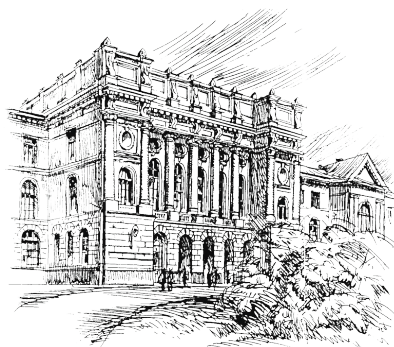


2(120)/2011



Научно-технические ведомости СПбГПУ

ИНФОРМАТИКА.
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ.
УПРАВЛЕНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки

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;
Борисова Т.А., технический секретарь;
Карнов 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, 2010



Содержание

Инфокоммуникационные технологии

Иванов А.А., Рубанов Д.Н., Смирнов А.А. Методика разработки электронного документооборота в автоматизированных комплексах радиомониторинга	7
---	---

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Симонова Л.А., Насыров И.И. Формирование базы прецедентов экспертной системы при диагностировании сложного оборудования	13
Петриченко Г.С., Дудник Л.Н., Срур М.Ю. Методика оценки финансового риска при проектировании и монтаже компьютерной сети предприятия	18
Востров А.В., Курочкин М.А. Обнаружение конфликтов при интеграции экспертных систем на онтологических моделях	25
Бутенко И.В. Построение аналитических отчетов в информационных системах на основе метаданных	32
Демурин В.Б. Этапы ранжирования потребностей человека экспертным методом (на примере сферы гостеприимства)	39

Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

Купцов В.Д. Шумы акустоэлектронных приемных устройств на поверхностных акустических волнах	47
Румянцев И.А., Коротков А.С. Методика расчета микроэлектронного усилителя мощности класса E с учетом паразитных параметров элементов	56

Системный анализ и управление

Эйсмонт Д.В. Система управления искусственным кровообращением с адаптацией по форме перфузионного импульса	63
Абрамов Н.В., Мухарлямов Р.Г., Мотовилов Н.В. Моделирование процесса управления в системах Чаплыгина	67
Потапенко Е.А., Солдатенков А.С., Яковлев А.О. Исследование алгоритмов управления процессом отопления здания с зависимым теплоснабжением	74
Фирсов А.Н. О свойствах решений уравнения Больцмана для «мягких» потенциалов	78

Вычислительные машины и программное обеспечение

Солдатенко Т.Н. Программа обслуживания комплекса жизнеобеспечения здания, оптимальная по нескольким критериям	81
Филичев Е.В., Устинов С.М. Разработка веб-приложений на основе моделей высокого уровня абстракции	86
Бородин А.М., Поршнева С.В. Аналитические способы оценки эффективности применения пространственных индексов в OLAP-системах	93

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Бабкова Е.В. Моделирование производства сложных изделий на основе сетевой технологии	101
Макарова Е.А. Метод формирования алгоритмов управления макроэкономической системой с использованием имитационных моделей	107
Сушников В.А. Моделирование упругой асимметрии весоизмерительной ячейки рамочного типа	114

Васильев А.Ю. Редукция многомерных систем на основе распределения весов входных и выходных сигналов	118
Титов А.В., Харьковской А.А., Чуканов В.О. Модели надежности программного обеспечения ответственного назначения	123
Никульский И.Е., Осадчий А.И. Оценка характеристик качества обслуживания IP-трафика в кольцевой оптической сети доступа	126
Нестерова Е.И., Бабкин А.В. Модели и алгоритмы управления качеством сложной технической системы (на примере кинематографической системы)	133
Верзилин Д.Н., Максимова Т.Г. Модели реакции социальных субъектов на целенаправленные воздействия	140
Калинин Т.С., Красий Н.П., Чернов А.В. Дифференциально-логические модели неисправностей в дискретных системах на основе математического аппарата конечных полей	145
Холодных П.В. Логико-математическая модель структурно-сложной технической системы и ее применение	151
Магомедов А.М. Об одной специальной реберной 2-раскраске двудольного графа	156
Голландцев Ю.А., Дубенецкий В.А. Расширение информационной модели проекта функциями управления состоянием объектов проектирования	160
Хисамутдинов Р.М. Автоматизация расчетов параметров инструментов червячного типа для компенсации систематической составляющей	166
Милославская В.Д., Трифонов П.В. Гибридный алгоритм мягкого декодирования кодов Рида-Соломона	169
Матвеев А.В., Иванов М.В., Шевченко А.Б. Алгоритм технико-экономического анализа построения системы обеспечения пожарной безопасности	174
Небылов В.А. Алгоритм оценки режима посадки морского летательного аппарата	178
Приборы, информационно-измерительные системы	
Дёмин С.В., Купцов В.Д., Валюхов В.П., Кателевский В.Я. Газоанализаторы на молекулярных ядрах конденсации для определения концентрации отравляющих веществ	183
Управление в социальных и экономических системах	
Зубков А.Ф., Деркаченко В.Н., Анцев Д.Л. Статистический анализ и прогнозирование развития российского рынка	191
Богомолов В.А., Сурина А.В. Использование модели для оценки уровня распространения знаний ..	195
Сведения об авторах	199
Аннотации	204

Contents

Infotelecommunication technologies

Ivanov A.A., Rubanov D.N., Smirnov A.A. <i>Technique of electronic documents circulation development in automated radiomonitoring complexes</i>	7
--	---

Telecommunications systems and computer networks

Simonova L.A., Nasyrov I.I. <i>Formation of expert system precedents base at diagnosing of complex equipment</i>	13
Petrichenko G.S., Dudnik L.N., Sroun M.Y. <i>Method of assessing the financial risk at designing and installation of the enterprise computer network</i>	18
Vostrov A.V., Kurochkin M.A. <i>Conflict detection in integration of knowledge systems in ontology models</i>	25
Butenko I.V. <i>Construction of analytical reports in information systems on the basis of metadata</i>	32
Demurin V.B. <i>The stages of ranking of human needs by expert method (on the example of hospital-ity services)</i>	39

Radio engineering, aeriels, SHF-devices

Kuptsov V.D. <i>The noise of receiving surface acoustic waves acoustoelectronic devices</i>	47
Rumyancev I.A., Korotkov A.S. <i>Microelectronic class e power amplifier design procedure with allowance for parasitic element parameters</i>	56

The system analysis and management

Ejsmont D.V. <i>Control system of cardiopulmonary bypass with adaptation by blood pulse form</i>	63
Abramov N.V., Mukharlyamov R.G., Motovilov N.V. <i>Process modeling of control in the chaplygin's system</i>	67
Potapenko E.A., Soldatenkov A.S., Yakovlev A.O. <i>Power saving algorithms research for management by heating process of the building with the dependent heat supply</i>	74
Firsov A.N. <i>On some properties of solutions of the boltzmann equation in the case of «soft» potentials</i>	78

Computers and the software

Soldatenko T.N. <i>The program of the complex of life-support of the building, optimum by several criteria</i>	81
Filichev E.V., Ustinov S.M. <i>Developing web applications using high-level abstraction models</i>	86
Borodin A.M. Porshnev S.V. <i>Analytical methods for estimating aggregating query cost in olap-systems based on spatial indexing</i>	93

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

Babkova E.V. <i>Modeling manufacture's complicated products parameters by network's technology</i>	101
Makarova E.A. <i>The method of formation of intellectual algorithms for macroeconomic system management with simulation models application</i>	107
Sushnikov V.A. <i>Modelling of elastic asymmetry of the weight measuring cell of frame type</i>	114
Vasilyev A.Y. <i>Mimo system reduction based on input and output weight distribution</i>	118
Titov A.V., Kharkovoy A.A., Chukanov V.O. <i>Reliability models of high-duty software systems</i>	123

Nikulsky I.E., Osadchy A.I. <i>Estimation of the characteristics of quality of service of the ip-traffic in a ring optical access network</i>	126
Nesterova E.I., Babkin A.V. <i>Models and algorithms for quality management of complex technical system (for example of cinematographic systems)</i>	133
Verzilin D.N., Maximova T.G. <i>Models of social actors' reaction on external impacts</i>	140
Kalinin T.S., Krsiy N.P., Chernov A.V. <i>Differential-logic fault models of discrete systems over finite fields</i>	145
Kholodnykh P.V. <i>Logical-mathematical model of structural-complex technical systems and it's application</i>	151
Magomedov A.M. <i>On special edge 2-coloring of bipartite grap</i>	156
Gollandzev Y.A., Dubeneckii V.A. <i>Information model extension using state management of engineering objects</i>	160
Khisamutdinov R.M. <i>Automation account in determining of parametres of «worm» type tool for systematic component equalization</i>	166
Miloslavskaya V.D., Trifonov P.V. <i>Hybrid soft decision decoding algorithm for Reed–Solomon codes....</i>	169
Matveev A.V., Ivanov M.V., Shevchenko A.B. <i>Algorithm of techno-economic analysis for support system of fire safety</i>	174
Nebylov V.A. <i>Algorithm of assessment for seaplane landing direction</i>	178

Devices, information-measuring systems

Demin S.V., Kuptsov V.D., Valjukhov V.P., Katelevski V.J. <i>The molecular condensation nucleus gas analyzers for determination of toxic substances concentration</i>	183
--	-----

Management in social and economic systems

Zubkov A.F., Derkachenko V.N., Antsev D.L. <i>Statistical the analysis and forecasting of development of the russian market</i>	191
Bogomolov V.A., Surina A.V. <i>Using of model in knowledge distribution assessment</i>	195
<i>About the authors</i>	199
<i>Abstracts</i>	204

УДК 681.3.01

А.А. Иванов, Д.Н. Рубанов, А.А. Смирнов

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

В структуре органов государственного управления в последние годы сформированы системы специализированного автоматизированного радиомониторинга (САРМ) в интересах обеспечения безопасности РФ. Комплекс задач системы САРМ может включать ряд специфических задач, решение которых имеет большое значение для безопасности России, например, выявление нелегитимных средств и абонентов радиосвязи, несанкционированного занятия частотного диапазона, нарушения технических регламентов радиосвязи, непреднамеренных или специально организованных радиоканалов утечки информации и источников помех [1]. Угрозы так называемых *информационных вызовов* требуют немедленного реагирования и принятия соответствующих мер защиты. Существенное усложнение радиоэлектронной обстановки в настоящее время связано с увеличением числа как штатных, так и нелегитимных источников радиоизлучения, их мобильностью и высокой плотностью размещения. В данной ситуации становится актуальной задача повышения эффективности комплексов САРМ.

Постановка задачи

Один из показателей эффективности комплекса САРМ – длительность цикла радиомониторинга (РМ) $t_{\text{ЦРМ}}$, которая должна обеспечивать своевременное представление данных РМ потребителю с учетом их старения для упреждения противоправных действий объектов РМ. Требуемое значение этого показателя $t_{\text{ЦРМ}}^{\text{треб.}}$ прямо пропорционально времени старения данных РМ и постоянно уменьшается в связи с усложнением радиоэлектронной обстановки. Цикл РМ состоит из процессов добывания, сбора, обработки и представления данных РМ потребителю, поэтому на его

длительность влияют специфические особенности, обусловленные структурно-статистическими методами ведения РМ с учетом фактора старения данных РМ [2]. Кроме того, одним из требований к средствам САРМ является унификация пакетов специального программного обеспечения (СПО), использование одинаковой структуры и формата данных для достижения возможности их применения в различных средствах САРМ [1]. Документооборот существующих комплексов САРМ не удовлетворяет указанным требованиям [3]. Для обеспечения их выполнения необходимо создание методики разработки электронного документооборота (ЭДО), учитывающей особенности ведения САРМ и ограничения на $t_{\text{ЦРМ}}$.

