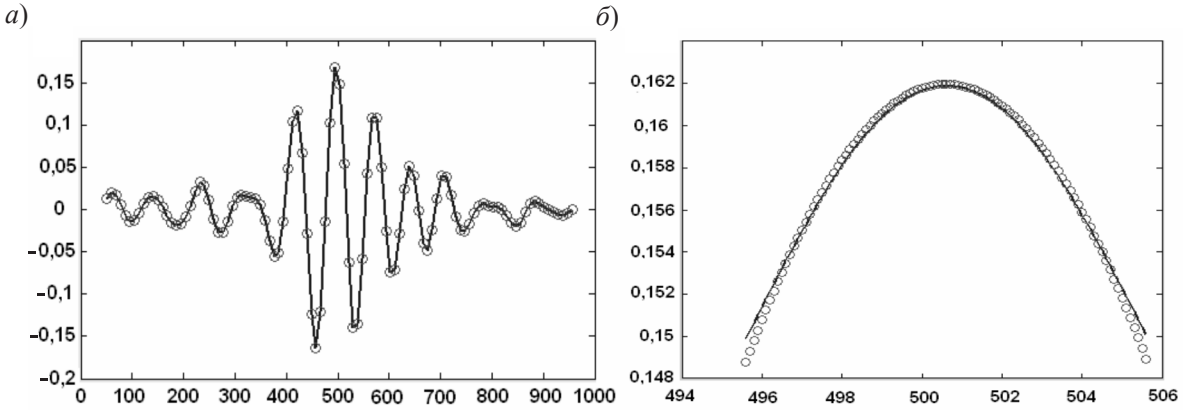


Рис. 5. Зависимость коэффициента корреляции от временного сдвига при $b = 0{,}9$, $k = 50$, отношении сигнал/шум 1/2 на этапе первой итерации (*а*) и последней (*б*)

$x = \sin(\frac{2\pi nt}{T})$ и $y = \sin(\frac{2\pi n(t-\Delta t)}{T})$, имеющих одинаковое количество периодов n на интервале наблюдения T и отличающихся сдвигом по времени.

Коэффициент корреляции r, как известно, вычисляется как отношение коэффициента ковариации k_{xy} к нормирующему множителю:

$$r = \frac{k_{xy}}{\sqrt{\sigma_x^2 * \sigma_y^2}}.$$

Коэффициент ковариации сигналов x и y вычисляется по формуле:

$$k_{xy} = \frac{1}{T}\int_0^T \sin(\frac{2\pi n\Delta t}{T}) \cdot \sin(\frac{2\pi n(t-\Delta t)}{T})dt =$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T \frac{1}{2}(\cos(\frac{2\pi n\Delta t}{T}) - \cos(\frac{2\pi n(2t-\Delta t)}{T}))\,dt =$$

$$= \frac{1}{2T}\int_0^T (\cos(\frac{2\pi n\Delta t}{T}) - \cos(\frac{4\pi nt - 2\pi n\Delta t)}{T}))\,dt =$$

$$= \frac{1}{2T}[\cos(\frac{2\pi n\Delta t}{T}) \cdot t - \frac{\sin(\frac{4\pi nt - 2\pi n\Delta t)}{T})}{\frac{4\pi n}{T}}]\ \Big|_0^T =$$

$$= \frac{1}{2}(\cos(\frac{2\pi n\Delta t}{T}) - \frac{\sin(4\pi n - \frac{2\pi n\Delta t}{T})}{4\pi n} + \frac{\sin(-\frac{2\pi n\Delta t}{T})}{4\pi n}).$$

Введем обозначение $\delta = \frac{\Delta t}{T}$, тогда окончательно получим:

$$k_{xy} = \frac{1}{2}(\cos(2\pi n\delta) - \frac{\sin(2\pi n(2-\delta))}{4\pi n} - \frac{\sin(2\pi n\delta)}{4\pi n}).$$

Для получения нормирующего множителя вычислим σ_x^2 и σ_y^2:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{T}\int_0^T \sin^2(\frac{2\pi nt}{T})\,dt =$$

$$= \frac{1}{T}(\frac{1}{2}t - \frac{1}{4\cdot\frac{2\pi n}{T}} \cdot \sin(\frac{4\pi nt}{T}))\Big|_0^T = \frac{1}{2}(1 - \frac{\sin(4\pi n)}{4\pi n});$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{T}\int_0^T \sin^2(\frac{2\pi n(t-\Delta t)}{T})\,dt =$$

$$= \frac{1}{2}(1 - \frac{\sin(4\pi n(1-\frac{\Delta t}{T}))}{4\pi n} - \frac{\sin(4\pi n(-\frac{\Delta t}{T}))}{4\pi n}).$$

Введем обозначение $\delta = \frac{\Delta t}{T}$ в последнем выражении. В результате получим

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2}(1 - \frac{\sin(4\pi n(1-\delta))}{4\pi n} + \frac{\sin(4\pi n\delta)}{4\pi n}).$$

Окончательно выражение для коэффициента корреляции будет иметь вид:

$$r = \frac{\frac{1}{2}(\cos(2\pi n\delta) - \frac{\sin(2\pi n(2-\delta))}{4\pi n} - \frac{\sin(2\pi n\delta)}{4\pi n})}{\sqrt{\frac{1}{2}(1 - \frac{\sin(4\pi n)}{4\pi n}) \cdot \frac{1}{2}(1 - \frac{\sin(4\pi n(1-\delta))}{4\pi n} + \frac{\sin(4\pi n\delta)}{4\pi n})}}.$$

Именно эта зависимость имеет вид параболы, обращенной вершиной вверх, принимающей максимальное значение при $\delta = 0$ при любых (целых и нецелых) значениях n (рис. 6 *а*).

При $|\delta| < 0{,}1$ знаменатель будет приблизительно равен ½ и выражение приближенно может быть записано как

$$r = \cos(2\pi n\delta) - \frac{\sin(2\pi n(2-\delta))}{4\pi n} - \frac{\sin(2\pi n\delta)}{4\pi n}.$$

Для того чтобы аналитически найти положение максимума, нужно вычислить первую производную последнего выражения и приравнять ее к нулю:

а) *б*)

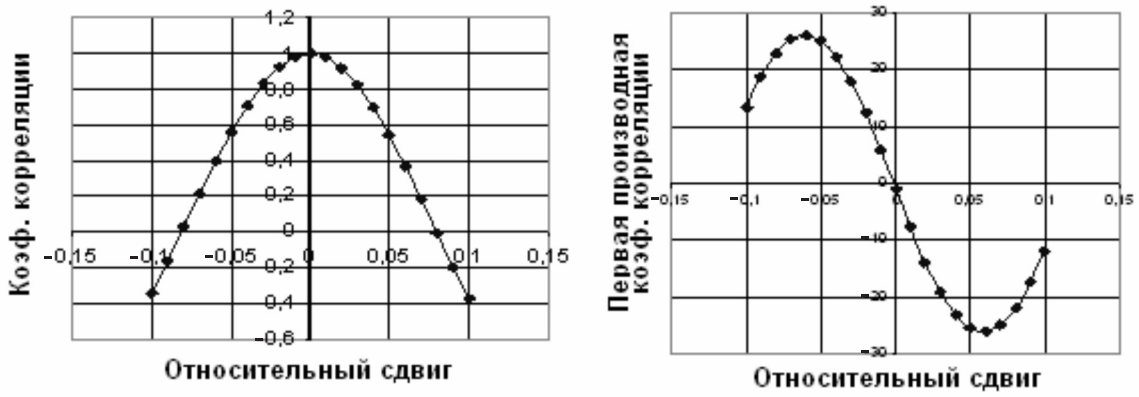


Рис. 6. Пример аналитической зависимости коэффициента корреляции (*а*) и первой производной (*б*) от относительного временного сдвига $\delta = \Delta t / T$ при $n = 4{,}2$

$$\frac{dr}{d\delta} = -\sin(2\pi n\delta)2\pi n - \frac{1}{4\pi n}\cos(2\pi n(2-\delta))(-2\pi n) -$$

$$-\frac{1}{4\pi n}\cos(2\pi n\delta)\cdot 2\pi n = -2\pi n\cdot \sin(2\pi n\delta) +$$

$$+\frac{1}{2}\cos(2\pi n(2-\delta)) - \frac{1}{2}\cos(2\pi n\delta) = 0.$$

Решение последнего тригонометрического уравнения также приводит к $\delta = 0$ при любых (целых и нецелых) значениях n (рис. 6 *б*), что доказывает получение точного значения временного сдвига радиолокационных эхо-сигналов предлагаемым способом.

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы.

Предложенный способ дает возможность получить точное значение временной задержки эхосигнала от возбуждающего радиоимпульса при обработке незашумленных радиолокационных эхо-сигналов.

Рассмотренный способ по сравнению с традиционным обеспечивает в несколько раз более высокую точность измерения временной задержки при обработке зашумленных радиолокационных эхо-сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Себко, В.П.** Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий [Текст] / В.П. Себко, Г.М. Сучков, Е.А. Алексеев // Дефектоскопия. –2002. –№ 12. –С. 21–28.

2. **Макс, Ж.** Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х т. [Текст] / Ж. Макс. –М.: Мир, 1983.

3. **Тутыгин, В.С.** Новые способы обнаружения и определения параметров зашумленных сигналов [Текст] / В.С. Тутыгин // В сб.: Высокие технологии и фундаментальные исследования; Т. 3: Сб. тр. X Междунар. науч.-практ. конф. Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности; Под ред. А.П. Кудинова. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –С. 136–149.

4. **Тарханов, В.И.** Приборный комплекс для поиска и исследования сигналов ЯМР в магнитоупорядоченных веществах [Текст] / В.И. Тарханов, В.С. Тутыгин // Научное приборостроение. –2003. –Т. 13. –№ 1. –С.58–63.

5. **Дебелова, А.В.** Программа определения точных значений количества периодов и частоты дискретизированного сигнала [Текст] / А.В. Дебелова, В.С. Тутыгин // Свид. Роспатента № 2007612320 от 01.06.2007.

6. **Тутыгин, В.С.** Новый метод частотного анализа [Текст] / В.С. Тутыгин, А.В. Дебелова // Тр. III Всерос. науч. конф. Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB. –СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. –С. 1494–1499.

7. **Тутыгин, В.С.** Новый метод частотного анализа [Текст] / В.С. Тутыгин, А.В. Дебелова // Вестник СПбГУ. Сер. Прикладная математика, информатика и процессы управления. –2009. –№1. –С. 109–116.

8. **Тутыгин, В.С.** Программа точного определения времени задержки радиолокационного эхосигнала [Текст] / В.С. Тутыгин // Свид. Роспатента № 2011612678 от 01.04.2011.

УДК 663.5.001.5

А.А. Вытовтов, М.Н. Мешалкина

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДЛИННОСТИ И КАЧЕСТВА МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ

Молоко и молочные продукты благодаря высокой пищевой и биологической ценности являются важнейшими факторами обеспечения полноценного питания человека. За последние годы ассортимент и производство молока и молочных продуктов в России значительно увеличились. На рынке молока и молочных продуктов, пользующихся стабильным спросом, обращаются сотни наименований, поэтому соблазн подделать или увеличить их объемы имеется как у реализатора, так и у производителя. Производство и реализация некачественной фальсифицированной и контрафактной продукции наряду с намеренным введением потребителя в заблуждение относительно свойств и происхождения продуктов способствует недобросовестной конкуренции на продовольственном рынке и может нанести прямой ущерб здоровью населения. Сегодня проблемы с проведением всесторонней экспертизы подлинности всех видов молока и молочных продуктов, реализуемых на рынках России, весьма актуальны.

Основные положения по процедуре установления подлинности и выявлению фальсификации молока и продуктов его переработки приведены в [1] .

*Подлинность (*или *аутентичность) пищевой продукции* – неотъемлемая составная часть качества пищевой продукции (в т. ч. молока и молочной продукции), определяемая совокупностью физико-химических и биологических показателей, абсолютные количественные значения и интервалы изменения которых обоснованы природными свойствами сырья и допустимым технологическим воздействием при получении готовых пищевых продуктов.

Фальсифицированная пищевая продукция – пищевые продукты и продовольственное сырье (в т. ч. молоко и молочная продукция), умышленно измененные (поддельные) и (или) имеющие скрытые свойства и качество, информация о которых является заведомо неполной или недостоверной.

Идентификация пищевых продуктов – это установление соответствия пищевых продуктов (в т. ч. молока и молочной продукции) их заявленному наименованию (вид, класс, категория, сорт, географическое происхождение) путем исследования тождественности показателей аутентичным образцам и/или их описанию, опубликованным в соответствующих документах, и информации, содержащейся в сопроводительных документах и потребительских этикетках, с применением аналитических и органолептических методов.

Самый простой и распространенный способ проверки и доказательства подлинности пищевых продуктов, реализованный во многих странах, – установление предельных норм по ряду показателей. Основные показатели, характеризующие подлинность (аутентичность) в границах естественных вариаций для молока и продуктов его переработки, установлены в документах [2, 3] и их применение достаточно эффективно, но требует значительных материальных, временных и трудовых затрат.

Для определения подлинности и обнаружения фальсификации молочных продуктов перспективно использование методов, основой которых является теория «распознавания образов» с помощью современных инструментальных приборов. Распознавание образов – это отнесение исходных данных к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные, из общей массы несущественных данных.

Инфракрасная (ИК) спектроскопия [4] – фундаментальный метод исследования структуры химических соединений, может использоваться для определения подлинности пищевых продуктов по их характерным признакам. Метод ИК спектроскопии основан на поглощении электромагнитного излучения ИК диапазона молекулами изучаемого вещества, при котором происходит возбуждение колебательных и вращательных состояний.

Вся ИК область условно делится на ближнюю в диапазоне волновых чисел 4000–12500 $см^{-1}$,

в которой наблюдаются электронные и колебательные переходы; основную или среднюю от 400 до 4000 $см^{-1}$, связанную в основном с колебаниями молекул; и дальнюю от 50 до 400 $см^{-1}$, в которой наблюдаются вращательные переходы, колебания в тяжелых молекулах, в ионных и молекулярных кристаллах, некоторые электронные переходы в твердых телах, крутильные и скелетно-деформационные колебания в сложных молекулах, например, в биополимерах. В настоящее время наибольшее развитие получила спектроскопия в средней ИК области, в которой работает большинство серийных приборов.

В средней области инфракрасного спектра диапазон от 1300 до 625 $см^{-1}$ является индивидуальной характеристикой соединения (область отпечатков пальцев). Совпадение всех полос неизвестного (исследуемого) вещества со спектром заведомо известного эталона – доказательство их идентичности. Но в результате сильного взаимодействия происходит интенсивное колебание молекул, поэтому отнесение полос поглощения к отдельным связям трудно идентифицировать. Поэтому для наших исследований этот диапазон не подходит.

Спектроскопия «ближнего ИК диапазона» (12500÷4000 $см^{-1}$) позволяет получить спектр обертонов и комбинационных частот, дающих необходимую информацию для анализа исследуемого продукта. В этой области лежат основные полосы и линии поглощения таких компонентов молочных продуктов, как жирные кислоты, белки, серосодержащие соединения, эфиры, кетоны, альдегиды, лактоноиды и др. В этот же диапазон попадают полосы поглощения, отвечающие колебаниям групп C–C, C–O, C–N и др., а также деформационные колебания. Поэтому для наших исследований выбран этот диапазон.

ИК спектры поглощения, отражения или рассеяния несут чрезвычайно богатую информацию о составе и свойствах пробы. Сопоставляя ИК спектр исследуемого «неизвестного» образца продукта со спектрами известных, можно идентифицировать исследуемый, определить основной состав пищевых продуктов, обнаружить примеси, провести фракционный или структурно-групповой анализ.

В последнее время существенное применение получил метод ИК Фурье-спектроскопии [5]. Спектры исследуемых веществ получают в результате обратного быстрого Фурье-преобразования интерферограммы прошедшего (или отраженного) через образец излучения. Этот метод дает значительный выигрыш в фотометрической точности и точности отсчета длины волны. ИК Фурье-спектрометры совмещают в себе современное программное и метрологическое обеспечение и позволяют определить любые отклонения в контролируемых показателях. При этом продукт анализируется без изменения физических и химических свойств. Для исследования достаточно 10 г вещества в жидкой или твердой фазе, время получения одного спектра – до 1,5 с, имеется возможность снижения уровеня шумов в n раз при n числе сканирований.

В настоящее время существуют доступные базы ИК спектров технических и пищевых добавок, лекарственных препаратов, поли- и мономеров, ПАВ, пластификаторов, ядохимикатов, растворителей, нефтепродуктов, токсичных веществ, стероидов и других соединений, имеющих в основном однокомпонентный состав. Однако отсутствует достоверная, полная и доступная база ИК спектров пищевых продуктов, имеющих многокомпонентный состав.

Изучена возможность создания экспресс-методики определения подлинности и качества молочных продуктов с использованием метода ИК Фурье-спектроскопии. Метод ИК Фурье-спектроскопии применялся для измерения спектров различных видов молочной продукции (молоко, кефиры, сыры, творог и т. д.). Для сравнения измеренных спектров с имеющимися в созданной базе образцовых спектров различных объектов используются различные програмные продукты и, в частности, поисковая система ZaIR [6]. Система ZaIR предназначена для идентификации химических соединений и поиска близких к ним по строению веществ с помощью каталога (базы данных) ИК спектров. В системе предусмотрено гибкое задание параметров поиска, включая полную спектральную кривую, ее отдельные диапазоны, спектральные пики, текстовые и числовые данные и т. д. В основу поискового алгоритма программы ZaIR положен принцип совпадения «наличия и интенсивности пиков» спектра исследуемого продукта со спектрами в базе данных в диапазоне от 650 до 4000 $см^{-1}$.

В данной статье рассмотрена и показана возможность создания соответствующей базы данных пищевых продуктов, в т. ч. и молочных, необходимой для определения подлинности и

Рис. 1. Инфракрасный Фурье-спектрометр ФСМ-1202

обнаружения фальсификации с помощью ИК Фурье-спектрометра «ФСМ 1202» Общий вид прибора показан на рис. 1.

ИК спектры образцов молочных продуктов снимались на ИК спектрометре ФСМ 1202 с помощью программного обеспечения FSpec (разрешение 4 $см^{-1}$, число сканов пробы 10) в диапазоне 650–4000 $см^{-1}$ в сочетании с методом многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО).

Спектрометрия МНПВО – аналог абсорбционной спектрометрии, позволяющий существенным образом упростить подготовку образцов. Метод МНПВО может использоваться для реализации экспресс-методик контроля качества продукции; он широко применяется для непрозрачных, многослойных, сильно поглощающих объектов и является неразрушающим методом исследования.

Использование МНПВО основано на том, что на границе раздела фаз образца и оптического материала (кристалла из галогенидов таллия или селенида цинка) возникает «затухающая волна» ИК излучения, проникающая на некоторую глубину в оптически менее плотную среду (образец), при этом регистрируется спектр пропускания ультратонких верхних слоев образца. Меняя угол падения ИК излучения, можно последовательно получать спектры лежащих глубже слоев при исследовании многослойных пленочных материалов.

Исследовать методом МНПВО можно порошки, жидкости, прозрачные и непрозрачные пленки (размер пленки не менее 0,5 кв. см) с использованием приставки МНПВО, которая может быть приобретена дополнительно к ИК Фурье-спектрометру и установлена в кюветное отделение прибора. Спектр пробы, полученный методом МНПВО, совпадает со спектром пропускания вещества, полученным обычными способами пробоподготовки (например, в таблетке с бромидом калия), по наличию, форме и относительной интенсивности полос поглощения. Поэтому по МНПВО спектрам идентификацию вещества можно проводить обычным способом по библиотекам ИК спектров веществ.

Преимущества метода МНПВО: простота пробоподготовки и обслуживания, высокая воспроизводимость и производительность. Использовалась приставка горизонтального типа МНПВО36 (призма ZnSe 36×16×4 мм, 45°), предназначенная для экспресс-анализа жидких, твердых и порошкообразных проб (рис. 2).

Проба не требует никакой дополнительной подготовки. Образец используется в его натуральном агрегатном состоянии, помещается в призму путем налива (жидкая проба) или насыпа (порошок), или приложения части твердого образца к поверхности призмы. Таким образом, время на подготовку проб не расходуется.

ИК спектры двух образцов молочной продукции (зависимость величины пропускания T от волнового числа $см^{-1}$), снятые с помощью приставки МНВПО, показаны на рис. 3.

Для идентификации молочного продукта, а также определения его качества и подлинности был разработан алгоритм на основе системы ZaIR. Система ZaIR состоит из базы данных, набора программных модулей и файлов настройки. База данных состоит из отдельных каталогов,

Рис. 2. Приставка для исследования образцов методом МНПВО

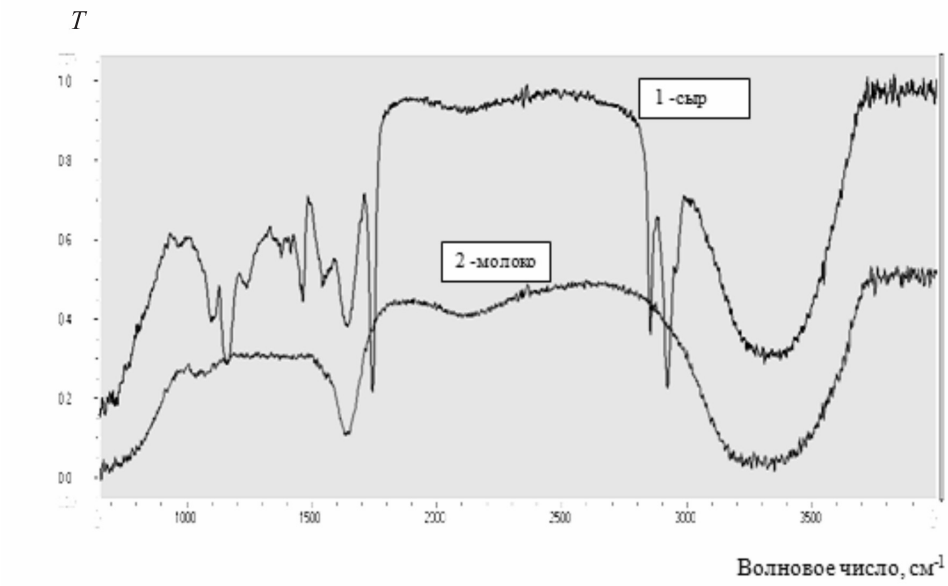


Рис. 3. ИК спектры образцов молочных продуктов,
снятых с помощью приставки МНВПО
1 – спектр сыра, верхняя кривая; 2 – спектр молока, нижняя кривая

сформированных на основе данных из различных литературных источников. Передача информации о спектрах происходит через файлы формата JCAMP и SPE.

Так как система ZaIR является, в т. ч. и базой данных ИК спектров различных веществ, то по умолчанию поиск производится среди этих спектров.

Данная библиотека спектров системы не содержит ИК спектров молока и молочных продуктов, необходимых для исследований. Это говорит о потребности в наработке собственной базы данных для проведения дальнейшего анализа.

Пополнять базу данных может только квалифицированный специалист, поэтому для рядового пользователя специально разработан алгоритм пополнения базы данных спектров.

Все спектры, входящие в базу данных системы, хранятся в формате JCAMP в заранее определенной для них папке. Спектры, полученные с образцов с помощью ИК спектрометра, импортируются в ZAIR в формате .spe, который необходимо изменить, используя возможности программы, на формат JCAMP. Собственная база данных должна храниться в отдельной папке, путь к которой прописывается в настройках программ – в файле конфигурации.

После всех этих манипуляций поиск будет производиться по новой базе данных, созданной в процессе выполнения работы. Список запросов в ZaIR всегда поддерживается в актуальном состоянии. Если, например, изменить в настройках программы путь для обращения к базе данных, то список запросов будет автоматически изменяться.

Рисунок 4 иллюстрирует расширенное окно результатов поиска.

Программа ZaIR в результатах сравнения определяет фактор совпадения спектров в процентах. При этом в алгоритме задан поиск как по положению основных пиков по шкале волновых чисел (как правило, положение основных пиков

Определение подлинности продукта по фактору совпадения его инфракрасного спектра с эталонным

Диапазон фактора совпадения, %	Подлинность / качество
98–95	Подлинный / качественный
95–90	Сомнительной подлинности / сомнительного качества
85–90	Неподлинный (фальсифицированный) / некачественный (фальсифицированный)

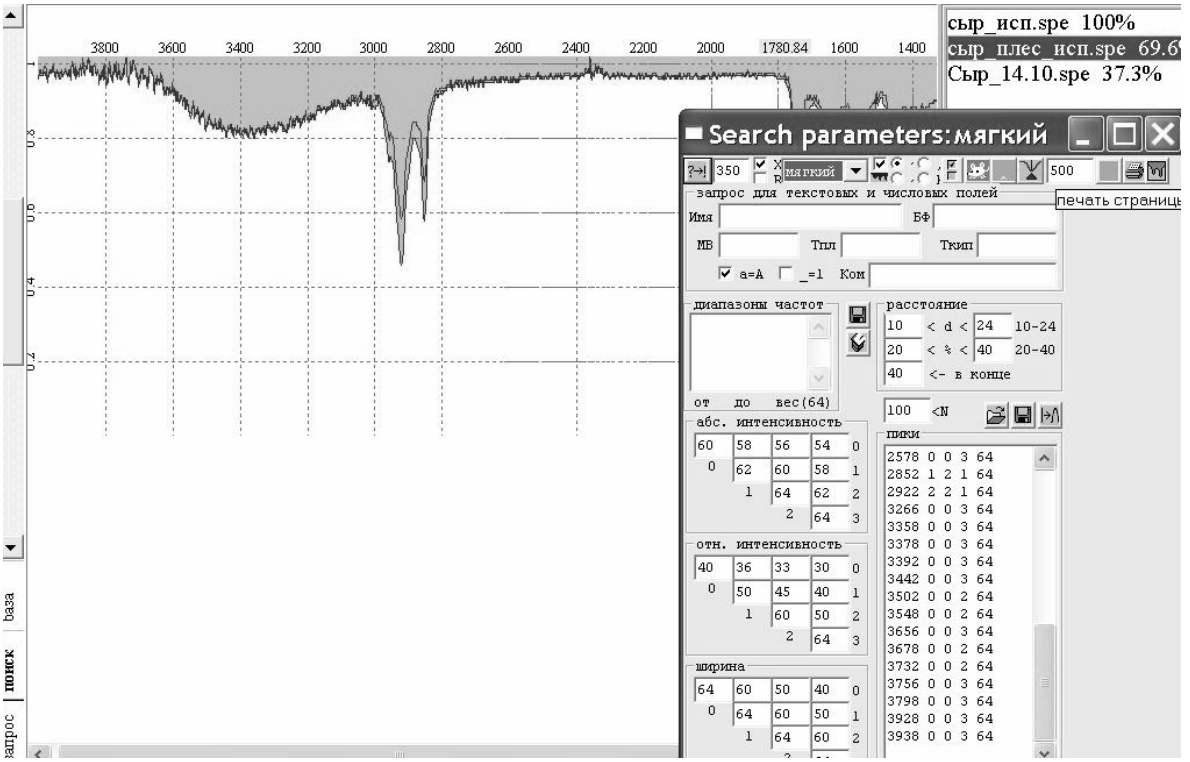


Рис. 4. Расширенная таблица результатов поиска

одинаково у одной группы молочных продуктов: молока, сметаны, творога, сыра), так и по высоте пика (высота пиков может отличаться у разных марок продуктов одной группы). Исходя из статистической оценки многократных измерений определены диапазоны отклонения фактора совпадения исследуемого образца от эталонного. Каждому диапазону соответствует заключение о подлинности или неподлинности продукта (табл.).