Методика разработки ЭДО в комплексах САРМ

Предлагаемая методика разработки ЭДО в комплексах САРМ представляет собой совокупность процедур, алгоритмов, способов и требований к СПО комплексов САРМ, обеспечивающему функции ЭДО. Данная методика разработана с учетом потребности информирования руководства о результатах САРМ, необходимости управления средствами и процессами САРМ. Методика охватывает большой поток разнородных данных, на основе которых должны формироваться электронные документы в комплексе САРМ; предполагает использование электронного документа (ЭД), формируемого при помощи настраиваемых шаблонов [3]. К основным процедурам методики предлагаем относить следующие: концептуальное моделирование ЭДО и функциональное моделирование ЭДО на нескольких уровнях декомпозиции, учитывающие разнородность обрабатываемых данных и скоротечность их старения.

На этапе концептуального моделирования определяется состав входящих и исходящих потоков документов, к которым относятся: входящие документы от отделов (служб) вышестоящих органов управления; входящие документы от подчиненных структур САРМ; информация по взаимодействию от лицензионных органов; результаты ведения САРМ; руководящие документы по организации и ведению САРМ; исходящие документы в отделы (службы) вышестоящих органов управления; информация о состоянии и персонале систем САРМ и документы управления средствами САРМ. На этом этапе также учитываются условия ведения САРМ, специфика района сбора информации, пропускная способность имеющихся каналов передачи данных для связи между постами комплекса и с вышестоящим органом.

Создание функциональной модели ЭДО и ее многоуровневая декомпозиция были осуществлены с помощью методологии моделирования IDEF3, что позволило структурировать и детально описать процесс разработки ЭДО до требуемого уровня детализации. Модель системы представ-

лена в виде древовидной структуры диаграмм, где верхняя диаграмма является наиболее общей (рис. 1), а самые нижние – наиболее детализированными. На данном уровне декомпозиции выделены следующие функции:

управление доступом – авторизация пользователя, управление данными системы безопасности, управление доступом к объектам ЭДО;

работа с ЭД – при наличии прав на работу с ЭД пользователю доступны функции *создания*, *поиска*, *просмотра*, *редактирования*, *удаления* и *отправки* ЭД;

администрирование – функции управления пользователями и их группами, классами ЭД, группами метаданных, правами и ролями;

заимствование (импорт) документов – предусмотрена возможность регистрации данных от взаимодействующих систем САРМ в виде ЭД;

делегирование (экспорт) документов – представляет собой процесс передачи данных в виде ЭД для взаимодействующих систем САРМ;

управление движением документов – функции работы с маршрутами документов (*создание*, *редактирование маршрутов* и их шаблонов);

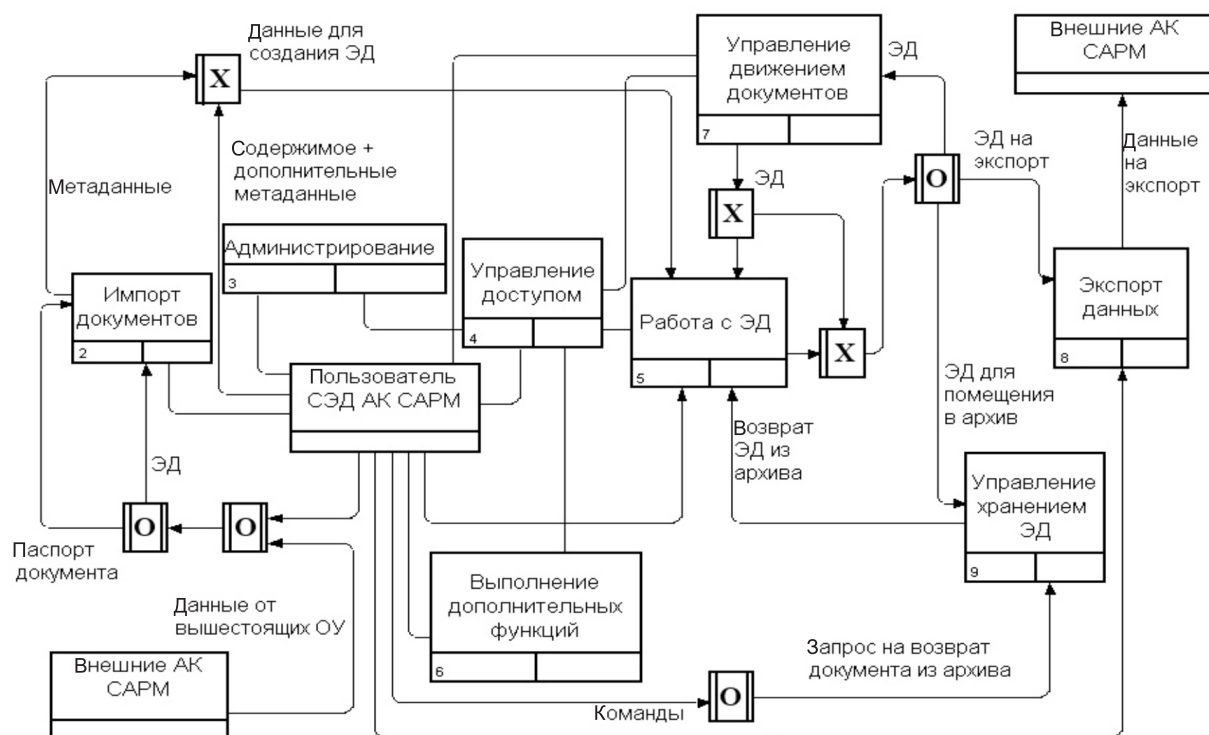


Рис. 1. Функциональная модель документооборота системы РМ

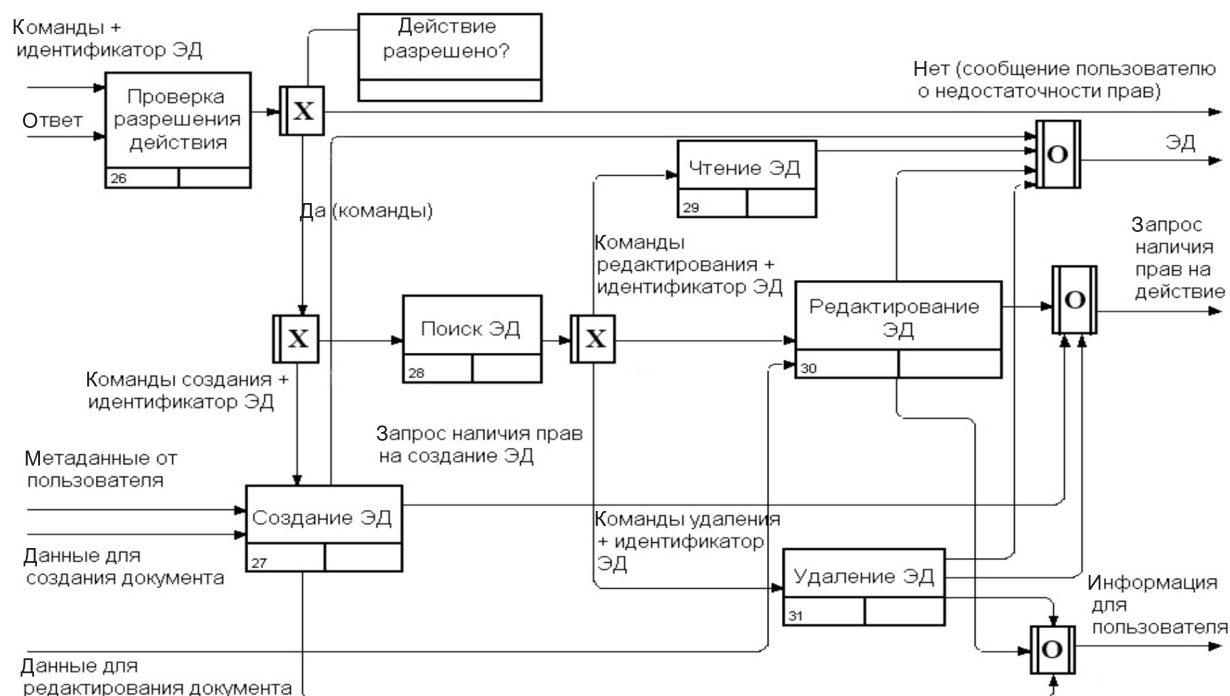


Рис. 2. Функциональная модель «Работа с электронным документом»

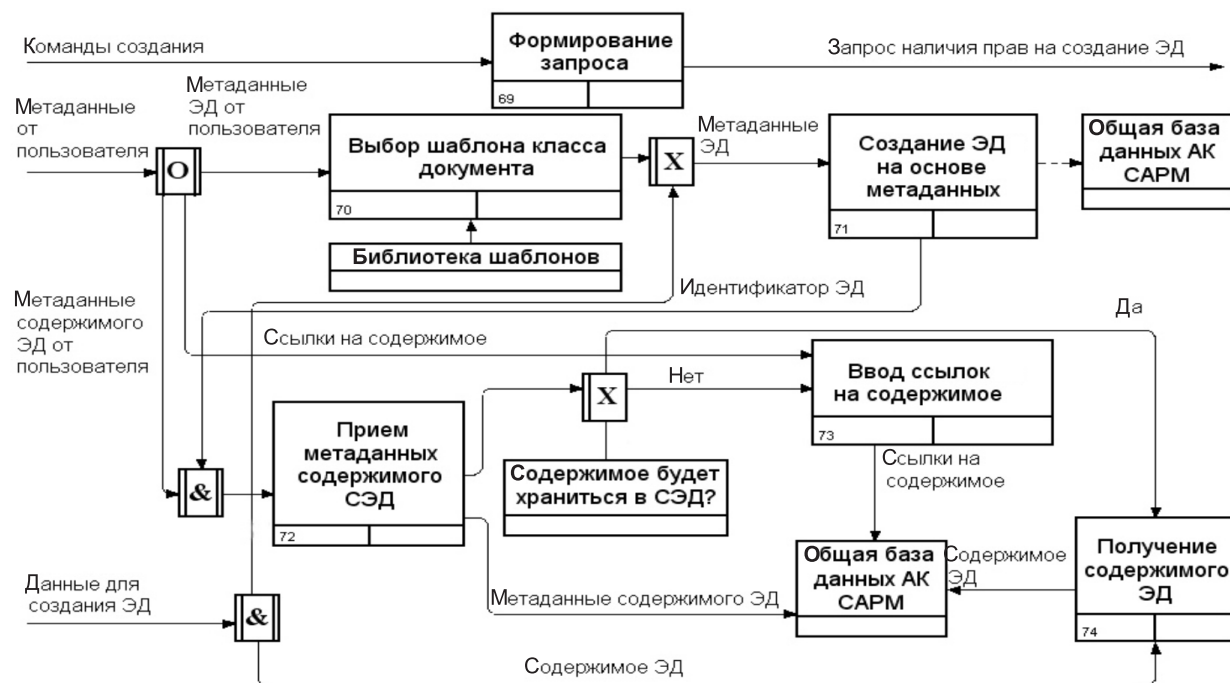


Рис. 3. Функциональная модель «Создание электронного документа»