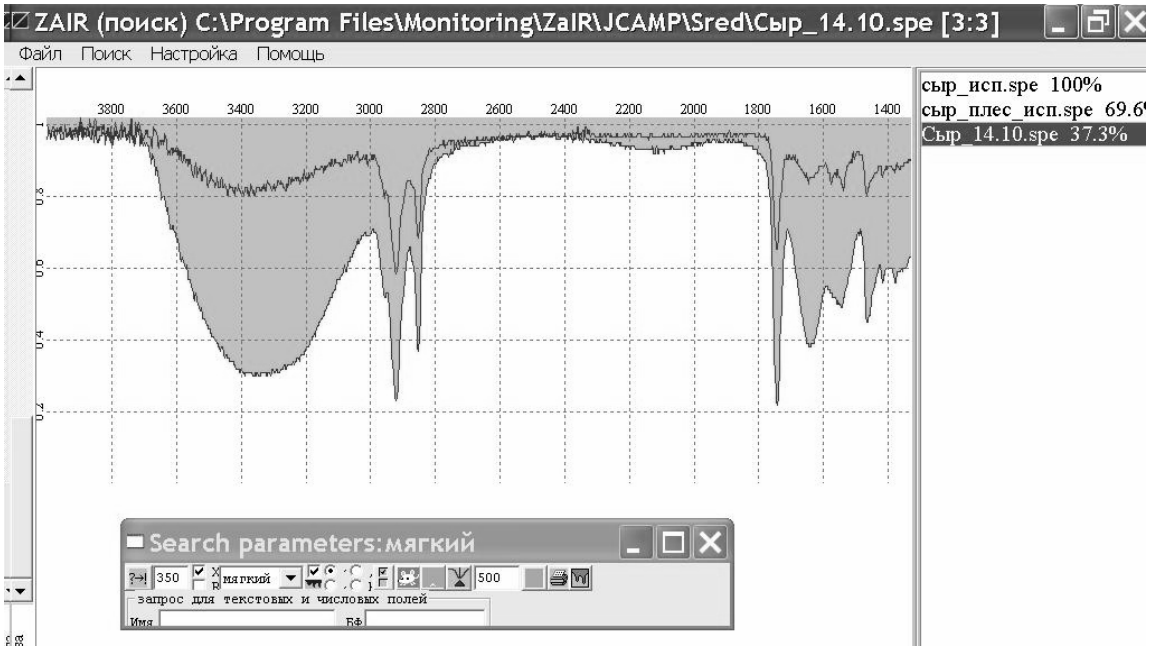


Рис. 5. ИК спектры сыра: свежего (верхняя кривая) и испорченного (нижняя кривая с серым фоном)

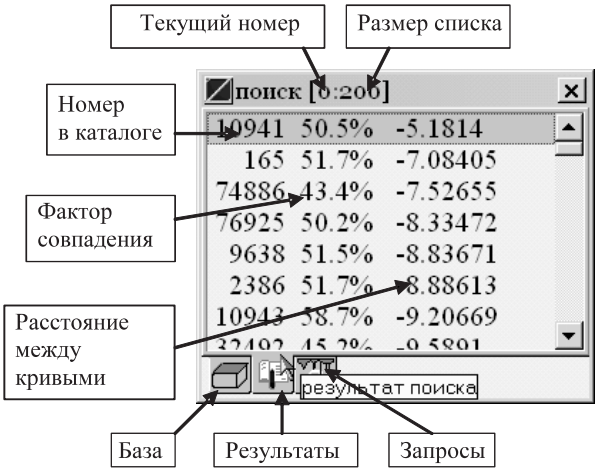


Рис. 6. Список отобранных соединений

ИК спектры молочных продуктов, имеющиеся в созданной базе данных, являются своеобразным паспортом их подлинности, что позволяет использовать их в качестве эталонных спектров для установления подлинности и обнаружения фальсификации.

Если спектр анализируемого молочного продукта совпадает с эталоном, то продукт подлинный. Если наблюдаются несовпадения, то это дает основания предполагать, что продукт некачественный, испорченный или фальсифицированный.

Пример обнаружения некачественного продукта показан на рис. 5. Верхний спектр соответствует свежему сыру марки «Эдам», а нижний спектр – тому же образцу сыра, который пролежал при комнатной температуре две недели.

Из рис. 5 видно несовпадение ИК спектров как по величине пропускания, так и по наличию характерных пиков. Оценка достоверности проводится программой ZaIR. При поиске соответствующего спектра открывается раздел результатов поиска. Также можно вызвать список отобранных соединений, представленный на рис. 6.

Список удобен тем, что в нем видны сразу несколько номеров отобранных соединений вместе с их факторами совпадения. На рис. 5 показан

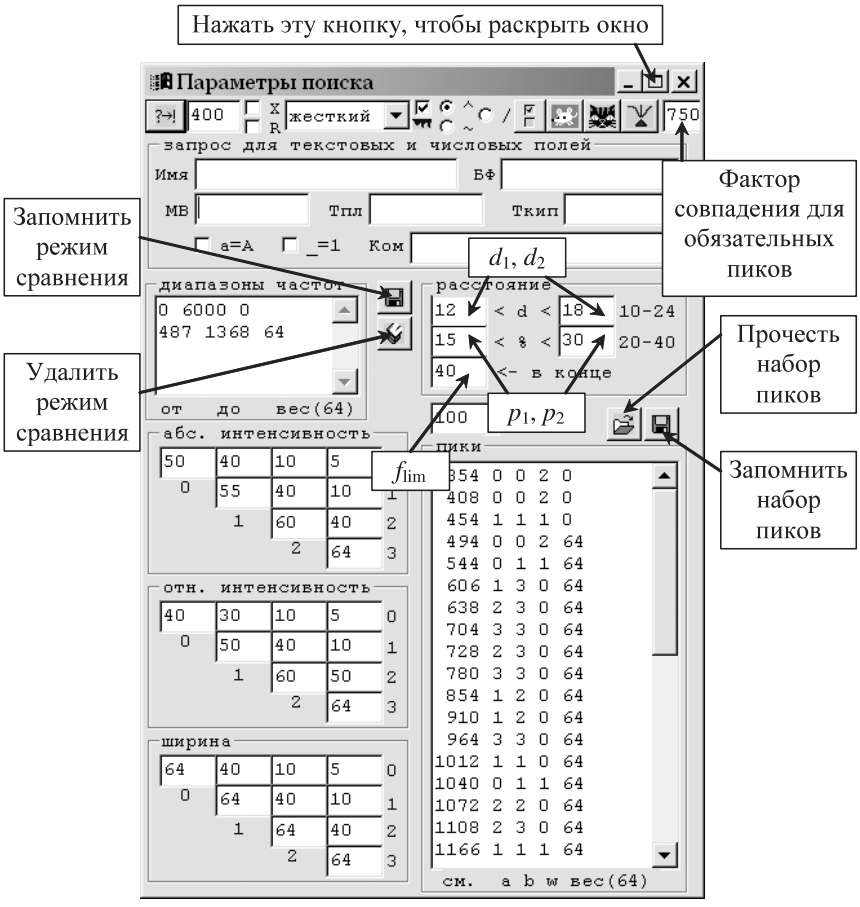


Рис. 7. Развернутое окно параметров поиска

просмотр результатов поиска, из которого видно, что имеются спектры с 37 % и более факторами совпадения.

Вид списка зависит от выбранного раздела. Так, для базы данных приводится номер соединения в каталоге и его название; для запросов – только название файла запроса; для результатов поиска – номер в каталоге и фактор совпадения в процентах при сравнении спектров по пикам и евклидово расстояние между кривыми (производными) если поиск производился путем сравнения полных кривых или их производных. В этих случаях расстояние указывается в абсолютных (ненормированных) единицах. Идеальному совпадению кривых отвечает нулевое расстояние; чем хуже совпадение, тем больше число (по модулю). При этом программа ZaIR позволяет провести расширенный поиск

На рис. 7 изображено развернутое окно результатов поиска, где показаны основные элементы поиска и сравнения спектров.

Также можно воспользоваться окнами в программе, иллюстрирующими расширенную таблицу результатов поиска (см. рис. 4). Расстояние между положениями пиков влияет на фактор совпадения. Положение пиков считается в обратных сантиметрах. Если разница положений пиков составляет x см$^{-1}$, то их фактор совпадения считается по формуле:

$$f(x) = \begin{cases} 64 - (64 - f_{\text{lim}})(x / x_{\text{lim}})^2 & x < x_{\text{lim}} \\ 0 & x \geq x_{\text{lim}} \end{cases},$$

т. е. фактор максимален (для ускорения расчетов максимальное значение приравнено к 64) при полном совпадении положений, затем с ростом разницы он плавно снижается и резко обрывается к нулю, когда разница превысит некий предел x_{lim} (рис. 8).

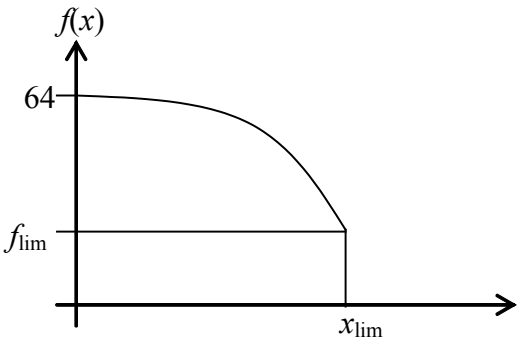


Рис. 8. Зависимость фактора совпадения от разности положений пиков x

ИК спектроскопия с Фурье-преобразованием – эффективный метод анализа молочных продуктов, помогающий без больших временных, денежных и трудозатрат осуществить комплексную оценку исследуемых образцов, оценить их подлинность и выявить факт фальсификации.

Разработан алгоритм создания дополнительной и пополняемой базы данных «Молоко и молочные продукты» на базе поисковой системы ИК спектров ZaIR, и использование ее для обнаружения недоброкачественности продукта, его фальсификации, путем сравнения спектров исследуемых образцов с эталонными спектрами, хранящимися в базе данных.

Разработанный алгоритм может быть рекомендован для использования в исследовательских лабораториях, в отделах сертификации и выходного контроля после проведения дополнительных исследований по увеличению базы данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент на молоко и молочную продукцию [Текст] / Федеральный закон от 12.06.2008 № 88-ФЗ.

2. О качестве и безопасности пищевых продуктов [Текст] / Федеральный закон от 02.01.2000 № 29-ФЗ.

3. МУ 4.1./4.2.2484-09 Методические указания по оценке подлинности и выявлению фальсификации молочной продукции [Текст].

4. **Смит, А.** Прикладная ИК спектроскопия [Текст] / А. Смит; пер. с англ. –М., 1982.

5. **Белл, Р.Дж.** Введение в Фурье-спектроскопию [Текст] / Р.Дж. Белл; пер. с англ. –М., 1975.

6. Поисковая система по ИК спектрам ZaIR. Руководство пользователя [Текст]. –Новосибирск, 2006.

УДК 535.646

И.А. Со, Г.Ф. Малыхина

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ

Задачу измерения цветовых различий пытались решить еще в начале XX в. Количественное определение визуальных цветовых различий относится по Е. Шредингеру к области высшей метрики цвета.

Измерение визуальных цветовых различий актуально в полиграфии, лакокрасочной промышленности, телевидении и других областях науки и техники.

Цветовые различия принято выражать в порогах цветоразличения. Фундаментальными и наиболее точными данными о порогах цветоразличения считаются данные Мак Адама [1], определившего 25 так называемых *пороговых эллипсов цветоразличения* на графике, рекомендованном Международной комиссией по освещению (МКО) в качестве стандартного цветового пространства МКО 1931. Цвета внутри порогового эллипса неразличимы зрительной системой человека.

Пространство МКО 1931 является неравномерным, поскольку порог цветоразличения, принятый за единицу измерения, различен в разных точках пространства, и анизотропным, поскольку для определенной точки порог цветоразличения зависит от направления. Другими словами, пространство МКО 1931 не является равноконтрастным. В равноконтрастном пространстве визуальное цветовое различие соответствует евклидову расстоянию между точками цветов, а пороги цветоразличения в точках такого пространства можно определить в виде окружностей одинакового радиуса.

Первая попытка создать равноконтрастное пространство была предпринята Д. Джаддом в 1935 г. Впоследствии были предложены пространства Джадда, Мак Адама, Шредингера, Вышецки и др., а также различные модификации известных пространств, которое предлагаются до сих пор, однако все эти пространства – приближенно равноконтрастные. Пока не удалось получить строго равноконтрастного пространства. Поэтому существующие методы измерения цветовых различий не всегда дают адекватные результаты.

Новый метод FHL

В данной статье предлагается новый метод FHL объективного измерения цветового различия как длины кратчайшего в порогах цветоразличения пути между точками цветов. Важные отличия этого метода – то, что в нем предлагается не равноконтрастное пространство, а метод нахождения кратчайшего в порогах цветоразличения пути между точками цветов, искривленного в неравноконтрастном пространстве.

Для получения порогов цветоразличения в любой точке цветового пространства предложена модель цветоразличения зрительной системы [2] на основе интерполяции или аппроксимации экспериментальных данных Мак Адама. Возможность применения методов интерполяции или аппроксимации обусловлена закономерным и плавным изменением ориентации и размеров экспериментальных эллипсов цветоразличения.

Известно, что невозможно получить равноконтрастное пространство на плоскости [1]. Поэтому в методе FHL предлагается осуществить «распрямление» пространства (т. е. получение равноконтрастности) вдоль линии между точками цветов, соответствующей кратчайшему в порогах цветоразличения пути, при этом область в окрестности этого кратчайшего пути будет равноконтрастной. По мере удаления от этой линии пространство искривляется. Упомянутое «распрямление» пространства вдоль линии произведем с помощью локальных преобразований в пределе бесконечно малых областей цветового пространства. Бесконечно малую область неравноконтрастного пространства МКО 1931 можно характеризовать одним эллипсом цветоразличения. С помощью преобразования T бесконечно малой области, заключающегося в ее повороте и масштабировании, можно получить малую равноконтрастную область:

$$T:\begin{pmatrix} f_{\text{отн}} \\ h_{\text{отн}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{a(x,y)} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{b(x,y)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(-\theta(x,y)) & -\sin(-\theta(x,y)) \\ \sin(-\theta(x,y)) & \cos(-\theta(x,y)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\text{отн}} \\ y_{\text{отн}} \end{pmatrix},$$

где $a(x,y)$, $b(x,y)$ и $\theta(x,y)$ – полуоси и угол наклона эллипса цветоразличения в точке (x, y); $x_{отн}$ и $y_{отн}$ – координаты точки в локальной относительной системе координат малой области исходного пространства; $f_{отн}$ и $h_{отн}$ – координаты точки в локальной относительной системе координат малой области нового пространства.

Последовательное применение локальных преобразований граничащих малых областей цветового пространства представляет «распрямление» вдоль линии и определяется следующими выражениями:

$$f = \int \frac{1}{a_x}(\cos(-\theta_x) - \mathrm{tg}\alpha_x \sin(-\theta_x))\,dx,$$

$$h = \int \frac{1}{b_x}(\sin(-\theta_x) + \mathrm{tg}\alpha_x \cos(-\theta_x))\,dx,$$

или для численных расчетов:

$$f = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{a_i(x,y)}(\Delta x \cos(-\theta_i(x,y)) - \Delta y \sin(-\theta_i(x,y))),$$

$$h = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{b_i(x,y)}(\Delta x \sin(-\theta_i(x,y)) + \Delta y \cos(-\theta_i(x,y))),$$

где α_x – угол наклона линии «распрямления», n – число разбиений линии «распрямления».

В силу того, что изначально нам не известен кратчайший в порогах цветоразличения путь между двумя точками цветов в неравноконтрастном пространстве, будем «распрямлять» область вдоль произвольной линии, например, вдоль отрезка прямой между точками рассматриваемых цветов A и B. В результате получим новую область, более равноконтрастную в окрестности истинного кратчайшего в порогах цветоразличения пути между точками цветов. В этой новой области отрезок A'B' прямой между точками цветов располагается ближе к истинному кратчайшему пути. Отобразив отрезок прямой в новой области в соответствующий участок линии в исходном пространстве, будем осуществлять «распрямление» уже вдоль полученной линии. Можно производить дальнейшие итерации «распрямления» для достижения необходимой точности. Обычно для решения практических задач, в которых требуется измерять небольшие цветовые различия, достаточно единственной итерации. Цветовое различие определяется как евклидово расстояние между точками цветов в новой области пространства, полученной на последней итерации «распрямления»: $d_{fh} = \sqrt{(f_B - f_A)^2 + (h_B - h_A)^2}$ порогов цветоразличения, где f_A, h_A и f_B, h_B координаты точек A' и B' в новой области пространства *fh*.

На рис. 1 и 2 представлены примеры областей *fh*, полученных на первой и пятой итерациях «распрямления» вдоль линии между достаточно удаленными точками цветов в неравноконтрастном пространстве МКО 1931 и длины путей d_{fh} вдоль этих линий в порогах цветоразличения, а также соответствующие участки кривой на графике МКО 1931.

Видно, что на первой итерации вдоль участка кривой l_1' в новой области *fh*, которая соответствует отрезку l прямой в неравноконтрастном пространстве МКО 1931, пороги цветоразличения превратились в окружности одинакового радиуса, а вдоль отрезка d_1' прямой между точками цветов пространство *fh* искривлено (пороги выражены эллипсами). На пятой итерации уже вдоль отрезка d_5' прямой между точками цветов полу-

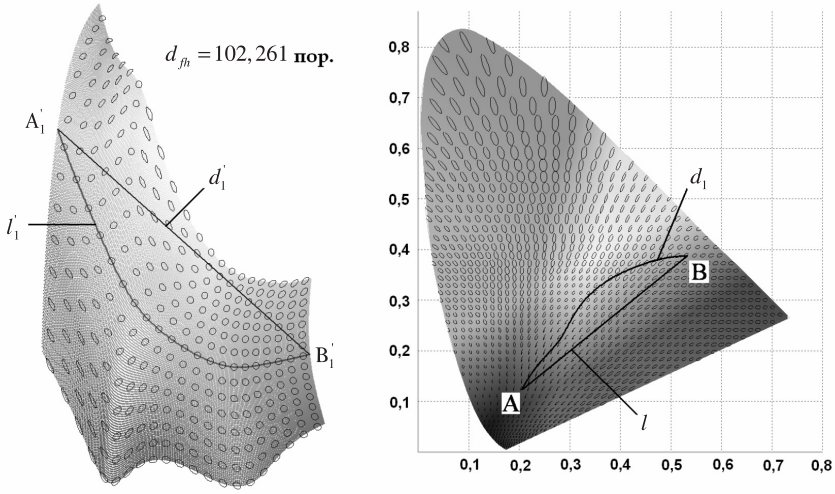


Рис. 1. Пример первой итерации «распрямления» вдоль линии

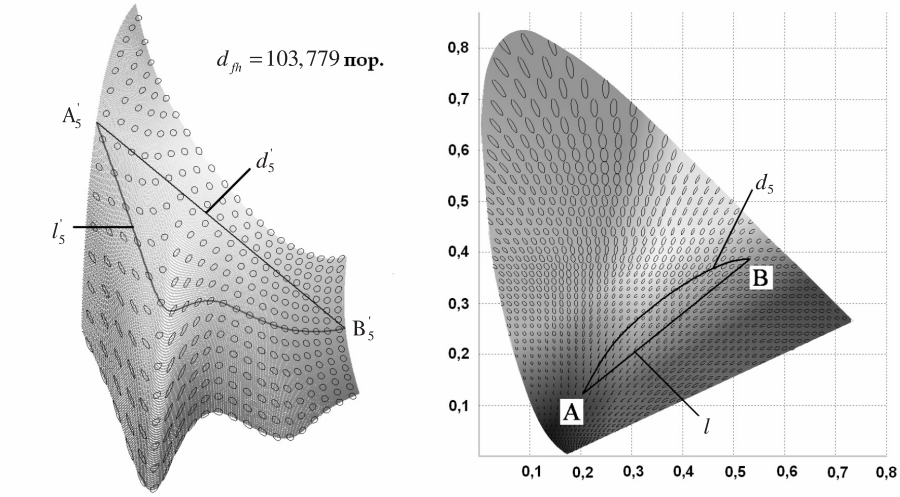


Рис. 2. Пример пятой итерации «распрямления» вдоль линии

чена равноконтрастная область. Соответствующий кратчайший путь d на неравноконтрастном графике МКО 1931 проходит по кривой.

Можно заметить, что длины путей на первой и пятой итерациях, $d_{fh} = 102,261$ и $d_{fh} = 103,779$ порогов, не сильно различаются, а разница в значениях длины пути на пятой и шестой итерациях составляет 0,001 порога.

Известно, что при яркостях L объекта, меньших яркости фона, для всех цветов характерно увеличение порогов цветоразличения, в то время как для цветов, яркость которых больше яркости фона, порог цветоразличения достигает стабильного минимального значения. Зависимости изменения порога цветоразличения от соотношения

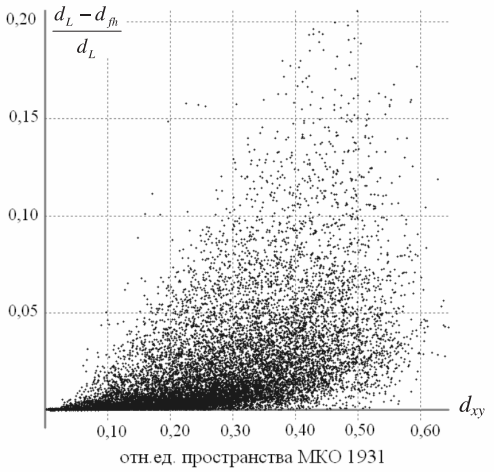


Рис. 3. Сопоставление результатов d_{fh} измерения цветовых различий методом FHL и значений d_L длины отрезка в порогах цветоразличения между точками для 15 000 случайно выбранных пар цветов

яркости объекта и фона приведены в [1]. Если яркость объекта меньше яркости фона, эти зависимости можно учесть и использовать метод FHL для новых значений порогов цветоразличения.

Цветовое различие, измеряемое как евклидово расстояние в равноконтрастной области, является длиной некоторого кривого пути между точками в пространстве МКО 1931, выраженной в порогах цветоразличения. Длину пути в пространстве МКО 1931 можно определить как $d_L = \int_L \frac{1}{\mu} dl$, где μ – порог цветоразличения [3]. Для 15 000 пар точек цветов были рассчитаны цветовые различия методом FHL и методом измерения отрезком прямой в порогах цветоразличения, описанным в работе [3]. На рис. 3 представлены значения величины $\frac{d_L - d_{fh}}{d_L}$, при этом по оси x отложены значения длины отрезка между точками цветов в отн. ед. пространства МКО 1931.

Для всех пар точек цветов длина в порогах цветоразличения кривого пути d_{fh} меньше, чем длина отрезка прямой между двумя точками. Это свидетельствует о большей точности метода FHL по сравнению с методом измерения цветового различия длиной отрезка прямой в порогах цветоразличения. Однако отметим, что для решения большинства практических задач можно воспользоваться методом измерения отрезком прямой в порогах цветоразличения в силу его небольшой погрешности для небольших цветовых различий (например, при расстоянии между точками < 0,05 отн. ед. пространства МКО 1931, что составляет десятки порогов, погрешность составляет ~1 %).

Характеристики результатов измерений 50 полуосей эллипсов Мак Адама

	CIELAB	CIEDE2000	FHL
Относительная погрешность для минимального значения полуоси эллипса	–0,66	–0,76	–0,01
Относительная погрешность для максимального значения полуоси эллипса	1,32	1,02	0,003
Средняя относительная погрешность	–0,03	–0,3	–0,0004
СКО	0,52	0,38	0,002

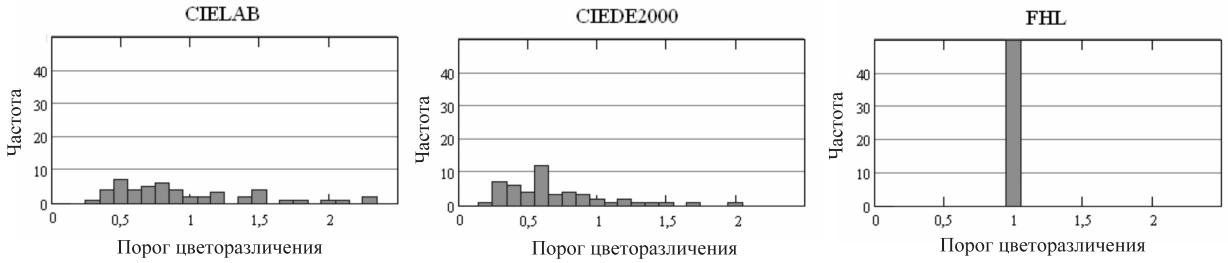


Рис. 4. Частотные гистограммы распределения результатов измерения полуосей пороговых эллипсов Мак Адама

Сравнение точности предлагаемого метода FHL с известными методами

Для сравнения точности предлагаемого метода FHL, например, с применением модели зрительной системы на основе B-сплайновой интерполяции, и известных методов будем использовать данные Мак Адама. В таблице приведены характеристики результатов измерений 50 пар цветов (полуосей пороговых эллипсов) для предлагаемого метода FHL с одной итерацией «распрямления» и классического критерия CIELAB 1976, а также последнего принятого МКО стандарта CIEDE2000.