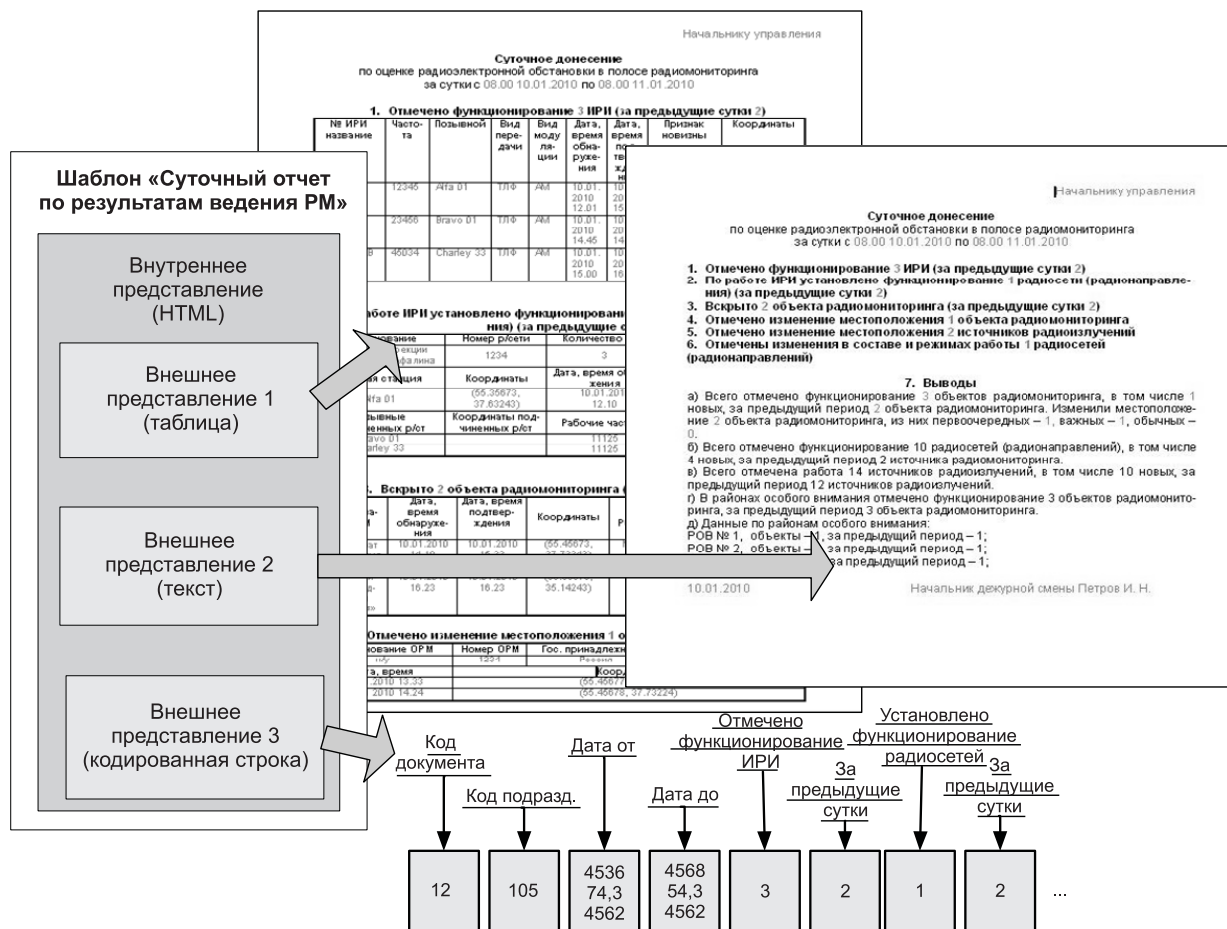


Рис. 4. Различные формы представления документа

предусмотрено создание шаблона маршрута для одного или группы ЭД;

управление хранением электронного докумен- та: помещение ЭД в архив, хранение, получение из архива;

выполнение дополнительных функций: функ- ции управления папками и закладками для обе- спечения целостности хранения ЭД.

Декомпозиция блока «Работа с ЭД» представ- лена на рис. 2.

Совокупность способов разработки ЭДО со- гласно предлагаемой методики определяется посредством дальнейшей декомпозиции функ- циональной модели, например, в виде детализа- ции уровня «Создание электронного документа» (рис. 3).

При *создании* ЭД в первую очередь выбирает- ся класс ЭД, к которому он будет относиться [3]. Далее заносится содержимое ЭД и заполняются

соответствующие его классу метаданные.

Для содержимого ЭД поддерживается два способа хранения. Первый предполагает, что ме- таданные создаваемого документа и его содержи- мое помещаются в базу данных полностью, т. е. ЭД полностью хранится в системе. Второй способ поддерживает создание и хранение содержимого ЭД вне базы, а в базу данных помещаются только его метаданные. При этом специальные метадан- ные содержат точное указание на место хранения содержимого документа.

Внедрение ЭДО в комплекс САРМ позволяет добиться повышения оперативности обработки и более эффективного использования возмож- ностей базы данных как средства хранения ин- формации. В то же время, ЭДО порождает новые риски, а невнимательность к защите может привести к срыву циклов обработки информации и управле- ния средствами САРМ.

Сравнение систем документооборота по показателю $t_{\text{ЦРМ}}$

Время цикла радиомониторинга $t_{\text{ЦРМ}}$, мин *	
$t_{\text{ЦРМ}} \text{ треб.}$	2,5 – 4,5
Бумажный документооборот	30 – 40
ЭДО на основе электронных форм	7 – 10
ЭДО на основе предложенной методики	1,5 – 2

* Указаны min и max значения показателя $t_{\text{ЦРМ}}$ для различных условий ведения РМ

Базовый элемент ЭДО комплекса – электронный документ, представляющий собой файл или совокупность записей в базе данных. Хранение ЭД в виде записей базы данных требует различия внутреннего и внешнего представления ЭД (рис. 4). Внешнее представление ЭД определяется требованиями вышестоящих органов и характеристиками имеющихся каналов передачи данных. Внутреннее представление ЭД определяется структурой и форматом документа, а также его назначением.

Для обеспечения защиты информации система САРМ как многопользовательская автоматизированная система с разграничением доступа, обрабатывающая информацию, содержащую государственную тайну, должна иметь подсистему обеспечения целостности, управления доступом, регистрации и учета действий пользователей и, следовательно, отвечать требованиям к автоматизированной системе класса 1Г [4].

В данном контексте мы рассматриваем ЭДО как подсистему САРМ, связывающую между собой, на уровне электронного документа, подсистемы добывания, обработки и передачи данных. Следовательно, к ЭДО как к подсистеме САРМ должны применяться те же требования по защите информации, что и ко всей системе САРМ в целом.

Экспериментальные результаты

Проведенные испытания комплекса САРМ с ЭДО, созданным по предложенной методике,

показали, что ее применение позволило повысить как качественные, так и количественные характеристики ЭДО комплекса. Так, была обеспечена унифицированность ЭДО, сопрягаемость комплексов САРМ на уровне ЭДО, при создании ЭД учитывается пропускная способность каналов передачи данных. За счет автоматического формирования ЭД, разделения внутреннего и внешних представлений ЭД, новой организации ЭДО и оптимизации документопотоков по методике [5] $t_{\text{ЦРМ}}$ было снижено до требуемого уровня (табл.).

Таким образом, суть предлагаемой методики заключается в многоуровневом представлении процессов ЭДО комплекса САРМ, обеспечивающем: построение технологической последовательности процедур ЭДО для различных классов ЭД в зависимости от необходимости информирования потребителя данных РМ и управления средствами добывания комплекса САРМ; автоматическое формирование ЭД, что позволяет сократить длительность цикла РМ до требуемых пределов; учет имеющихся результатов обработки данных РМ, условий ведения САРМ, ограничений на длительность цикла РМ; информационное сопряжение между постами комплекса САРМ и с вышестоящими органами; учет требований к ЭДО комплекса САРМ по форматам передаваемых документов, их идентификации.

Полученные результаты позволяют рекомендовать предложенную методику для создания ЭДО перспективных и совершенствования существующих комплексов САРМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рембовский, А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства [Текст]/ А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. –М.: Горячая линия – Телеком, 2006. –492 с.
2. Кудрявцев, А.М. Алгоритм «трассовой» обработки данных радиомониторинга [Текст]/ А.М. Кудряв-

цев, А.А. Смирнов, А.В. Федянин//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 1. –С. 38–42.

3. Зверев, С.В. Усовершенствованная модель электронного документа в подсистеме обработки автоматизированных комплексов радиомониторинга [Текст] /

С.В. Зверев, Д.Н. Рубанов // Сб. тр. XIX межвуз. НТК ЧВВИИРЭ. –Череповец: ЧВВИИРЭ, 2010. –С.64–67.

4. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации [Текст].

–М.: Гостехкомиссия РФ, 1992.

5. **Гудов, А.М.** Об одной модели оптимизации документопотоков, реализуемой при создании системы электронного документооборота [Текст] / А.М. Гудов, С.Ю. Завозкин // Вычислительные технологии, 2006. –Т.11. –С.53–68.

УДК: 004.8.

Л.А. Симонова, И.И. Насыров

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ПРЕЦЕДЕНТОВ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ СЛОЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Как правило, на предприятиях машиностроения в качестве АРМ операторов используют стандартные офисные компьютеры. Иногда их монтируют в корпус, подходящий для монтажа в серверную стойку. Однако это не позволяет избавиться от всех проблем, присущих офисным компьютерам.

Жесткий диск (винчестер, HDD) – один из самых ненадежных узлов АРМов операторов и серверов АСУП. Связано это с тем, что жесткие диски имеют как механические подвижные узлы, так и электронные платы управления. Любой механический узел вносит большую ненадежность, связанную с тем, что он сильно страдает от вибраций, трясок, ударов, перегревов, имеет ограниченный срок службы.

Решение данных проблем возможно путем диагностики возникающих неисправностей, а в дальнейшем – и прогнозирования бесперебойной работы сложного оборудования АСУП. Предлагается разработать диагностическую экспертную систему, созданную на базе прецедентов.

Для наиболее полной диагностики возможных неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации винчестеров, предлагаем создать экспертную систему, база знаний которой, состоящая из прецедентов, разделена на несколько уровней. Каждый следующий уровень позволяет наиболее подробно описать возникшую неисправность. Перед созданием базы знаний необходимо провести предварительную кластеризацию по уже имеющимся в базе данных значениям.

Кластеризация или естественная классификация – это процесс объединения в группы объектов, обладающих схожими признаками. В отличие от обычной классификации, где количество групп объектов фиксировано и заранее определено набором идеалов, здесь ни группы, ни их ко-

личество заранее не определены и формируются в процессе работы системы исходя из определенной меры близости объектов [1, 2].

Кластеризация в разрабатываемой гибридной системе диагностирования оборудования АСУП предназначена для разбиения совокупности данных, полученных от специальных программ – агентов диагностики, на однородные группы (кластеры или классы). Если данные полученной выборки представить как точки в признаковом пространстве, то задача кластеризации сводится к определению «сгущений точек». Цель кластеризации полученных данных – поиск существующих структур.

Кластеризация данных является описательной процедурой, она не делает никаких статистических выводов, но дает возможность провести разведочный анализ и изучить «структуру данных диагностируемых компонент оборудования АСУП».

Во всех современных винчестерах имеется область, где хранятся данные S.M.A.R.T. (Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology – технология оценки состояния жесткого диска встроенной аппаратурой самодиагностики, а также механизм предсказания времени выхода его из строя [3]). Однако в зависимости от производителя и конкретной модели винчестера количество и виды измеряемых параметров могут сильно различаться. Для решения этой проблемы данные собирались с винчестеров различных моделей большинства известных производителей.

Во время предварительной кластеризации были использованы данные о переназначенных секторах (bad-секторах), полученные из S.M.A.R.T. области 307 винчестеров. Результаты, собранные с помощью программ-агентов, приведены на рис. 1.