Относительная погрешность методов CIELAB и CIEDE2000 превышает 100 %, в то время как максимальная относительная погрешность предлагаемого метода FHL не больше 1 %. Следует отметить, что погрешность предлагаемого метода зависит от погрешности используемых для построения модели цветоразличения методов интерполяции и аппроксимации, числа итераций «распрямления», а также от точности применяемых численных вычислений и при необходимости может быть уменьшена.

На рис. 4 представлены частотные гистограммы распределения результатов измерения полуосей пороговых эллипсов Мак Адама для методов FHL, CIELAB и CIEDE2000.

Из рисунка видно, что предлагаемый метод FHL обладает наименьшим разбросом (СКО = = 0,0022) относительно экспериментальных данных о порогах цветоразличения зрительной системы.

В данной статье раскрыт новый метод измерения цветовых различий, позволяющий объективно определять визуальное цветовое различие длиной кратчайшего в порогах цветоразличения пути между точками цветов.

Предложенный метод (с одной итерацией «распрямления») обладает наименьшей среди других методов погрешностью, не превышающей ~1 %, и наименьшим разбросом относительно экспериментальных данных о порогах цветоразличения зрительной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мешков, В.В.** Физиологическая оптика и колориметрия [Текст] / В.В. Мешков, А.Б. Матвеев // Основы светотехники. Ч. 2. –М.: Энергоатомиздат, 1989.

2. **Малыхина, Г.Ф.** Разработка новых моделей цветовосприятия зрительной системой человека [Текст] / Г.Ф. Малыхина, И.А. Со // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 5. –С. 145–151.

3. **Со И.А.** Измерение цветовых различий на основе модели цветовосприятия [Текст] / И.А. Со, Г.Ф. Малыхина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 1. –С. 118–123.

НАУЧНЫЙ СЕМИНАР ФТК

23 сентября 2011 г.

В рамках договора о сотрудничестве между Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом и университетом Айзу (Япония) на факультете технической кибернетики состоялся научный семинар. Представляем аннотацию основного доклада семинара, с которым выступил Сайто Хироши (Saito Hiroshi), Ph.D., Assistant Prof., School of Computer Science and Engineering, University of Aizu.

H. Saito, V. Marakhovsky, E. Pyshkin

DESIGN AUTOMATION FOR ASYNCHRONOUS CIRCUITS

Commercial VLSI circuits of the day are based mostly on synchronous circuits which are controlled by global clock signals. However, if the integration technology advances more and more, synchronous circuits meet the following problems. The first one is the clock skew caused by wire delays. The clock skew may result in synchronization failures. The second problem is higher power consumption. If clock signals are distributed to many components with high frequency, the power consumption on the clock tree networks become significant. Finally, there is electro-magnetic interference (EMI). This means that when a transition of clock signals happens, the current begins to flow. Thus, if many components operate at the same time, the peak current becomes large. This results in high levels of EMI.

In contrast to synchronous circuits, asynchronous ones are controlled by pairs of local handshake signals, so they have lower power consumption and lower EMI level because of the absence of global clock signals. However, the difficulty of asynchronous design is conditioned by that hazard-free implementation is required. In addition to this, the design method is sensitive to what the delay model, the control protocol, and the data encoding scheme have been selected. The asynchronous design support is not yet well developed in existing environments. As a result, there are few asynchronous solutions reaching the production stage.

In our research we propose the method of asynchronous circuits design automations aimed both to application-specific integrated circuits (ASIC) and field-programmable gate array (FPGA) models. We develop a series of tools for design automation which actually include the following components: behavioral synthesis tool allowing the conversion from C language model to register transfer level (RTL) model (through operation scheduling, resource allocation, and control synthesis), static timing analysis support tool for timing verification, and support tools for delay adjustment. The layout synthesis support tool (floor planner for performance optimization) and power optimization tools are in design. The future steps include development of a converter form synchronous circuits to asynchronous ones, communication synthesis tool, and tools for verification and testing.

Х. Сайто, В.Б. Мараховский, Е.В. Пышкин

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ СХЕМ

(перевод В.Б. Мараховского и Е.В. Пышкина)

В настоящее время в основе проектирования интегральных схем лежит, главным образом, синхронный подход, при котором основу совместной работы элементов обеспечивают глобальные схемы синхронизации. Однако по мере роста степени интеграции при проектировании синхронных схем возникает ряд проблем. Во-первых, это сдвиг синхросигналов, обусловленный задержками в проводах. Во-вторых, это увеличенное потребление энергии, обусловленное необходимостью работы системы синхронизации на высокой частоте. Наконец, заметной проблемой являются электромагнитные возмущения, связанные с возникновением токов при перепаде синхросигналов. При совместной работе большого числа синхронизируемых компонентов пиковые токи могут становиться весьма существенными, что и служит причиной возникновения электромагнитных помех.

В отличие от синхронных схем, асинхронные схемы управляются парой локальных сигналов «запрос – ответ», что обеспечивает уменьшение потребляемой мощности и уровня электромагнитных помех. Тем не менее проектирование асинхронных схем предполагает преодоление ряда трудностей, наиболее существенная из которых – проблема состязаний и гонок. Кроме того, асинхронное проектирование чувствительно к выбору моделей задержек, управляющего протокола и способа кодирования данных. Следует отметить, что существующие в настоящее время системы автоматизации проектирования цифровых схем имеют ограниченную поддержку асинхронного проектирования. В связи с этим лишь немногие решения достигли уровня промышленной реализации.

В нашей работе предложена методика автоматизации проектирования асинхронных схем, ориентированная на реализацию спроектированных схем как на полузаказных интегральных схемах, так и на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). К настоящему времени разработаны следующие компоненты: средства преобразования поведенческих описаний с языка «Си» на язык уровня регистровых передач (с помощью операционного планирования, распределения ресурсов и синтеза управления), средства поддержки статического временного анализа и выбора величин встраиваемых задержек. Средства синтеза топологии (размещение с целью оптимизации производительности) и оптимизации энергопотребления находятся в процессе разработки. В ближайшей перспективе – разработка средств конвертирования синхронных схем в асинхронные, средств синтеза коммуникационного оборудования, а также средства верификации и тестирования синтезированных асинхронных схем.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

БАБКО Леонид Васильевич – *профессор кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: babko@kspt.ftk.spbstu.ru

БАЛТРУКОВ Николай Николаевич – *кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: bnn54@mail.ru

БЕЛЯЕВ Андрей Николаевич – *кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)552-50-72, e-mail: andrey.belyaev@gmail.com

БЕЛЯЕВА Нина Ивановна – *аспирант кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-59-60, e-mail: Ninafs@yandex.ru

БЕНДЕРСКАЯ Елена Николаевна – *кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: Helen.bend@gmail.com

БЕРЕЗКИН Алексей Владимирович – *аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: a.v.berezkin@gmail.com

ВАСИЛЬЕВ Алексей Евгеньевич – *кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: avasil@kspt.ftk.spbstu.ru

ВАСИЛЬЕВ Андрей Юрьевич – *аспирант, ассистент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: vasyliev.tau@gmail.com

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич – *действительный член РАН, Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ВЫТОВТОВ Анатолий Андреевич – *кандидат технических наук, доцент кафедры экспертизы потребительских товаров Санкт-Петербургского торгово-экономического института.*

194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50. Тел. +7(812)297-82-57, e-mail: vitovtov@rambler.ru

ГЛУХИХ Михаил Игоревич – *кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: glukhikh@kspt.ftk.spbstu.ru

ИВАНОВСКИЙ Ростислав Игоревич – *доктор технических наук, профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-16-39, e-mail: iri@dcn.ftk.spbstu.ru

КАРПОВ Юрий Глебович – *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-16-39, e-mail: karpov@dcn.ftk.spbstu.ru

КНОРРИНГ Вадим Глебович – *доктор технических наук, профессор кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-60-01

КОЛЕСОВ Юрий Борисович – *доктор технических наук, профессор, ведущий консультант Счетной палаты Российской Федерации.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

КОЗЛОВ Владимир Николаевич – *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: umo@citadel.stu.neva.ru

КОТЛЯРОВ Всеволод Павлович – *кандидат технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

КУЗНЕЦОВ Андрей Николаевич – *аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: onix78@bk.ru

КУЛИКОВ Кирилл Геннадьевич – *кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики и системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. +7(812)552-67-50, e-mail: kulikov_kg@hotbox.ru

КУПРИЯНОВ Валентин Евстафьевич – *кандидат технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: kupr4@yandex.ru

КУРМАШЕВ Арон Даутханович – *кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-59-60

ЛЫПАРЬ Юрий Иванович – *доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: ylup@mail.ru

МАГЕР Владимир Евстафьевич – *кандидат технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

МАКСИМЕНКО Сергей Леонидович – *старший преподаватель кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-22-38, e-mail: sl_max@kspt.ftk.spbstu.ru

МАЛЫХИНА Галина Федоровна – *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных измерительных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

МАРАХОВСКИЙ Вячеслав Борисович – *доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: vbmarak@gmail.com

МЕЛЕХИН Виктор Федорович – *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: melekhin@kspt.ftk.spbstu.ru

МЕШАЛКИНА Марина Николаевна – *кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем экологической безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29. Тел. +7(812)550-40-44, e-mail: meshalkina_mari@mail.ru

МОЛОДЯКОВ Сергей Александрович – *кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. +7(812)552-76-66, e-mail: molod@cef.spbstu.ru

МУРГО Андрей Игоревич – *студент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18

НГУЕН Данх Хоа – *аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: ndkhoa82@gmail.com

НЕСТЕРОВ Сергей Александрович – *кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-14

ПТИЦЫНА Лариса Константиновна – *доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-14, e-mail: ptitsina_lk@inbox.ru

ПЫШКИН Евгений Валерьевич – *кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: pyshkin@ftk.spbstu.ru

РОСТОВ Николай Васильевич – *кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: rostovnv@mail.ru

САРАЛИЙСКИЙ Артем Александрович – *аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий в проектировании Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

САЙТО Хироши (SAITO Hiroshi) – *Ph.D., Assistant Prof., School of Computer Science and Engineering, University of Aizu, Japan*.

Tsuruga, Ikki-machi, Aizu-Wakamatsu, Fukushima 965-8580, Japan. E-mail: hiroshis@u-aizu.ac.jp

СЕНИЧЕНКОВ Юрий Борисович – *доктор технических наук, профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-16-39

СКВОРЦОВ Александр Николаевич – *аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, магистр техники и технологии*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: alskvorcov@gmail.com

СМИРНОВ Николай Георгиевич – *аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: nikolai.smirnov@gmail.com

СО Ирина Александровна – *аспирант кафедры информационных измерительных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: Irene_So@mail.ru

СОТНИКОВ Кирилл Андреевич – *сотрудник кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-16-39, e-mail: sotnikov@dcn.ftk.spbstu.ru

СТЕГАНЦОВ Андрей Витальевич – *электроник кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

ТУТЫГИН Владимир Семенович – *кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. +7(812)552-76-66, e-mail: vs4141@mail.ru

ФЕДОТОВ Александр Александрович – *ассистент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-42-18, e-mail: afedotov@spbstu.ru

ФИЛИППОВ Алексей Семёнович – *кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-16-19, e-mail: filippov@eda-server.ftk.spbstu.ru

ФИРСОВ Андрей Николаевич – *кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: anfirs@yandex.ru

ЦЗЫЧЭНЬ Чжан – *аспирант кафедры интеллектуальных распределенных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ЧЕРКЕСОВ Геннадий Николаевич – *доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

ЧЕРНЕНЬКАЯ Людмила Васильевна – *доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail:Ludmila@mv.stu.neva.ru

ЧЕРНОРУЦКИЙ Игорь Георгиевич – *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и управляющих систем, декан факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: dean@ftk.spbstu.ru

ШАПОВАЛОВ Андрей Анатольевич – *ассистент кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. +7(812)297-59-60, e-mail: aa_shapovalov@mail.ru

ШЕДОВ Сергей Владимирович – *аспирант кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: sergey@shedov.ru

ЮЖАКОВ Андрей Васильевич – *программист кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Бабко Л.В., Мелехин В.Ф. ИСТОКИ СОЗДАНИЯ ФАКУЛЬТЕТА ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ.