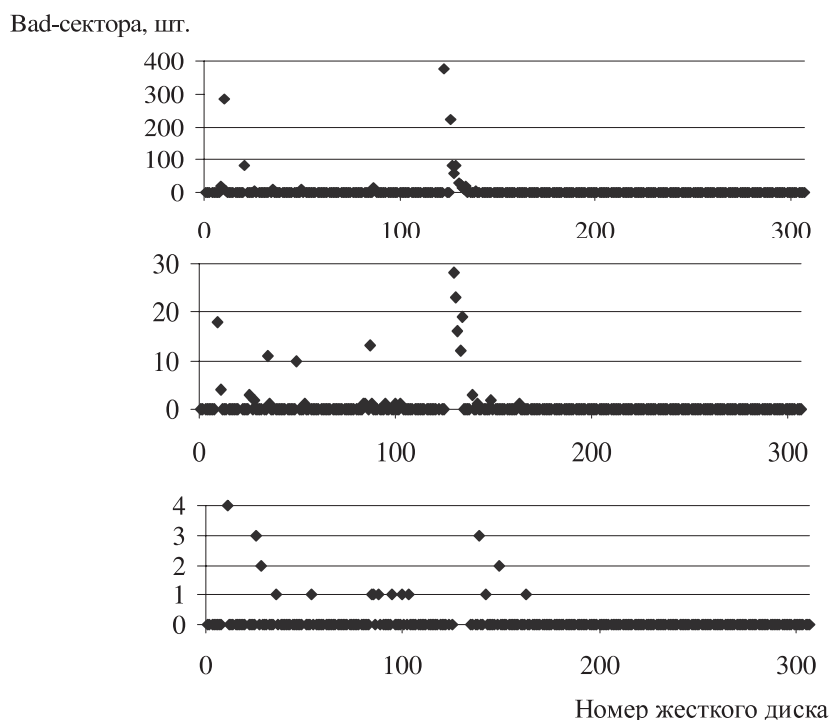


Рис. 1. Результат кластеризации данных

Исходя из этих результатов, экспертом достаточно легко может быть выбрано предварительное количество кластеров, равное трем. Этот выбор обусловлен тем, что в рассмотренном примере встречаются группы значений количества переназначенных секторов от 57 до 377, от 10 до 28, от 0 до 4. Ввиду многочисленности можно группу со значением нуль также выделить в отдельный кластер. В дальнейшем количество кластеров может изменяться экспертом, либо в автоматическом режиме в процессе самообучения, если дополнить схему специальным элементом – нейронной сетью.

После проведения кластеризации данные, поступающие от агентов диагностики, попадают на первый уровень правил экспертной системы, на котором производится определение их принадлежности какому-либо из известных кластеров (рис. 2). В случае если значения параметра не попадают ни в один из ранее известных кластеров, необходимо вмешательство эксперта для определения того, является ли текущее значение выбросом, либо необходимо создание нового правила. При отслеживании только одного из параметров оборудования АСУП, после того как кластер определен, происходит нормализация данных, значение для нормализации выбирается соответ-

ственно этому кластеру [4]. Далее происходит переход на следующий уровень правил.

На втором уровне правил происходит применение нижнего уровня описательных правил. Значение каждого параметра делится на четыре возможных интервала, каждому из которых соответствует свое описание. Для каждого из интервалов назначается свой код от 1 до 4, который помогает в составлении дальнейших уровней правил. Описание значений интервалов параметров проблематично для восприятия большинством пользователей. В связи с этим происходит переход на следующий уровень правил.

На третьем уровне правил проводится экспертная оценка состояния и надежности сохранности информации винчестера в баллах. При этом производится оценка значений кодов интервалов параметров, полученных на втором уровне правил. Далее происходит переход на четвертый уровень правил.

На четвертом уровне правил экспертом производится общая оценка состояния винчестера на основании оценки баллов, полученных для винчестера на предыдущем уровне правил. Данная оценка максимально обобщена и доступна для понимания большинством пользователей.



Рис. 2. Обобщенная последовательность формирования базы знаний

База знаний строится на основе метода прецедентов*. Первичное заполнение базы знаний производится экспертом. Обобщенная схема создания правила экспертом приведена на рис. 3.

Дальнейшее заполнение базы знаний можно условно поделить на следующие этапы:

- 1) сбор подробной информации о поставленной задаче;
- 2) сопоставление этой информации с деталями прецедентов, хранящихся в базе, для выявления аналогичных случаев;

* Прецедент – это описание ситуации в сочетании с подробным указанием действий, предпринимаемых в данной ситуации [5].

- 3) выбор прецедента, наиболее близкого к текущей проблеме, из базы прецедентов;

- 4) адаптация выбранного решения к текущей проблеме, если это необходимо;

- 5) проверка корректности каждого вновь полученного решения;

- 6) занесение детальной информации о новом прецеденте в базу прецедентов.

Таким образом, вывод, основанный на прецедентах, представляет собой такой метод анализа данных, который делает заключения относительно данной ситуации по результатам поиска аналогий, хранящихся в базе прецедентов.

Данный метод по своей сути относится к категории «обучение без учителя», т. е. является «са-

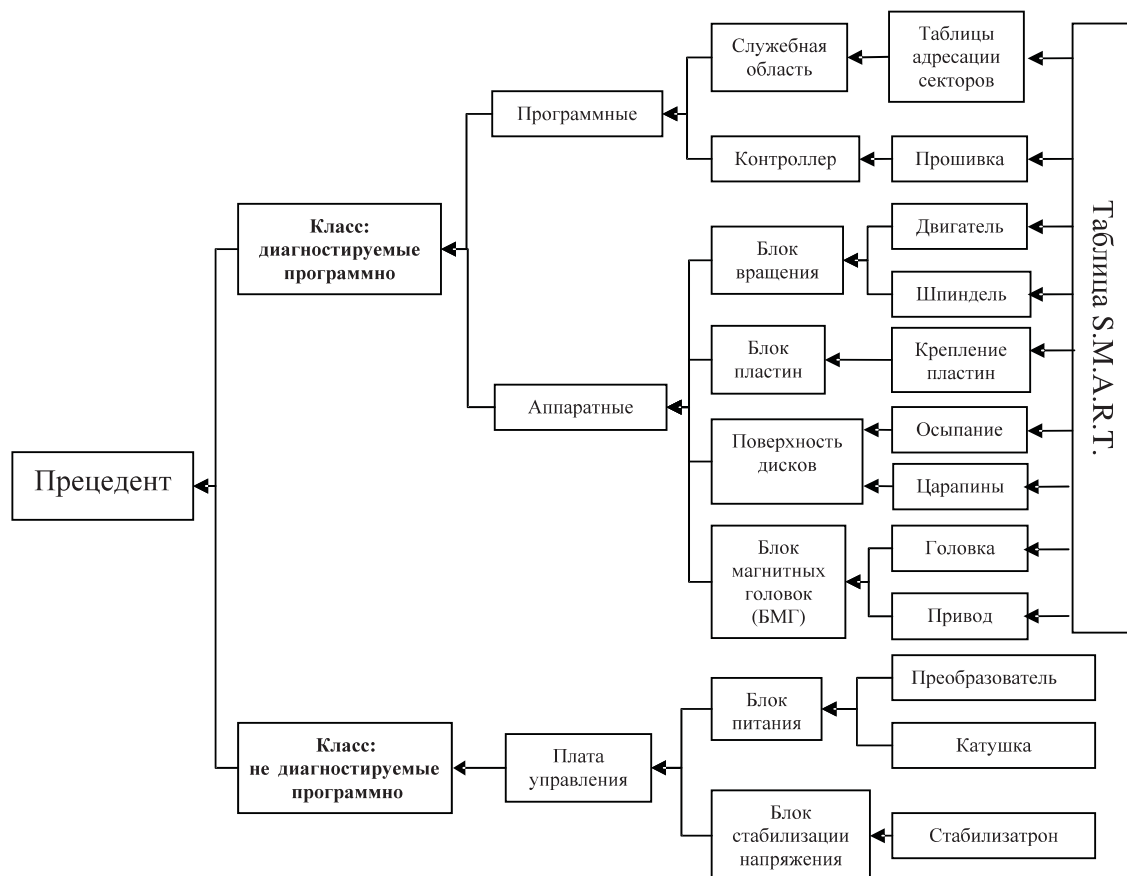


Рис. 3. Схема создания правила экспертом

Таблица 1

Правила для данных, полученных из S.M.A.R.T. области винчестера

Уровень 1				
№ правила		Если	То	
1		$X \in$ известному кластеру	Переход на уровень 2	
2		$X \in$ новому кластеру	Необходимо вмешательство эксперта для создания правила	
Уровень 2				
№	ID пар X	Если	И	То
1	1	$X \geq 1$	$X \in$ кластеру 1	Нет ошибок при чтении данных с диска (код 1)
2	1	$1 \geq X \geq 0,54$	$X \in$ кластеру 1	Мало ошибок при чтении данных с диска (код 2)
3	1	$0,54 \geq X \geq$ Критическое значение	$X \in$ кластеру 1	Много ошибок при чтении данных с диска (код 3)
4	1	Критическое значение $\geq X$	$X \in$ кластеру 1	Критически много ошибок при чтении данных с диска (код 4)



Таблица 2

Правила для общей оценки состояния винчестера

Уровень 3			
№	Если	И	То
1	Все параметры = Код 1	Все параметры € известным кластерам	Оценка состояния винчестера 10 баллов. Оценка надежности сохранности информации 10 баллов
2	1 параметр = Код 2	Остальные параметры = Код 1	Оценка состояния винчестера 9 баллов. Оценка надежности сохранности информации 10 баллов
3	2 параметра = Код 2	Остальные параметры = Код 1	Оценка состояния винчестера 9 баллов. Оценка надежности сохранности информации 9 баллов
4	3 параметра = Код 2	Остальные параметры = Код 1	Оценка состояния винчестера 8 баллов. Оценка надежности сохранности информации 9 баллов
Уровень 4			
№	Если	И	То
1	Оценка состояния винчестера = 10 баллов	Оценка надежности сохранности информации = 10 баллов	Максимальная работоспособность и надежность
2	Оценка состояния винчестера ≥ 7 баллов	Оценка надежности сохранности информации ≥ 7 баллов	Хорошая работоспособность и надежность
3	Оценка состояния винчестера ≥ 4 баллов	Оценка надежности сохранности информации ≥ 4 баллов	Удовлетворительная работоспособность и надежность
4	Оценка состояния винчестера ≥ 3 баллов	Оценка надежности сохранности информации ≥ 3 баллов	Низкая работоспособность и надежность
5	Оценка состояния винчестера ≥ 2 баллов	Оценка надежности сохранности информации ≥ 2 баллов	Критически низкая работоспособность и надежность

мообучающейся» технологией, благодаря чему рабочие характеристики каждой базы прецедентов с течением времени и накоплением примеров улучшаются. Разработка баз прецедентов по конкретной предметной области происходит на естественном для человека языке, следовательно, может быть выполнена наиболее опытными сотрудниками компании – экспертами или аналитиками, работающими в данной предметной области [6].

Следующим этапом разработки является составление правил для каждого уровня экспертной системы. На данном этапе эксперт, используя свои собственные наблюдения и научную литературу, максимально подробно описывает каждый

возможный прецедент [7]. Примеры правил для разработанной экспертной системы показаны в таблицах 1–2.

Таким образом, исследованный в работе метод создания экспертной системы позволяет наглядно представить правила создания базы прецедентов при диагностировании сложного оборудования АСУП на предприятиях машиностроения, а также в других отраслях народного хозяйства. Для этого база знаний, состоящая из прецедентов, должна быть разделена на несколько уровней. А для создания правил, в свою очередь, необходим алгоритм предварительной кластеризации, который значительно облегчает работу эксперта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Головко, В.А.** Нейронные сети: обучение, организация и применение [Текст] / В.А. Головко; Под ред. А.И. Галушкина // Сер. Нейрокомпьютеры и их применение. – М.: ИПРЖР, 2001. – Кн. 4. – 255 с.
2. **Kohonen, T.** Self-Organizing Maps [Текст]/T. Kohonen. –Springer, 1995. –501 с.
3. Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс] / Технология SMART. –Режим доступа: <http://www.ru.wikipedia.org/wiki/SMART>
4. **Змитрович, А.И.** Интеллектуальные информационные системы [Текст] / А.И. Змитрович. –Мн.: НТООО «ТетраСистемс», 1997. –368 с.
5. Элти, Дж. Экспертные системы: концепции и примеры [Текст] / Дж., Элти, М. Кумбс. –М.: Финансы и статистика, 1987. –191 с.
6. **Переверзев, В.Н.** Логистика: Справочная книга по логике [Текст] / В.Н. Переверзев. –М.: Мысль, 1995. –221 с.
7. Автоматизированное проектирование информационно-управляющих систем. Проектирование экспертных систем на основе системного моделирования: Монография [Текст]/ Науч. ред. Г.Г. Куликов. –Уфа: УГАТУ, 1999. –223 с.

УДК 004.7

Г.С. Петриченко, Л.Н. Дудник, М.Ю. Срур

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ФИНАНСОВОГО РИСКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И МОНТАЖЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

В ходе проектирования и монтажа компьютерной сети важной задачей является выбор исполнителя, наиболее подходящего для решения задач на данном этапе. В качестве критерия выбора исполнителя может выступать величина финансового риска, которая для разных исполнителей различна, т. к. зависит от опыта работы исполнителя, материальной базы, программного и технического обеспечения. Известно, что при анализе сложных проблем исследуемая характеристика может рассматриваться как случайная величина, отражением закона распределения которой служат экспертные оценки.

В рассматриваемом случае проблема – выбор исполнителей в процессе проектирования и монтажа компьютерной сети предприятия, а исследуемая характеристика – затраты на всех этапах проектирования и монтажа. Перед руководителем предприятия возникает задача по выбору исполнителя с наименьшим финансовым риском для осуществления процесса проектирования и монтажа компьютерной сети (КС).

Для решения задачи оптимального выбора исполнителя при многокритериальной оценке для проектирования и монтажа компьютерной сети предприятия предлагается использовать подход, основанный на использовании метода анализа иерархий (МАИ) [1].

Проектирование и монтаж компьютерной сети предприятия включает следующие этапы.

Этап 1. Проектное обследование, разработка и согласование технического задания.

Данный этап может включать следующие задачи:

- сбор сведений о планируемых нагрузках на компьютерную сеть;

- оценка требований руководителя предприятия (заказчика) к работе системы;

- составление планов развития;

- разработка технического задания, на основании которого будут разрабатываться эскизный и технический проекты компьютерной сети.

Этап 2. Разработка эскизного или предварительного проекта кабельной системы предприятия и создание технического предложения (технико-экономическое обоснование). Основная цель работы на стадии разработки эскизного проекта заключается в формировании предварительных проектных решений, дающих общее представление о структуре создаваемой кабельной системы и ее характеристиках, а также об оценке ее стоимости.

В соответствии с предварительным расположением рабочих мест производится оценочный расчет длины кабеля и кабельных каналов, коли-



чества портов, стоимости и объема работ (монтаж коробов, сверление стен, укладка кабеля и т. д.); производится оценка и выбор структуры компьютерной сети (локальной сети), активного сетевого оборудования, пассивного сетевого оборудования и материалов; разрабатывается технико-экономическое обоснование.

Эскизное проектирование позволяет оценить объем работ и материалов, необходимых для создания будущей системы (локальной компьютерной сети – ЛВС или структурированной кабельной системы – СКС).

В процессе выполнения эскизного проектирования решаются следующие основные задачи:

разрабатывается структурная схема компьютерной сети предприятия и конфигурация рабочего места;

определяется перечень оборудования, устанавливаемого в технических помещениях различного уровня;

производится выбор сред передачи сигнала в горизонтальной и магистральной подсистемах и методов прокладки кабелей;

формируются предложения по размещению технических помещений, а также требования к этим помещениям и кабельным трассам;

дается оценка стоимости кабельной системы и продолжительности работ по ее реализации.

В состав документации эскизного проекта могут включаться следующие документы:

пояснительная записка к эскизному проекту;
структурная схема комплекса технических средств;

оценка стоимости создания системы.

Этап 3. Разработка технического проекта компьютерной сети. Основная цель действий, выполняемых на стадии рабочего проекта, – полная разработка окончательных проектных решений по системе в целом и по ее отдельным составным частям.

В процессе выполнения технического проекта решаются следующие основные задачи:

1) производится точный расчет количества кабеля и кабель-каналов;

2) разрабатывается ведомость технического проекта;

3) оформляется пояснительная записка к техническому проекту, в которой отражаются основные принципы реализации компьютерной сети с

ее разбивкой на отдельные подсистемы, способы организации кабельных трасс, особенности оборудования технических помещений, приводится схема формирования маркировки и другие необходимые данные;

4) разрабатывается структурная схема комплекса технических средств. Данный документ на практике выполняется в форме поэтажных планов с детальной привязкой отдельных компонентов кабельной системы к архитектурным чертежам; в состав схемы часто вводятся также таблицы разводки кабелей по коммутационным панелям кроссового поля и соединений отдельных портов;

5) разрабатывается ведомость (спецификация) оборудования, материалов и принадлежностей;

6) производится локальный сметный расчет.

Этап 4. Создание рабочей документации. Заключается в подготовке точных рабочих чертежей, схем и таблиц, которыми будут руководствоваться монтажники при проведении работ по созданию системы. Рабочая документация обеспечивает детальную привязку отдельных компонентов системы к объекту, содержит чертежи, таблицы соединений и подключений, планы расположения оборудования и проводов и другие аналогичные текстовые и графические документы.

На данной стадии разрабатываются:

схемы размещения оборудования;
таблицы соединений и подключений;
сборочные чертежи.

Этап 5. Монтаж компьютерной сети и настройка оборудования.

Монтаж оборудования и прокладка компьютерных сетей начинается после составления и утверждения проектной документации. Все работы выполняются по предварительно составленному плану. При этом монтаж компьютерной сети должен отвечать следующим основным требованиям: открытость архитектуры; надежность в эксплуатации; высокая эффективность в работе.

При монтаже компьютерной сети предприятия решаются следующие задачи:

1) приобретение необходимого сетевого оборудования и программного обеспечения;

2) подготовительные работы, в процессе которых монтируются кабельные трассы, спуски, каналы;

3) непосредственная прокладка локальной вычислительной сети и маркировка кабелей;

4) установка различного вида оконечного

Таблица 1

**Распределение затрат по этапам проектирования (видам работ) КС
для разных исполнителей**

Наименование и номер этапа проектирования	Виды задач, решаемых на каждом этапе	Исполнители			
		1	2	...	n
1. Проектное обследование, разработка и согласование технического задания	1				
	2				
	⋮				
	m_1				
2. Разработка эскизного проекта	1				
	2				
	⋮				
	m_2				
3. Разработка технического проекта компьютерной сети	1				
	2				
	⋮				
	m_3				
4. Создание рабочей документации	1				
	2				
	⋮				
	m_4				
5. Монтаж компьютерной сети и настройка оборудования	1				
	2				
	⋮				
	m_5				

оборудования и последующее тестирование всей системы;

5) монтаж необходимого для функционирования сети оборудования (сервера, коммутаторы и т. д.);

6) установка программного обеспечения (сетевое, специализированного, офисного), обеспечивающего бесперебойную работу компьютерной сети предприятия;

7) обучение специалистов, которые будут обслуживать сеть, основным навыкам работы при необходимости.

Для повышения точности определения финансового риска для этапов проектирования КС предлагается применить подход, заключающийся в разбиении этапов проектирования КС по зада-

чам, решаемым на каждом этапе исполнителем.

Для каждого этапа проектирования может быть применен принцип декомпозиции на более мелкие виды работ (задачи) до уровня, обеспечивающего необходимую точность вычислений. Исполнители указывают свои финансовые затраты, необходимые для решения задач на данном этапе разработки.

Рассмотрим теперь, как применить данную методику для определения оценки реализуемости, т. е. финансового риска. Предположим, что нижним уровнем в рассматриваемой модели являются виды работ (задач).

Руководитель предприятия или его уполномоченный представитель заполняет табл. 1.

Пусть $j = \overline{1, m}$ – виды работ (задач), где m –

Таблица 2

Расчет затрат на проектирование КС различными исполнителями

Исполнители Виды работ	1	2	...	<i>i</i>	...	<i>n</i>
1	X_{11}	X_{21}	...	X_{i1}	...	X_{n1}
2	X_{12}	X_{22}	...	X_{i2}	...	X_{n2}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<i>j</i>	X_{1j}	X_{2j}	...	X_{ij}	...	X_{nj}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<i>m</i>	X_{1m}	X_{2m}	...	X_{im}	...	X_{nm}
Суммы	$\sum_{j=1}^m X_{1j}$	$\sum_{j=1}^m X_{2j}$	...	$\sum_{j=1}^m X_{ij}$	...	$\sum_{j=1}^m X_{nj}$

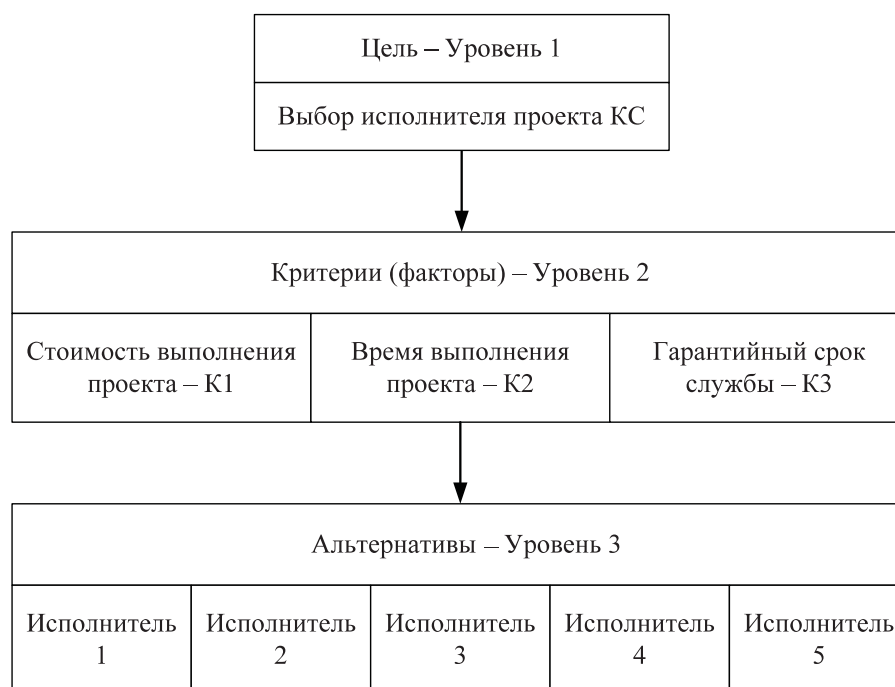
общее число задач по всем этапам проектирования, X_{ij} – затраты исполнителя по видам работ, указанные *i*-м исполнителем по *j*-й задаче.

Результаты вычислений финансовых затрат на выполнение отдельных видов работ и суммарных затрат на проектирование КС различными исполнителями могут быть представлены в табл. 2.

Очевидно, что описанную выше методику можно легко применить как для каждого блока, так и для всей системы в целом.

Рассмотрим технологию применения метода анализа иерархий к решению задачи выбора исполнителей проекта КС.

Данный подход заключается в определении



Иерархия для выбора исполнителя проекта КС

Таблица 3

Шкала относительной важности

Интенсивность относительной важности	Определение
1	Равная важность
3	Умеренное превосходство одного элемента над другим
5	Существенное или сильное превосходство
7	Значительное превосходство
9	Очень сильное превосходство
2, 4, 6, 8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями
Обратные величины приведенных выше чисел	Если при сравнении одного элемента с другим получено одно из указанных выше чисел (например, 5), то при сравнении второго элемента с первым получим обратную величину (1/5)

перечня критериев выбора и их приоритета, далее, на основе суждений экспертов указываются оценки по каждому из критериев. На следующем этапе определяют интегральные оценки по каждому исполнителю с учетом оценок по всем критериям. Полученные интегральные оценки сравнивают между собой и принимают оптимальное решение [2].

Этап 1. Построение иерархии начинается с вершины – цели анализа, в данном случае – это выбор исполнителя проекта КС (рис.). На втором уровне иерархии выбирают критерии, по которым будет производиться сравнение вариантов (в рассматриваемой задаче такими критериями являются стоимость выполнения проекта, время выполнения и гарантийный срок службы сети). Нижний уровень представляет собой перечисление альтернатив (в данном случае – исполнителей из пяти предложенных).