Рассмотрены истоки зарождения новых направлений кибернетики, вычислительной техники и информатики на трех факультетах Ленинградского политехнического института, начало формирования соответствующих научных школ и научно-преподавательских коллективов, а также побудительные мотивы, основные события и участники процесса создания нового факультета технической кибернетики.

Кнорринг В.Г. ВОСЕМЬ ДЕСЯТИЛЕТИЙ КАФЕДРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФТК – ВЗГЛЯД С ТРЕХ ТОЧЕК ЗРЕНИЯ.

Кафедра измерительных информационных технологий первой в Советском Союзе начала подготовку инженеров по электроизмерительной технике. Ее положение в стране и на факультете с тех пор существенно изменилось.

ЭЛЕКТРОПРИБОРОСТРОЕНИЕ. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ. ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ. ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ.

Васильев Ю.С., Черноруцкий И.Г. К ИСТОРИИ ПОЛЕТА ЮРИЯ АЛЕКСЕЕВИЧА ГАГАРИНА.

Представлена история становления и развития кафедры информационных и управляющих систем и ее научных направлений. Приведены малоизвестные широкому читателю факты об участии ученых кафедры в реализации крупнейших проектов второй половины XX в. – советских космических программ, в т. ч. программы пилотируемых космических полетов.

Васильев А.Е., Мурго А.И. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМ СЕТЕВОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ.

Проведен анализ особенностей обмена данными в распределенных системах управления на основе микроконтроллерных средств, определены структурные и технические подходы к обеспечению микроконтроллерных систем средствами сопряжения с вычислительными сетями, рассмотрена разработка аппаратного обеспечения блоков сопряжения, решены задачи разработки системного программного обеспечения.

ВСТРАИВАЕМАЯ СИСТЕМА. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. МИКРОКОНТРОЛЛЕР.

Тутыгин В.С., Южаков А.В. ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ ЛЧМ-СИГНАЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ СРЕДСТВАМИ ПЛИС XILINX.

Рассмотрена система реального времени цифровой обработки спутниковых ЛЧМ-сигналов, базирующаяся на использовании ПЛИС Xilinx и сигнального процессора TMS модуля ЦОС ADP64Z2APCI, обеспечивающая обнаружение и определение параметров ЛЧМ-сигнала. Описан способ автоматического оптимального определения порога шума и алгоритм обработки, реализующий сжатие потока мгновенных спектров спутниковых сигналов.

СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ. СПУТНИКОВЫЕ ЛЧМ-СИГНАЛЫ. ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА. ПОТОК СПЕКТРОВ. ПЛИС.

Скворцов А.Н. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ LVDS ПЕРЕДАТЧИКОВ.

Проведено сравнение трех основных принципов построения LVDS передатчиков с точки зрения их быстродействия и энергопотребления. Приведена математическая модель, учитывающая особенности рассматриваемых принципов построения, из которой выведены оценки предельно достижимого быстродействия и энергопотребления. Получен ряд математических соотношений, которые могут использоваться в инженерных расчетах при проектировании конкретных реализаций передатчиков с заданными требованиями к быстродействию и энергопотреблению.

LVDS. ПЕРЕДАТЧИК СИГНАЛОВ. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ СИГНАЛ. СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ. ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Максименко С.Л. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РЕИНЖИНИРИНГ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ HDL-СПЕЦИФИКАЦИЙ.

Рассмотрен подход к реинжинирингу цифровых устройств, основанный на автоматизированных преобразованиях структурных HDL-спецификаций. Предложена модель для представления устройств и языковые средства управления преобразованиями, разработана архитектура расширяемого программного средства автоматизации реинжиниринга. Описан созданный прототип программного средства и рассмотрены вопросы его интеграции в маршрут проектирования устройств на базе СБИС ПЛ.

ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА. ЯЗЫКИ ОПИСАНИЯ АППАРАТУРЫ. HDL. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. СТРУКТУРА. НЕТЛИСТ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ. РЕИНЖИНИРИНГ. АРХИТЕКТУРА. МОДЕЛЬ. ПРОТОТИП. ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО.

Беляева Н.И., Курмашев А.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТУРНЫХ РЕЖИМОВ ДВУХКООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ДВИЖЕНИЯ.

Решена задача повышения точности контурных режимов металлорежущего оборудования. Разработана структура системы воспроизведения программного движения с использованием функционального метода синтеза. Осуществлено моделирование систем с различными алгоритмами управления при идентичных параметрах приводов подачи, параметрических и координатных возмущениях.

СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ. ДИНАМИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ.

Глухих М.И., Максименко С.Л., Мелехин В.Ф., Филиппов А.С. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.

Изучена концептуальная модель построения высоконадежных вычислительных систем реального времени, учитывающая особенности архитектуры и иерархической организации вычислительных процессов в рассматриваемом классе систем, характер воздействий на вычислительные процессы потоков сбоев и отказов аппаратного обеспечения, состояние современной элементной базы, методов, технологии и инструментальных средств проектирования.

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОУРОВНЕВОГО РЕАГИРОВАНИЯ. ДОМЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОТКАЗЫ. САМОВОССТАНОВЛЕНИЕ.

Березкин А.В., Федотов А.А., Филиппов А.С. ТЕСТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ, ЗАДАННЫХ ВЫСОКОУРОВНЕВЫМИ СПЕЦИФИКАЦИЯМИ.

Рассмотрен комплекс средств верификации цифровых систем, включающий в себя набор методик синтеза тестов из спецификаций, заданных на языках высокого уровня, ориентированный на инструментальные средства, поддерживающие эти методики. Предложены способы синтеза тестов и встроенных средств тестирования, основанные на дополнительных правилах для UML диаграмм и System C моделях.

ВЕРИФИКАЦИЯ. UML СПЕЦИФИКАЦИЯ. ГЕНЕРАЦИЯ ТЕСТОВ. SYSTEM C. МЕТОДИКА. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА.

Птицына Л.К., Смирнов Н.Г. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ИНТЕГРАЦИИ СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СРЕДСТВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ.

Предложена формализация процесса формирования моделей интеграции сервис-ориентированных средств. Изложен метод определения показателей качества совместной работы служб. Определены показатели качества для типовых моделей интеграции.

СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА. СЕРВИСЫ. ИНТЕГРАЦИЯ. КАЧЕСТВО. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Фирсов А.Н. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА В ДВУХ ЧАСТНЫХ СЛУЧАЯХ.

Рассмотрены две задачи. Первая связана с исследованием качественных свойств решения задачи Коши для линеаризованного уравнения Больцмана в случае «жестких» потенциалов межмолекулярного взаимодействия (степенные потенциалы с показателем степени больше четырех). Показано, что если начальные условия обладают определенными свойствами, то установление равновесия происходит экспоненциально быстро. До последнего времени экспоненциальный характер установления равновесия был строго доказан только для пространственно-однородного случая. Вторая задача связана с построением точного ана-

литического решения (в виде степенного ряда по времени) решения задачи Коши для линеаризованного пространственно-однородного уравнения Больцмана. В основу доказательства сходимости упомянутого степенного ряда положено использование дискретного преобразования Лапласа и известные свойства оператора столкновений. Полученный результат позволяет строить явные аналитические приближения функции распределения, что может оказаться полезным в прикладных задачах, связанных с исследованиями течений разреженного газа.

УРАВНЕНИЕ БОЛЬЦМАНА. ЗАДАЧА КОШИ. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ ЗАТУХАНИЕ РЕШЕНИЙ. ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ. ДИСКРЕТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАПЛАСА.

Шаповалов А.А., Курмашев А.Д. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ.

Рассмотрены вопросы компьютерного моделирования промышленных роботов и дан краткий обзор существующих программных средств моделирования, предназначенных для научно-исследовательских целей. Сформулированы требования к ним. Описано разработанное специализированное программное обеспечение для моделирования программного движения промышленных роботов, представлены реализованные модели контурных систем управления.

МОДЕЛИРОВАНИЕ. КОНТУРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ. ПРОМЫШЛЕННЫЙ РОБОТ.

Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. ОТ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДО ПРОМЫШЛЕННОЙ ВЕРСИИ: НА ПРИМЕРЕ СРЕДЫ ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ RAND MODEL DESIGNER.

Обсуждены проблемы разработки визуальных сред моделирования сложных динамических систем. В качестве примера выбраны продукты семейства MvStudium, разрабатываемые авторами на протяжении пятнадцати лет. Рассматриваемые среды используют технологию объектно-ориентированного компонентного моделирования кусочно-непрерывных динамических систем. Проведено сравнение требований к системам различного вида, предназначенным для учебной и научной работы и для разработки промышленных систем большими коллективами.

КОМПОНЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. «ФИЗИЧЕСКОЕ» МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВСТРОЕННЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА БАЗЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ. СЛОЖНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.

Ивановский Р.И. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.

Рассмотрены некоторые прикладные аспекты теории чувствительности при создании и упрощении моделей, при анализе нерасчетных режимов работы и синтезе комплексных систем обработки информации и систем управления. Показана связь проблем анализа чувствительности и грубости систем управления.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. НЕРАСЧЕТНЫЙ РЕЖИМ. СИСТЕМА. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ. ГРУБОСТЬ.

Сениченков Ю.Б., ЦзычэньЧжан. КОНВЕРТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ.

Рассмотрена новая методика конвертации моделей, написанных на языке пакета Simulink в модели пакета RMD. Конвертация основана на UML-описаниях библиотечных блоков. Разработан макет конвертора и его работоспособность проверена на тестовом наборе.

СЛОЖНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. СРЕДЫ ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. КОНВЕРТАЦИЯ МОДЕЛЕЙ.

Беляев А.Н., Ивановский Р.И., Карпов Ю.Г., Сотников К.А. SMART GRID. РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЙ.

Показан общий подход к определению понятия «Smart Grid». Предложена методология формального описания и планирования разработки отдельных законченных приложений Smart Grid на основе технологических матриц. Представлен подход к разработке системы интеллектуального управления Smart Grid на основе прогнозного моделирования. Указаны другие работы, проводимые в СПбГПУ в рамках концепции внедрения Smart Grid.

SMART GRID. АКТИВНО-АДАПТИВНАЯ СЕТЬ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СЕТЬ. УМНАЯ СЕТЬ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. УПРАВЛЕНИЕ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МАТРИЦА.

Куликов К.Г. ЗАДАЧА РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ТЕЛАХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ, МОДЕЛИРУЮЩИХ КЛЕТКИ КРОВИ ДЛЯ СЛУЧАЯ IN VIVO.

Предложена математическая модель для прогноза оптических характеристик (коэффициента преломления и поглощения) моделируемой биоткани (эпидермиса, верхнего слоя дермы, нижнего слоя дермы, крови и ее форменных элементов) и определения скорости кровотока в капиллярном русле, зондируемых лазерным пучком для случая in vivo. При этом форменные элементы крови моделируются частицами неправильной формы различного размера, произвольно ориентированными в свободном пространстве.

ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. КОЭФФИЦИЕНТ ПРЕЛОМЛЕНИЯ. ФОРМЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КРОВИ.

Ростов Н.В. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ В КОМПЬЮТЕРНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.

Рассмотрены задачи параметрической идентификации динамических объектов управления в скалярных и векторных постановках. Предложены методики-сценарии последовательного (поэтапного) решения задач линейной и нелинейной идентификации, сочетающих скалярный поиск на начальных этапах по интегральным критериям, косвенное зондирование на сетках весов аддитивных критериев и прямое зондирование по векторным критериям с применением генетического алгоритма. Приведены примеры поиска Парето-оценок параметров линейной и нелинейной моделей электромеханического объекта.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ, АДДИТИВНЫЙ И ВЕКТОРНЫЙ КРИТЕРИИ. ЗОНДИРОВАНИЕ. ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ.

Черкесов Г.Н. ПРОБЛЕМА ЗИП И ЗАДАЧА ФОРМИРОВАНИЯ НОВОГО РАЗДЕЛА ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ.

Рассмотрены идея, некоторые результаты точного расчета надежности систем при наличии ЗИП и перспективы развития нового раздела теории надежности. Впервые появляется возможность оценить величину погрешности и качество приближенной методики. Излагаемые теория и методы расчета не требуют учета показателей достаточности комплекта ЗИП. Поэтому они могут рассчитываться только для сведения.

НАДЕЖНОСТЬ. ВОССТАНАВЛИВАЕМАЯ СИСТЕМА. ЗАПАСНАЯ ЧАСТЬ. КОМПЛЕКТ ЗИП. ПОКАЗАТЕЛЬ ДОСТАТОЧНОСТИ. СТРАТЕГИЯ ПОПОЛНЕНИЯ.

Лыпарь Ю.И., Балтруков Н.Н., Скворцов А.Н. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТЧИКА ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ СТАНДАРТА LVDS НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ СИСТЕМНО-СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА.

Рассмотрены проблемы структурного синтеза интеллектуальных блоков заказных интегральных микросхем. Предложен новый подход к процессу проектирования, позволяющий эффективно учитывать вербальные и противоречивые требования к проектируемым блокам. В качестве примера выполнен синтез IP блока передатчика дифференциальных сигналов стандарта LVDS.

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ БЛОК. МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ПЕРЕДАТЧИК СИГНАЛОВ. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ СИГНАЛ.

Васильев А.Ю., Куприянов В.Е. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ПО ВЫХОДУ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ.