Этап 2. Построение множества матриц парных сравнений для каждого из нижних уровней: по одной матрице для каждого элемента, принадлежащего сверху уровня. Данный элемент яв-

ляется направляемым по отношению к элементу нижележащего уровня. Элементы каждого уровня сравнивают друг с другом относительно их воздействия на направляемый элемент. В результате парных сравнений получают матрицу суждений.

Для рассматриваемой задачи необходимо построить одну матрицу для второго уровня иерархии и три матрицы для третьего уровня.

Парные сравнения проводят в терминах доминирования одного элемента над другим. Для оценки относительной важности элементов используют следующие категории вопросов: какой из элементов важнее или имеет большее воздействие; какой из элементов более вероятен; какой из элементов предпочтительнее. Результаты сравнений определяют в целых числах в соответствии со шкалой относительной важности (табл. 3).

В каждой матрице сравнивают относительную важность левых элементов с элементами наверху. Если элемент слева доминирует над элементом наверху, то записывают целое положительное число (1–9), в противном случае – обратное число

Таблица 4

Матрица парных сравнений для уровня 2

Критерии	K1	K2	K3	Вектор критериев	Вектор приоритетов
Стоимость выполнения проекта, K1	1	5	0,333	1,186	0,279
Время выполнения проекта, K2	0,2	1	0,143	0,306	0,072
Гарантийный срок службы, K3	3	7	1	2,759	0,649



(дробь), согласно табл. 1. При сравнении элемента самого с собой записывают единицу.

Для получения матрицы парных сравнений требуется $n(n-1)/2$ суждений, где n – число сравниваемых элементов. Построим матрицы парных сравнений для второго и третьего уровней иерархии рассматриваемой задачи (табл. 4, 5).

Этап 3. Формирование векторов локальных приоритетов для каждого уровня. Для каждой матрицы парных сравнений вычисляют векторы локальных приоритетов, которые выражают относительное влияние множества элементов нижележащего уровня на элемент вышележащего уровня. Для этого необходимо определить компоненты вектора критериев по строкам матрицы парных сравнений. Компоненты вектора критериев получают в результате перемножения всех n элемен-

тов строки матрицы и извлечения из полученного произведения корня n -й степени. Чтобы получить вектор приоритетов необходимо нормализовать вектор критериев путем деления каждого элемента вектора столбца на сумму всех элементов столбца. Результаты вычислений векторов критериев и векторов приоритетов сведены в табл. 4 и 5.

Из табл. 4 видно, что гарантийный срок службы КЗ – наиболее важный критерий при выборе исполнителя проекта КС, вторым по важности критерием является стоимость выполнения проекта К1.

Из табл. 5 можно заключить, что по критерию К1 преимущество принадлежит исполнителю 1, по критерию К2 – преимущество у исполнителя 3, а по критерию КЗ лучшими являются исполнители 1 и 5.

Таблица 5

Матрицы парных сравнений для уровня 3 по критериям К1–К3

Критерий К1	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 4	Исп. 5	Вектор критериев	Вектор приоритетов
Исп. 1	1,00	7,00	2,00	4,00	6,00	3,201	0,451
Исп. 2	0,14	1,00	0,17	0,25	0,33	0,288	0,041
Исп. 3	0,50	6,00	1,00	3,00	5,00	2,141	0,302
Исп. 4	0,25	4,00	0,33	1,00	2,00	0,922	0,130
Исп. 5	0,17	3,00	0,20	0,50	1,00	0,549	0,077
Критерий К2	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 4	Исп. 5	Вектор критериев	Вектор приоритетов
Исп. 1	1	5	0,500	3	2	1,719	0,256
Исп. 2	0,20	1	0,143	0,333	0,2500	0,299	0,045
Исп. 3	2	7	1	6	3	3,022	0,451
Исп. 4	0,333	3	0,167	1	0,5	0,608	0,091
Исп. 5	0,5	4	0,333	2	1	1,059	0,158
Критерий К3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 4	Исп. 5	Вектор критериев	Вектор приоритетов
Исп. 1	1,00	3,00	3,00	2,00	1,00	1,783	0,313
Исп. 2	0,33	1,00	1,00	0,50	0,33	0,561	0,099
Исп. 3	0,33	1,00	1,00	0,50	0,33	0,561	0,099
Исп. 4	0,50	2,00	2,00	1,00	0,50	1,000	0,176
Исп. 5	1,00	3,00	3,00	2,00	1,00	1,783	0,313

Таблица 6

Расчет глобальных приоритетов

Исполнители	Значения векторов приоритетов			Обобщенные или глобальные приоритеты
	1 (0,279)	2 (0,072)	3 (0,649)	
Исп. 1	0,451	0,256	0,313	0,348
Исп. 2	0,041	0,045	0,099	0,079
Исп. 3	0,302	0,451	0,099	0,181
Исп. 4	0,130	0,091	0,176	0,157
Исп. 5	0,077	0,158	0,313	0,236

Этап 4. Проверка согласованности локальных приоритетов.

Согласованность локальных приоритетов проверяется на основе вычисления индекса согласованности (ИС) и отношения согласованности (ОС) на основе следующих формул:

$$ИС = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (1)$$

где n – число элементов; $\lambda_{\max}$ – сумма компонент вектора, полученного в результате умножения матрицы суждений на вектор приоритетов.

Для этого используют выражение:

$$A \cdot \overline{W}_p = \lambda_{\max} \cdot \overline{W}_p, \quad (2)$$

где A – матрица парных сравнений; $\overline{W}_p$ – нормализованный вектор критериев (вектор приоритетов).

Отношение согласованности ОС получаем в результате деления значения ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка. Величина ОС не должна превышать 10 %, чтобы быть приемлемой. Если ОС выходит за эти пределы, необходимо пересмотреть все суждения по каждому из критериев.

Параметры случайной согласованности для матриц различных порядков

Размер матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайная согласованность	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

В результате вычислений получены следующие значения показателей для второго уровня: $\lambda_{\max} = 3,06489$; ИС = 0,0324; ОС = 0,0559

Для третьего уровня определены следующие значения – для критерия К1: $\lambda_{\max} = 5,14$; ИС = 0,0351; ОС = 0,0313; для критерия К2: $\lambda_{\max} = 5,074$; ИС = 0,0186; ОС = 0,0166; для критерия К3: $\lambda_{\max} = 5,012$; ИС = 0,0032; ОС = 0,0028

Этап 5. Применение принципа синтеза для определения глобальных или интегральных приоритетов.

Приоритеты синтезируются, начиная со второго уровня. Вектор глобальных приоритетов может быть получен как сумма произведений элемента вектора локальных приоритетов для каждой строки на значение вектора приоритета соот-

ветствующего критерия на вышележащем уровне. Результаты расчетов приведены в табл. 6.

При выборе решения предпочтение отдается альтернативе с наибольшим значением глобального приоритета. Наилучший показатель глобального приоритета в рассматриваемой задаче выбора имеет исполнитель 1.

Таким образом, метод анализа иерархий можно применять при выборе исполнителей для проектирования и монтажа компьютерной сети при многих критериях выбора. Данная методика позволяет рассчитывать этапы работ на основании экспертных оценок.

Используя предложенную методику, возможно прогнозировать финансовые риски при проектировании и монтаже компьютерной сети, что позволит заранее разработать процедуру их



разрешения в различных проблемных ситуациях с учетом ограничений по финансовым затратам, времени выполнения проекта, гарантийному сро-

ку и другим критериям оценки. Поставленная многокритериальная задача решена с помощью метода анализа иерархий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий [Текст] / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993.

2. Полещук, О.М. Применение семантических пространств для экспертного оценивания характери-

стик качества программных средств и нечеткого многокритериального выбора [Текст] / О.М. Полещук // Вестник Московского гос. ун-та. леса. – Лесной вестник. – 2004. – № 1 (32). – С. 120–125.

УДК 004.891

А.В. Востров, М.А. Курочкин

ОБНАРУЖЕНИЕ КОНФЛИКТОВ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ НА ОНТОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Методы построения экспертных систем, интеграции экспертных систем, их модификация для задач автоматизации и управления технологическими процессами производства в последнее время рассматриваются повсеместно. Актуальность этого направления исследований обусловлена компьютеризацией технологических процессов, комплексной автоматизацией производства и внедрением интеллектуальных методов управления производством. Особое внимание уделяется экспертным системам, которые аккумулируют знания и опыт решения прикладных задач ведущих специалистов или отдельных коллективов.

Создание АСУП и АСУТП на основе экспертных систем, их интеграция в единую систему сбора и обработки данных и оперативное управление данными – важная научная задача.

Информационная среда интегрированных независимых экспертных систем должна обеспечить конечному пользователю целостное, непротиворечивое представление предметных областей для разработки новых высокотехнологичных проектных решений. Однако субъективное представление знаний ведущих специалистов, перенесенное в конкретную экспертную систему, является объективной предпосылкой к возникновению конфликтов при работе с интегрированной средой. Если определить конфликт как наличие (возникновение) неразрешимого противоречия, то становится очевидной вся важность проблемы обнару-

жения конфликтов как в отдельной экспертной системе, так и в интегрированной информационной среде. Следует отметить, что в последнее десятилетие сформировалось отдельное направление научных исследований, посвященных согласованию неоднородных экспертных систем. В рамках этого направления рассматриваются вопросы неоднородности онтологических моделей, неоднородности спецификаций на уровне понятийной семантики, преобразования неоднородных данных между контекстами и др. [1]. Другая задача инженерии онтологий – задача «отображения онтологий» (ontology mapping), решением которой является установление соответствия между несколькими онтологиями, т. е. нахождение семантических связей подобных элементов из разных онтологий.

К проблеме отображения онтологий близка проблема выравнивания онтологий (ontology alignment), заключающаяся в том, чтобы установить различные виды соответствия между двумя онтологиями, а затем сохранить исходные онтологии вместе с информацией о найденных соответствиях с целью дальнейшего использования информации о взаимосвязях онтологий [2].

Сегодня известно несколько методов обнаружения противоречий на онтологиях [3]: автоматическая локализация противоречий; устранение статической противоречивости; устранение динамической противоречивости онтологий. Они по-

зволяют выявить противоречия при построении, отображении и выравнивании онтологий.

Расширение этих подходов при интеграции неоднородных онтологий наталкивается на проблему несоизмеримости моделей и их компонентов (синтаксиса языков, семантики примитивов, имен понятий и отношений, декомпозиции предметной области на понятия и др.).

В отличие от этих вопросов, проблема обнаружения конфликтов заключается в поиске неразрешимых противоречий, которые могут проявляться явно или неявно (в определенном контексте или в конкретной ситуации).

Возникновение конфликта при работе пользователя с интегрированной информационной средой приводит к фактической остановке интерактивного взаимодействия, т. к. у пользователя возникает нарушение понимания предметной области или вариантов решения прикладной задачи. Если невыявленные конфликты будут заложены в техническое решение, то его эксплуатация может привести к катастрофическим последствиям.

Рассмотрим более детально понятие «конфликт», возможности представления знаний в форме онтологий и методы формального описания конфликтов.

Определение конфликта на знаниях

Изначально понятие «конфликт» введено в социологии. Под конфликтом социологи понимали особое взаимодействие индивидов, групп и объединений, которое возникает при их несовместимых взглядах, позициях и интересах.

Сопоставление конфликтов основывается на критериях вида «тип участника» и «вид структурных отношений» (Р. Дарендорф, Г. Зиммель, Л. Козер, М. Дойч и др.). Проведенные исследования позволили свести классификацию конфликтов по двум критериям: по типам участников – отдельные индивиды и групповые образования; по типам отношений – принадлежность участника к большей системе или его автономия на фоне общей социальной среды. Согласно типологии конфликтов Г. Зиммеля, конфликты можно разделить по характеру причин: объективные, субъективные (первые порождены объективными причинами, вторые – субъективными, личностными). Согласно типологии конфликтов Р. Дарендорфа, они подразделяются по источникам возникновения конфликта (конфликты интересов, ценностей, идентификации); по особенностям условий

происхождения конфликта (эндогенные, экзогенные); по отношению субъектов к конфликту.

В нашей задаче конфликтующие стороны представлены информационными системами, поэтому применение классических типологий, принятых в социологии, неконструктивно. В первую очередь, ввиду неформализованности категорий классификации и отсутствия одухотворенности конфликтующих сторон.

Для построения формальных моделей описания конфликтов на онтологиях воспользуемся классификацией М. Дойча, наиболее полно отражающей суть неразрешимых противоречий между абстрактными сущностями [4].

1. Подлинный (истинный) конфликт – существующий объективно и воспринимаемый адекватно.

2. Случайный (условный) – зависящий от легко изменяемых обстоятельств, что, однако, не осознается сторонами.

3. Смещенный (подмененный) – явный конфликт, за которым скрывается другой, невидимый конфликт, лежащий в основании явного.

4. Безатрибутивный (неверно приписанный) – конфликт между сторонами, ошибочно понявшими друг друга, и, как результат, по поводу ошибочно истолкованных проблем.

5. Латентный – конфликт, который должен был бы произойти, но которого нет, поскольку по тем или иным причинам он не осознается сторонами.

6. Ложный (фальшивый) – конфликт, существующий только в силу ошибок восприятия и понимания при отсутствии объективных оснований.

Предложенная классификация определяет суть шести типов противоречий и может быть сопоставлена с представлением знаний в форме онтологии. Классификация Дойча позволяет характеризовать конфликты как внутри одной онтологии, так и при интеграции нескольких онтологий. Разработку и реализацию методов обнаружения конфликтов по Дойчу легко проиллюстрировать на представлении онтологий в виде графов.

В этом случае обнаружение конфликтов можно осуществлять на трех уровнях:

нулевой уровень – поиск конфликта внутри одной онтологии;

первый уровень – поиск конфликта при интеграции двух онтологий;

второй уровень – поиск конфликта при построении решения прикладной задачи.



На нулевом уровне происходит обнаружение конфликтов, причиной которых являются методические ошибки инженеров по знаниям. К ним относятся некорректность извлечения знаний при работе с экспертом, ошибки формализации знаний, неверное понимание сущностей и отношений предметной области и др.

На первом уровне обнаруживаются конфликты, определяемые субъективной оценкой предметной области авторами онтологии. В первую очередь, это мировоззренческие аспекты, определяемые научными школами, накопленным опытом решения сложных задач, индивидуальными приемами и методами работы эксперта.

На втором уровне обнаруживаются конфликты между фрагментами интегрированных онтологий, на которых базируется решение прикладной задачи. Как правило, это неправильное использование локальных решений в прикладной задаче. Оно связано с технологической несовместимостью отдельных решений в сложном комплексе, изменением условий и параметров среды, возникновением новых ограничений и др.

Особенности описания знаний в форме онтологий

Рассмотрим формальное определение онтологии [5]. Онтологией будем называть кортеж вида $O = (C, R, K, P_C)$, где C – набор вершин или понятий, R – набор отношений $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, K – множество свойств понятий, P_C – множество антисимметричных, транзитивных, антирефлексивных бинарных отношений (отношений частичного порядка) на множестве понятий C , которые определяют связи между понятиями C и отношениями R . Каждое понятие определяет концепт из области знаний и определяется в виде набора свойств $C = \{c_1, c_2, \dots, c_l\}$.

При построении онтологии необходимо сформировать реализацию каждого элемента кортежа O и установить связи между его элементами. Состав каждого из четырех множеств регламентируется только экспертом. Поэтому число вариантов построения онтологий N соответствует декартову произведению этих множеств $N = C \times R \times K \times P_C$.

Кроме этого, многообразие вариантов возрастает за счет того, что одни и те же понятия (сущности) в двух онтологиях могут иметь разные имена. В свою очередь, одно и то же имя в двух онтологиях может иметь разную интерпретацию.

Многообразие вариантов реализации онтологий и определяет область поиска конфликтов.

Если рассматривать конфликт как ситуацию, в которой обнаружено неразрешимое противоречие, то поиск конфликтов сводится к поиску противоречий на онтологических контекстах. Остановимся на структурно-семантическом подходе, который подразумевает описание понятий набором метаданных. Для анализа контекстов воспользуемся структурой онтологии в виде графа.

Под метаданными будем понимать структурированные данные, представляющие собой характеристики описываемых сущностей для целей их идентификации, поиска, оценки, управления [6]. Таким образом, метаданные представляют собой данные, описывающие связь объектов с другими объектами системы и само содержимое объектов.

Выделим два свойства отношений, характерных для метаданных, определяющих связи между объектами [1]:

идентификация – является ли утверждение об объекте идентифицирующим его свойством;

зависимость – может ли объект существовать без других объектов.

Опираясь на эти свойства, будем считать, что обнаружение конфликтов между отношениями на графе будет определять конфликт на онтологии.

В качестве содержимого метаданных будем использовать элементы онтологии, т. е. объекты знаний можно описать с помощью набора $M(M_K, M_C)$, где $M_K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ представляет собой связь объекта с другими объектами системы (k_i – значение свойств понятия, соответствующего объекту знаний, которые являются либо константами, либо ссылками на другие экземпляры метаданных), а M_C описывает содержимое объектов. Для иллюстрации варианта поиска противоречия на графе остановимся подробнее на содержимом объектов, т. к. анализ связей объекта (M_k) можно отнести к известному классу задач исследования путей на графах (поиск путей в лабиринте, нахождение кратчайших путей во взвешенных графах и др.).

Множество $M_C = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ представляет собой набор утверждений вида $s_i = \langle i, r, o, p \rangle$, где i – субъект утверждения, o – объект утверждения, r – отношение между субъектом и объектом, p – весовой коэффициент, характеризующий степень существования данного утверждения (при $p = 1$ утверждение считается истинным, при $p = 0$ – незадачным).

Для дескриптивной логики любого класса противоречивость есть существование объекта эквивалентного пустому множеству. Для класса логик, в которых определено понятие отрицания предиката, можно утверждать, что существует $\langle i, \bar{r}, o, p \rangle$ для всех i и o или, другими словами, предикат-отрицание.

Тогда противоречивость (четкая) Str_s – есть свойство онтологии, характеризующее онтологию, в которую одновременно входят по крайней мере два утверждения, $\langle i, r, o \rangle$ и $\langle i, \bar{r}, o \rangle$ (степень достоверности здесь не важна) [7].

Противоречивость нечеткая Str_{sf} – есть свойство онтологии, характеризующее онтологию, в которую одновременно входят по крайней мере два утверждения $\langle i, r, o, p \rangle$ и $\langle i, \bar{r}, o, p \rangle$, где p – настраиваемый порог достоверности [7].

Отметим, что для четкого пространства состояний онтологии порог достоверности равен единице, и он является частным случаем нечеткого пространства состояний. Поэтому, в случае возникновения противоречия, проще всего выявить конфликты, основанные на этих правилах противоречивости.

В рамках предложенного подхода становится возможным дать формальное описание конфликта. В этом случае конфликт K есть набор противоречий $\langle t_1, t_2, \dots, t_p \rangle$, где $t_i = (M_K, \alpha_m)$ представляет собой упорядоченную пару (M_K – множество утверждений s_i , которые привели к конфликту, α_m – тип противоречия в соответствии с шестью пунктами классификации Дойча). Конфликт K будет обнаружен на онтологии O , если хотя бы одно из t_i будет получено. Анализ набора противоречий $\langle t_1, t_2, \dots, t_p \rangle$ позволяет задать меру глубины конфликта K (какие противоречия присутствуют в данном наборе и в каком количестве, какие s_i «задействованы»).

Пример онтологии, построенный на графовой модели

Для иллюстрации метода поиска противоречий построим модель онтологии предметной области «алгебраические структуры дискретной математики» в форме графа $O = (M, R)$, где M – набор вершин, а R – набор ребер. Ограничимся представлением знаний в виде иерархии (дерева), что не умаляет общности решения поставленной задачи.

На этом примере хорошо представляются формальные понятия дискретной математики (кольцо целых чисел, поле вещественных чисел

и др.), а также связи между ними. Каждое понятие представлено вершиной из M , а направленное ребро описывает бинарные отношения между понятиями. Корневая вершина «алгебраическая структура» не имеет входящих дуг. Понятиями следующего уровня будут объекты «основа» и «сигнатура». Понятие «основа» имеет одно дочернее понятие «множество U ». Понятие «сигнатура» содержит в себе три операции: «операция ϕ »; «операция ψ »; «операция ξ ». Множество U включает в себя три подмножества, заданные объектами: «множество A »; «множество B »; «множество C ». Множество A имеет n элементов $a_1, a_2, \dots, a_n$, заданные соответствующими понятиями, множество B содержит m элементов $b_1, b_2, \dots, b_m$, а множество C не содержит элементов. Операция ϕ обладает двумя свойствами, отраженными в понятиях «свойство операции ϕ_1 » и «свойство операции ϕ_2 », операция ψ имеет одно свойство ψ_1 , а операция ξ – три свойства: ξ_1, ξ_2, ξ_3 .

На рис. 1 приведен вариант построенной онтологии.

Предложенная модель достаточно проста для описания базовых понятий и позволяет проиллюстрировать введенное выше определение конфликта на знаниях. Например, рассматривая алгебраическую структуру «кольцо целых чисел» вида $\langle \mathbb{Z}; +, * \rangle$, можно увидеть, что она укладывается в предложенную модель. Основой данной алгебры будет являться множество целых чисел $\mathbb{Z}$, а сигнатура будет содержать две операции «+» и «*». Множество $\mathbb{Z}$ может иметь подмножеством, например, множество натуральных чисел $\mathbb{N}$, где содержатся элементы 1, 2, 3, ...; или множество P , содержащее четные целые элементы от 1 до 9: {2, 4, 6, 8}... Операция «+» имеет четыре свойства: ассоциативность, коммутативность, наличие нуля (нейтрального элемента по сложению) и обратного элемента по сложению. Операция «*» обладает тремя свойствами: ассоциативность, коммутативность и наличие единицы по умножению. Эта алгебраическая структура также обладает свойством дистрибутивности, общим для этих двух операций.

Воспользуемся представленной моделью для определения конфликта внутри одной онтологии.

Методы определения конфликта на онтологии

Подлинный конфликт (тип 1) определяется уже введенным понятием четкой или нечеткой

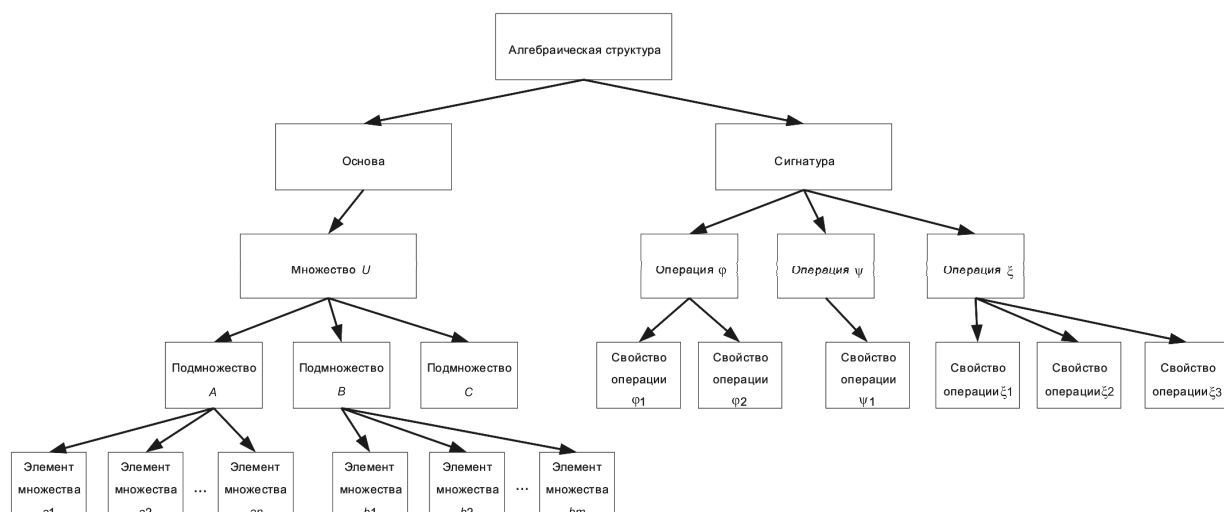


Рис. 1. Вариант онтологии предметной области «алгебраические структуры дискретной математики»

противоречивости. На рис. 2 представлен пример одновременного наличия реальной связи (сплошная линия) и несуществующей связи (штрихпунктирная линия) у субъекта «операция ξ » (порог достоверности в этом случае равен единице и не указан). Необходимо отметить, что порог достоверности у этих связей обязательно совпадает.