Предложен метод синтеза регуляторов по выходу с использованием процедуры редукции по сингулярным числам Ганкеля и перехода от задачи синтеза регуляторов по состоянию к задаче синтеза регуляторов по выходу.

РЕДУКЦИЯ. СИНГУЛЯРНЫЕ ЧИСЛА ГАНКЕЛЯ. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ПО ВЫХОДУ.

Бендерская Е.Н. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗРАБОТКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ.

Проведен анализ тенденций развития методов искусственного интеллекта и показано место биоинспирированных методов при решении задач обработки информации и управления. Отмечена роль синергетической парадигмы и методов на основе хаотической динамики как логического продолжения направления интеллектуализации систем и усложнения мягких вычислений.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ. ТЕОРИЯ ХАОСА. НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА. СИНЕРГЕТИКА. МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. БИОИНСПИРИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ.

Лыпарь Ю.И., Молодяков С.А. МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНАЛОГОЦИФРОВЫХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЦЕССОРОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ.

Представлена методология системного проектирования оптоэлектронных процессоров, основанная на спиралевидной модели параллельного проектирования. Процессоры включают разнородные элементы: оптические и электронные, цифровые и аналоговые. ПЗС-фотоприемник рассмотрен как специализированный процессор.

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ПРОЦЕССОР. МЕТОДОЛОГИЯ. СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ФОТОПРИЕМНИК НА ПРИБОРЕ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ.

Нгуен Д.Х., Козлов В.Н., Фирсов А.Н. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ УПРАВЛЕНИИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПО СИСТЕМЕ ТРУБОПРОВОДОВ.

Дано аналитическое решение задачи о нестационарной транспортировке вязкой жидкости по системе трубопроводов при умеренных скоростях движения и при наличии регулирующих устройств (регуляторы расхода и давления, насосных и компрессорных станций) с нестационарным режимом работы в начале трубопроводной системы и в узлах ветвления труб.

УРАВНЕНИЕ НАВЬЕ–СТОКСА. НЕСТАЦИОНАРНОЕ ДВИЖЕНИЕ. ВЯЗКАЯ ЖИДКОСТЬ. СИСТЕМА ТРУБОПРОВОДОВ.

Кузнецов А.Н., Пышкин Е.В. АЛГОРИТМ СРАВНЕНИЯ НОТНЫХ ФРАГМЕНТОВ ПРИ ПОИСКЕ МУЗЫКАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО ОБРАЗЦУ МЕЛОДИИ.

Описаны существующие подходы к поиску и сравнению музыкальных фрагментов. Рассмотрен алгоритм сравнения нотных фрагментов Earth Mover's Distance (EMD), а также ситуации, в которых качество сравнения оказывается низким. Предложено улучшение алгоритма EMD, позволяющее учитывать значимость отдельной ноты в музыкальном фрагменте с точки зрения особенностей человеческого восприятия. Исследована возможность формализации процесса восприятия музыки человеком с помощью баз знаний и статистической информации, собранной в процессе поиска музыкальных фрагментов.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК. ПОИСК МУЗЫКИ. НОТНАЯ НОТАЦИЯ. АЛГОРИТМ.

Котляров В.П. КРИТЕРИИ ПОКРЫТИЯ ТРЕБОВАНИЙ В ТЕСТОВЫХ СЦЕНАРИЯХ, СГЕНЕРИРОВАННЫХ ИЗ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИЛОЖЕНИЙ.

Ключевой проблемой тестирования программного продукта является проверка соответствия семантики реализованного продукта семантике требований, в противном случае нахождение контрпримеров, демонстрирующих расхождения семантик. Сформулирован подход к созданию критерия покрытия требований конкретного проекта с учетом их семантики и реализации адекватного тестового набора. Предлагаемый подход к тестированию применим к промышленным проектам среднего и большого размера.

СЕМАНТИКА ТРЕБОВАНИЙ. ПОКРЫТИЕ ТРЕБОВАНИЙ. ТЕСТИРОВАНИЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ.

Нестеров С.А. МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТА АНАЛИЗА РИСКОВ.

Рассмотрены современные методики анализа рисков в области информационной безопасности и приведено описание разрабатываемой автором методики построения и оптимизации комплекса средств защиты.

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. АНАЛИЗ РИСКОВ. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ.

Магер В.Е., Саралийский А.А., Стеганцов А.В., Черненькая Л.В. ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СПБГПУ.

В рамках реализации Программы модернизации и развития СПбГПУ как национального исследовательского университета в Корпоративном центре качества СПбГПУ ведется разработка информационной системы менеджмента качества, которая должна аккумулировать данные существующих в Университете информационных систем, обеспечивать сбор, хранение и статистическую обработку информации о деятельности Университета и его подразделений на базе методов системного анализа, создавать единое информационное пространство для управления качеством образования и принятия управленческих решений.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА. МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЗА.

Шедов С.В. СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ СТАНЦИОННЫХ ПОМЕХ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛЧМ-СИГНАЛОВ.

Рассмотрен новый подход к решению задачи обнаружения и определения параметров ЛЧМ-сигналов, основанный на дополнительной обработке потока мгновенных спектров, полученных с помощью БПФ, обеспечивающий компенсацию распределенной и сосредоточенной станционной помехи и флуктуационного шума, основанный на нахождении взаимной корреляции мгновенных спектров друг с другом, выделение вектора-признака, получение среднего спектра анализируемой группы кадров.

СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ. СПУТНИКОВЫЕ ЛЧМ-СИГНАЛЫ. ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА. БПФ. АНАЛИЗ СПЕКТРОВ. КОРРЕЛЯЦИЯ.

Тутыгин В.С. СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ЗАШУМЛЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ.

Рассмотрен новый способ повышения точности определения времени задержки радиолокационного эхо-сигнала от возбуждающего радиоимпульса, основанный на приблизительной оценке временного сдвига эхо-сигнала и итерационного алгоритма, включающего вычисление коэффициентов корреляции эхо-сигнала с несколькими эталонными сигналами, сплайн-интерполяцию, передискретизацию, итерационное уточнение значения времени задержки.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ ЭХО-СИГНАЛ. ЭТАЛОННЫЕ СИГНАЛЫ. КОРРЕЛЯЦИЯ. СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИЯ. ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЯ. ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ.

Вытовтов А.А., Мешалкина М.Н. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДЛИННОСТИ И КАЧЕСТВА МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ.

Производство и реализация некачественной фальсифицированной и контрафактной молочной продукции может наносить прямой ущерб здоровью населения. Рассмотрена возможность использования метода ИК Фурье спектроскопии для идентификации, определения подлинности и качества молочной продукции.

МОЛОЧНЫЕ ПРОДУКТЫ. ИНФРАКРАСНАЯ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИЯ. ИДЕНТИФИКАЦИЯ. ПОДЛИННОСТЬ. ФАЛЬСИФИКАЦИЯ.

Со И.А., Малыхина Г.Ф. НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ.

Предложен новый метод измерения цветовых различий в равноконтрастной области пространства. Новый подход к получению равноконтрастной области пространства заключается в применении локальных преобразований к бесконечно малым областям неевклидова цветового пространства с использованием данных о порогах цветоразличения, полученных интерполяцией или аппроксимацией экспериментальных данных.

ИЗМЕРЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ. ПОРОГ ЦВЕТОРАЗЛИЧЕНИЯ. РАВНОКОНТРАСТНОЕ ПРОСТРАНСТВО.

ANNOTATION

KEYWORDS

Babko L.V., Melekhin V.F. ORIGINS OF THE FACULTY OF COMPUTER SCIENCE.

The sources of the new fields in the area of engineering cybernetics, computer systems and informatics are rediscovered, taking into the consideration the history of three faculties of the Leningrad Polytechnical Institute. The paper brings on the discourse on how the research schools and. Faculty staff was organized and on what were the faculty creation reasons, motivations and related events, and what personalities were involved into the process.

Knorring V.G. 80 YEARS OF THE DEPARTMENT OF MEASURING INFORMATION TECHNOLOGIES: THREE POINTS OF VIEW.

The department of Measurement Information Technology was the first to begin training engineers in electrical instrumentation and measurement in the USSR. Its position in the country and inside the faculty since that time has changed significantly.

ELECTRICAL INSTRUMENTATION. EDUCATION. THEORY OF MEASURING. DATA ACQUISITION TECHNOLOGIES.

Vassiliev Yu.S., Chernorutsky I.G. TO THE HISTORY OF YURI GAGARIN'S SPACEFARING.

History of creation, development and research areas of the department of Information and Control Systems is briefly reviewed. In particular, the paper discovers little-known facts about participation of department's researchers in the biggest projects of 20th century, including soviet man-rated space programs.

Vassiliev A.E., Murgo A.I. DESIGN OF MCU-BASED NETWORK INTERCONNECTION SUBSYSTEMS.

A problem of design of MCU-based network interconnection subsystems is considered. Special development kits, hardware and software examples are discussed.

EMBEDDED SYSTEM. DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM. MICROCONTROLLER.

Tutygin V.S., Yuzhakov A.V. SATELLITE LFM SIGNALS REAL TIME DIGITAL PROCESSING BASED ON USING PLD XILINX.

Digital processing of the satellite LFM-signals in real time, based on use PLD Xilinx and alarm processor TMS of DSP module ADP64Z2APCI, providing the LFM-signals parameters detection and definition is considered. The way of automatic optimum definition of a noise threshold and the algorithm of processing, realizing compression of a satellite spectra stream signals is described.

REAL TIME SYSTEM. SATELLITE LFM-SIGNALS. DIGITAL PROCESSING. STREAM SPECTRA. PLD.

Skvortsov A.N. ESTIMATION OF BOUNDARY TRANSFER RATE AND POWER CONSUMPTION AT DESIGNING LVDS TRANSMITTERS.

This paper presents the methodology for estimation of boundary transfer rate and power consumption of LVDS transmitters. Three LVSD construction principles are considered. Mathematical model for mentioned principles is constructed and described. A set of mathematical formulas for calculations in LVDS transmitter designing process is represented.

LVDS. TRANSMITTER. DIFFERENTIAL SIGNALLING. TRABSFER RATE. POWER CONSUMPTION. MATHEMATICAL MODEL.

Maximenko S.L. DIGITAL SYSTEMS AUTOMATED REENGINEERING BASED ON HDL SPECIFICATIONS.

In this paper we propose a method of digital devices reengineering based on automated transformations of HDL specifications. We provide an hierarchical device model and a language for transformation specification. An architecture of extendable automation tool was developed and implemented in a prototype. We describe the prototype structure and functionality and show a way of tool integration into existing design flow.

DIGITAL DEVICES. HARDWARE DESCRIPTION LANGUAGES. DESIGN AUTOMATION. STRUCTURE. NETLIST. TRANSFORMATION. REENGINEERING. ARCHITECTURE. MODEL. PROTOTYPE. PROGRAM TOOL.

Belyaeva N.I., Kurmashev A.D. STUDY CONTOUR MODES OF TWO-COORDINATE PLAYBACK PROGRAM MOTION SYSTEMS.

The problem of improving the accuracy contour modes of metal-cutting equipment is solved. The structure of the playback program motion was developed, using the functional method of synthesis. Simulation of systems with different control algorithms was realized under identical parameters of feed drives, coordinate and parametric perturbations.

CNC SYSTEMS. DYNAMIC PRECISION OF METAL-CUTTING EQUIPMENT.

Gluhih M.I, Maksimenko S.L., Melekhin V.F, Filippov A.S. ORGANIZATION AND DESIGNING OF HIGHLY RELIABLE COMPUTING SYSTEMS.

The conceptual model of creation of highly reliable computing systems of the real time, considering singularities of architecture and hierarchical arrangement of calculating processes in a considered class of systems, character of influences on calculating processes of flows of failures and failures of hardware support, a state of the modern element basis, methods, technology and work benches of designing is considered

CONCEPT OF MULTI-LEVEL REACTION. DOMAIN ORGANIZATION. INFORMATION FAILURES. SELFRECOVERY.

Berezkin A.V., Fedotov A.A., Filippov A.S. TESTING OF THE DIGITAL SYSTEMS SET BY HIGHER-LEVEL SPECIFICATIONS.

The complex of means of verification of the digital systems, including set of techniques of synthesis of tests from the specifications set in languages of high level, focused on the tool means supporting these techniques is considered. Ways of synthesis of tests and the built in means the testings based on additional rules for UML of diagrams and System C models are offered.

VERIFICATION. UML THE SPECIFICATION. GENERATION OF TESTS. SYSTEM C. THE TECHNIQUE. TOOL MEANS.

Ptitsina L.K., Smirnov N.G. THE DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF SERVICE INTEGRATION MODELS IN HETEROGENEOUS ENVIRONMENT.

The article introduces a formal technique of service integration modeling in terms of SOA. A method of determining a quality of service collaboration is proposed. Quality indicators are evaluated for common models of integrations.

SERVICE ORIENTED ARCHITECTURE. SERVICES. INTEGRATION. QUALITY. MODELLING.

Firsov A.N. EXPONENTIAL STABILITY AND EXACT SOLUTIONS OF THE BOLTZMANN EQUATION IN TWO SPECIAL CASES.

In the first part of the paper it is shown, that in the case of specific initial conditions, solutions of the Cauchy problem for linearized Boltzmann equation have exponential damping when time tends to infinity.

In the second part of the paper exact analytic solution of spatially homogeneous linearized Boltzmann equation is built by the use of discrete Laplace transform. The result may be useful in research tasks inside the area of applied rarefied gas dynamics.

BOLTZMANN EQUATION. CAUCHY PROBLEM. EXPONENTIAL STABILITY OF SOLUTIONS. EXACT SOLUTION. DISCRETE LAPLACE TRANSFORM.

Shapovalov A.A, Kurmashev A.D. COMPUTER SIMULATION OF CONTOURING CONTROL SYSTEMS OF ELECTRIC DRIVES OF INDUSTRIAL ROBOTS.

In this paper issues related to computer simulation of industrial robots are considered and brief overview of existent modeling software meant for scientific-research aims is presented. Demands to them are formulated. Developed special-purpose software for simulation of programmatic motion of industrial robots is described, realized models of contouring control systems are presented.

SIMULATION. CONTOURING CONTROL. INDUSTRIAL ROBOT.

Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. ACADEMIC, SCIENTIFIC, AND COMMERCIAL VERSIONS OF TOOLS FOR MODELLING AND SIMULATION OF COMPLEX DYNAMICAL SYSTEMS. COMPARATIVE ANALYSIS OF MVSTUDIUM TOOLS.

Problems of visual environment for modelling and simulations complex dynamical systems designing are discussed. Family of tools developed by MvStudium groupis used as an example. Comparative analysis of demands for different types of tools is done.

COMPONENT MODELLING. «PHYSICAL» MODELLING TECHNOLOGY. MODEL BASED DESIGN OF REAL TIME EMBEDDED SYSTEMS. COMPLEX DYNAMICAL SYSTEMS.

Ivanovsky R.I. APPLIED ASPECTS OF THE SENSIBILITY THEORY.

Several applied aspects of the sensitivity theory are considered in the creation and simplification of models, in the analysis of abnormal operating modes, and the synthesis of information processing systems and control systems. The relation between the problems of sensitivity analysis and robustness of control systems is presented.

SENSITIVITY. MODELLING. ABNNORMAL OPERATION MODE. SYSTEM. INFORMATION PROCESSING. CONTROL.

Senichenkov Yu.B., Dzechen Chgan. CONVERTING MODELS.

New method of automatically translation of models specification from Simulink modelling language to MVL language is presented. The method is based on UML-specification of library blocks. The model of convertor is designed and tested.

COMPLEX DYNAMICAL SYSTEMS. VISUAL ENVIRONMENT FOR MODELLING AND SIMULATION OF COMPLEX DYNAMICAL SYSTEM. AUTOMATICALLY TRANSLATION.

Belyaev A.N., Ivanovskiy R.I., Karpov Yu.G., Sotnikov K.A. SMART GRID. APPLICATIONS DEVELOPMENT.

The general approach to the Smart Grid concept is presented. Methodology of formal definition and development planning of separate mature Smart Grid applications basing on implementation matrices is proposed. An approach to intelligent Smart Grid control system based on predictive modeling is presented is presented. Concepts of other research activities carried out in SPbSPU are shown.

SMART GRID. INTELLIGENT GRID. MODELLING. PREDICTIVE MODELLING. MANAGEMENT. INTELLIGENT MANAGEMENT. IMPLEMENTATION MATRIX.

Kulikov K.G. THE PROBLEM SCATTERING LIGHT IN THE BODIES OF ARBITRARY SHAPE, SIMULATING BLOOD CELLS FOR THE CASE OF IN VIVO.

A mathematical model for predicting the optical properties (refractive index and absorption) of the simulated tissue (epidermis, upper dermis, the lower layer of the dermis, blood and blood corpuscles) and determine the velocity of blood in the capillary, the illuminated laser beam for the case in vivo. In this case, blood cells are modeled by irregularly shaped particles of various sizes, randomly oriented in free space.

LASER RADIATION. THE REFRACTIVE INDEX. BLOOD CELLS

Rostov N.V. MULTIOBJECTIVE IDENTIFICATION IN COMPUTER-AIDED DESIGN OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS.

The problems of parametrical identification of dynamical plants in scalar and vector formulations are considered. The techniques-scenarios of sequential (stage-by-stage) linear and nonlinear multiobjective identification are presented, which use scalar search with integral criteria on initial stages, indirect sounding on weight grids of additive criteria and direct sounding with vector criteria on final stages using genetic algorithm. The examples are given to Pareto-optimal parameter estimation for linear and nonlinear models of an electromechanical plant.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS. DYNAMICAL PLANTS. MULTIOBJECTIVE IDENTIFICATION. INTEGRAL, ADDITIVE AND VECTOR CRITERIA. SOUNDING. PARETO-OPTIMAL ESTIMATES.

Cherkesov G.N. THE SPARE PART ASSEMBLY PROBLEM AND WORKING OUT THE NEW SECTION OF RELIABILITY THEORY OF THE REPAIRABLE SYSTEMS.

In paper the idea and several new results of exact system reliability calculation with spare elements by direct inclusion of this kind of resources in the reliability models are considered. The theory and methods of reliability calculation do not require take in account the sufficiency index of the spare part assembly.

RELIABILITY. REPAIRABLE SYSTEM. SPARE PART. SPARE PART ASSEMBLY. SUFFICIENCY INDEX. REPLENISHMENT STRATEGY.

Lypar Yu.I., Baltrukov N.N., Skvortsov A.N. LVDS STANDARD DIGITAL SIGNALING TRANSMITTER DESIGN BASED ON THE THEORY OF SYSTEM STRUCTURAL SYNTHESIS.

In clause problems of structural synthesis of intellectual property blocks for custom integrated circuits. The new approach to the design process is offered. It allows effectively consider verbal and contradictory requirements to design target. As an example synthesis of IP block of the low voltage differential signaling transmitter (LVDS) is fulfilled.

STRUCTURAL SYNTHESIS. INTELLECTUAL PROPERTY BLOCK. DESIGN FLOW. SIGNALS TRANSMITTER. DIFFERENTIAL SIGNALLING.

Vassiliev A.Yu., Kupriyanov V.E. OUTPUT REGULATORS SYNTHESIS FOR LINEAR OBJECTS.

It is proposed in the article an output controller synthesis method using model order reduction procedure based on Hankel singular values and conversion from state controller synthesis problem to output controller synthesis problem.

REDUCTION. HANKEL SINGULAR VALUES. OUTPUT CONTROLLER SYNTHESIS.

Benderskaya E.N. ARTIFICIAL INTELLIGENCE: PERSPECTIVE TRENDS.

Paper focuses on the state-of-the art of artificial intelligence domain. Bio-inspired methods are considered in context of data processing and control problems. It is shown that synergetic paradigm together with methods based on chaotic dynamics of processing elements comprise most perspective trends in development of sophisticated intelligent systems.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE. CHAOS THEORY. NONLINEAR DYNAMICS. SYNERGETIC. MULTIDISCIPLINARY. BIO-INSPIRED METHODS.

Lypar Yu.I., Molodyakov S.A. SYSTEM DESIGN METHODOLOGY FOR ANALOGDIGITAL OPTOELECTRONIC SIGNAL PROCESSORS.

Methodology for system designing of optoelectronic processors is presented. The methodology is based on a spiral model of concurrent design. Processors include diverse elements optical and electronic, digital and analog. CCD-photodetector is regarded as a specialized processor.

OPTOELECTRONIC PROCESSORS. METHODOLOGY. SYSTEM DESIGN. CHARGE COUPLED DEVICES.

Nguyen D. Kh., Kozlov V.N., Firsov A.N. SOLUTION OF THE PROBLEM ON THE CONTROL OF UNSTEADY VISCOUS FLUID TRANSPORTATION IN PIPELINES SYSTEM.

The paper provides an analytical solution for the unsteady transport of viscous fluid in pipeline system at modera te speeds and in the presence of control devices (flow regulators and pressure pumping and compressor stations) with stationary regime of the initial pipeline system and the nodes of branching tubes.

NAVIER-STOKES EQUATION. UNSTEADY FLOW. PIPELINE SYSTEM.

Kuznetsov A.N., Pyshkin E.V. ALGORITHM FOR NOTATED MUSICAL FRAGMENTS COMPARISON IN SEARCHING FOR MUSIC BY A MELODY SAMPLE.

The paper describes existing solutions that suit various scenarios of music search. Pitfalls of the Earth Mover's Distance algorithm (EMD) are analyzed as well as situations where the quality of comparing music patterns is not good enough. The adaptation of the EMD algorithm taking into the consideration some characteristics of note significance in the given music fragment is proposed. Problems of human music perception factors formalization with the help of knowledge bases and statistical information gathered in process of music search are examined.

INFORMATION RETRIEVAL. MUSIC SEARCH. PITCH NOTATION. ALGORITHM.

Kotlyarov V.P. REQUIREMENT COVERAGE CRITERIA FOR TEST CASES GENERATED FROM APPLICATIONS' BEHAVIORAL MODELS.

A key problem for testing of a software product is how to certify that the semantics of its requirements is adequately realized in the given implementation, or alternatively to find a series of concrete counter-examples demonstrating the violation of particular requirements. This paper formulates approach to coverage criteria to determine the adequacy of a test suite. The suggested approach to testing was validated in a number of medium and large size industrial projects.

REQUIREMENT SEMANTICS. REQUIREMENT COVERAGE. TESTING AND VERIFICATION.

Nesterov S.A. SECURITY FACILITIES CONSTRUCTION AND OPTIMIZATION BASED ON RISK ANALYSIS.

Existing methods of risk analysis in the domain of information security are reviewed and a method of security facilities construction and optimization is presented.

INFORMATION SECURITY. RISK ANALYSIS. OPTIMIZATION METHODS.

Mager V.E., Saraliysky A.A., Stegantsov A.V., Chernenkaya L.V. INFORMATIONAL SUPPORT FOR THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF THE SAINT-PETERSBURG POLYTECHNICAL UNIVERSITY.

The Saint-Petersburg Polytechnical university is carrying out the Program on modernization and development, being possessed with the status of National Research University. In frames of this Program the Informational System, which must support all Quality Management procedures, is created under responsibility of the Corporative Quality Center.

Informational System should be assigned on accumulation of existing data from other University's informational systems, gaining, proceeding and storing an information on activities of the University and its' departments. Statistical processing is based on methods of System Analysis. Foreseen outcome – the unified informational platform for managing of quality in education as well as for managerial decision-making at the University.

INFORMATIONAL SYSTEM FOR QUALITY MANAGEMENT. MODEL FOR MANAGERIAL DECISION-MAKING. STATISTICAL PROCESSING OF DATA ON ACTIVITIES OF THE UNIVERSITY.

Shedov S.V. APPROACH TO COMPENSATION STATIONS NOISE FOR LFM-SIGNALS.

A new approach to solving the problems of detecting and determining the parameters of chirp signals based on the instantaneous flow of additional processing of the spectra obtained by FFT, which provides compensation for the distributed and lumped station noise and fluctuation noise, which is based on finding the cross correlation of the instantaneous spectra with each other, the allocation vector-variable, obtaining the average spectrum of the analyzed frames.

REAL TIME SYSTEM. SATELLITE LFM-SIGNALS. DIGITAL PROCESSING. FFT. SPECTRUM ANALYSIS. CORRELATION.

Tutygin V.S. ACCURACY INCREASING OF DELAY DEFINITION NOISED RADAR ECHO-SIGNALS.

A new approach to the decision of a problem of delay definition noised radar echo-signals from an exciting radio impulse based on initial approach of delay received by means of autocorrelation procedure, and additional digital iterative approach of exact delay using nonconventional combination of normalized cross-correlation echo-signal with reference signals, spline-interpolation, rediscretization are considered.

RADAR ECHO-SIGNALS. REFERENCE SIGNALS. CROSS-CORRELAION. SPLINE-INTERPOLATION. REDISCRETIZATION. ITERATIVE ALGORITHM.

Vytovtov A.A., Meshalkina M.N. APPLICATION OF INFRARED FOURIER SPECTROSCOPY FOR DETERMINE AUTHENTICATION AND QUALITY MILK FOOD.

Manufacturing and sale of ersatz and defective milk food makes direct damage to human health. Problems with all-round expert examination for all types of milk and milk food sold in the Russian markets are very actual. The possibility of using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) method for identification, authentication and detection of ersatz milk food is considered.

MILK FOOD. FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY (FTIR). IDENTIFICATION. AUTHENTICATION. FAKING.

So I.A., Malykhina G.F. A NEW METHOD FOR MEASURING COLOR DIFFERENCES.

A new method for measuring color differences in a uniform area of a color space is proposed. A new approach to obtaining the uniform area of the color space consists in applying local transformations to infinitesimal areas of non-Euclidean color space CIE xy with using data of color thresholds obtained by interpolation or approximation of experimental data.

COLOR MEASUREMENT. COLOR THRESHOLD. UNIFORM COLOR SPACE.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 6–1 (138) 2011

Том 1

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция журнала

канд. техн. наук, д-р экон. наук, профессор *А.В. Бабкин* – научный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции 552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 30.11.2011. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 29,76. Уч.-изд. л. 29,76. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.