Для условного конфликта (тип 2) необходимо учитывать порог достоверности, что приведет к одновременному вхождению в онтологию утверждений вида $\langle i, r, o, p_1 \rangle$, $\langle i, r, o, p_2 \rangle$, где $p_1 \neq p_2$. На рисунке можно заметить, что у субъекта «операция φ » существуют совпадающие связи (т. е. одна и та же связь – для наглядности обозначены сплошной и пунктирной линией) с

одним и тем же объектом нижнего иерархического уровня. Пороги достоверности у совпадающих связей обязательно различны.

Смещенный конфликт (тип 3) определим следующим образом: есть утверждение $\langle i_1, r_1, o_1, p_1 \rangle$ и утверждение $\langle i_2, r_2, o_2, p_2 \rangle$, причем o_1 совпадает с i_2 , т. е. утверждение с индексом 1 является предшественником утверждения (или понятием более высокого уровня абстракции) с индексом 2. Тогда, если существует конфликт типа 1, типа 2, типа 4 или типа 5 для первого утверждения, он будет являться смещенным для второго утверждения. Из рис. 2 видно, что у трех субъектов существуют различные конфликты: субъект «операция φ » имеет конфликт типа 2, субъект «операция ψ »

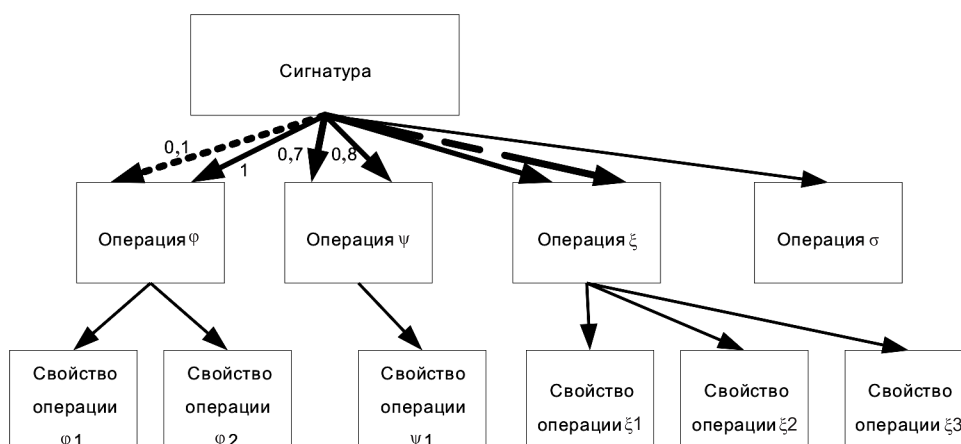


Рис. 2. Пример смещенного конфликта (тип 3) на основе подлинного (тип 1), условного (тип 2) и латентного (тип 5) конфликтов
($\leftarrow \text{---} \text{---} \text{---}$) несуществующая связь; ($\leftarrow \text{---} \text{---} \text{---}$) совпадающая связь

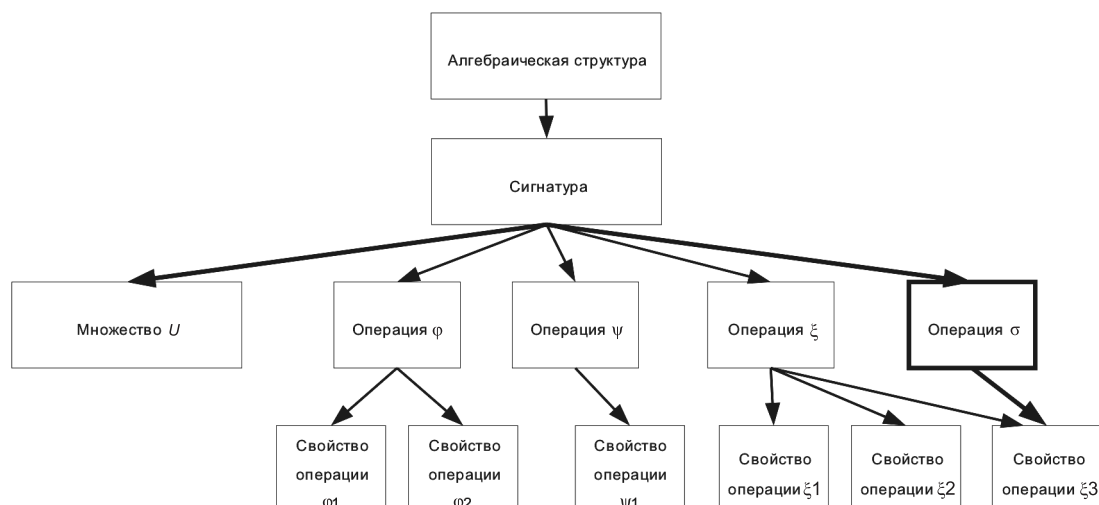


Рис. 3. Пример безатрибутивного конфликта (тип 4)

имеет конфликт типа 5 (см. ниже), субъект «операция ξ » имеет конфликт типа 1. Тогда для объекта «свойство операции $\phi 1$ » (как и для объекта «свойство операции $\phi 2$ ») смещенным конфликтом будет являться условный конфликт субъекта «операция ϕ », т. к. объект «свойство операции $\phi 1$ » является потомком данного объекта. Аналогично определяются смещенные конфликты для объектов, являющихся потомками субъектов «операция ψ » и «операция ξ ».

Безатрибутивный конфликт (тип 4) рассмотрим как конфликт внутри утверждения вида $\langle i, r, o, p \rangle$, где указан либо несуществующий субъект, либо несуществующий объект, либо субъект и объект не могут иметь связь по определению (например, в соответствии с аксиомами $P_{\mathcal{O}}$). На рис. 3 можно увидеть следующие особенности:

указан несуществующий объект «операция σ » для субъекта «сигнатура»;

указан несуществующий субъект «операция σ » для объекта «свойство операции $\xi 3$ »;

субъект «сигнатура» и объект «множество U » не могут иметь связь по определению данной онтологической модели (см. рис. 1).

Данные варианты конфликтов относятся к безатрибутивным.

Под латентный конфликт (тип 5) будем понимать конфликт на основе утверждений $\langle i, r_1, o, p_1 \rangle$ и $\langle i, r_2, o, p_2 \rangle$ в случае, когда субъект и объект совпадают, но присутствует два вида связи с разным порогом достоверности. На рис. 2 этот случай обозначен двумя существующими

и несовпадающими связями между объектом и субъектом с разным порогом достоверности (субъектом является «сигнатура», а объектом – «операция ψ »).

К ложному конфликту (тип 6) отнесем случаи отсутствия уникальности среди понятий (субъектов или объектов) или связей.

На рис. 4 показано следующее:

субъект «сигнатура» имеет два одинаковых объекта «операция ϕ » (один из них обведен пунктирной линией);

каждый двойной субъект «операция ϕ » имеет два одинаковых объекта «свойство операции $\phi 1$ »;

субъект «операция ξ » имеет две одинаковые связи с одинаковым порогом значимости для объекта «свойство операции $\xi 1$ ».

Таким образом, приведенные примеры раскрывают особенности представления противоречий для шести типов конфликта и демонстрируют полноту описания противоречий для хорошо формализованной предметной области.

Конфликты при интеграции онтологических моделей

Для поиска конфликтов при интеграции нескольких онтологий необходимо рассматривать два случая:

- 1) интегрирование однородных онтологий;
- 2) интегрирование неоднородных онтологий.

В первом случае поиск конфликта осуществляется в два этапа:

построение выровненной модели с помощью методов *ontology alignment*;

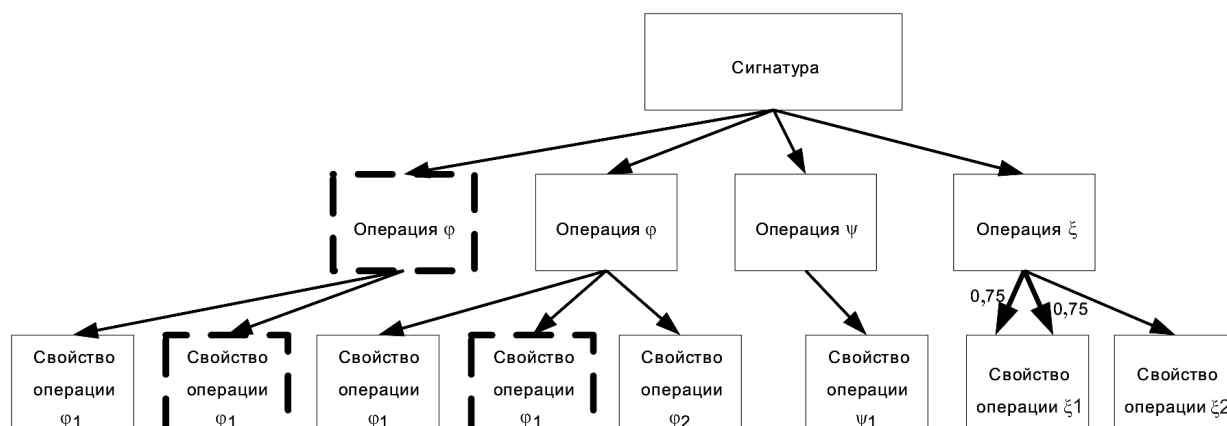


Рис. 4. Пример ложного конфликта (тип 6)

обнаружение противоречий на выровненной модели (т. е. задача сводится к поиску конфликтов внутри одной онтологии).

Такое описание конфликтов является полным, т. к. соответствует примерам, рассмотренным выше.

Во втором случае поставленная задача не может быть решена. Можно рассматривать только некоторое приближение к ее решению, исследуя противоречия на каждом слое онтологической модели.

Введем следующие критерии поиска конфликта [1].

На слое моделей:

синтаксиса языков, определяющих онтологические модели;

семантикой примитивов, используемых в моделях.

На онтологическом слое:

имен понятий и отношений;

подхода к определению понятий;

разбиения предметной области на понятия;

покрытия предметной области.

Определение каждого из критериев задается семантикой. Реализация этого метода предусматривает следующие шаги:

установление связей между понятиями на основе функций корреляции;

установление ассоциаций между понятиями на основе композиции ассоциаций между понятиями (понятия связываются, если существует «путь» из одного понятия в другое);

установление ассоциации между элементами

схем (элементы, субъекты или объекты онтологически релевантны, если между соответствующими им понятиями установлена ассоциация обобщения).

При этом под связью понимается любое прямое соединение между элементами онтологической модели, а под путем понимается соединение двух элементов посредством композиции связей.

В каждом слое можно осуществить поиск любого из шести типов противоречий, а сопоставление результатов поиска по всем слоям даст качественную оценку конфликта при интеграции неоднородных онтологий.

В статье рассмотрена проблема поиска противоречий на одной или нескольких онтологиях и предложен подход к формализации такого понятия, как конфликт, предложена классификация конфликтов и рассмотрены варианты их обнаружения на хорошо формализуемой предметной области. Показано, что при интеграции нескольких однородных онтологий обнаружение конфликта разбивается на два этапа и сводится к поиску конфликта на одной онтологии. При интеграции неоднородных онтологий задача не может быть решена в полном объеме, но приближенное решение можно построить, анализируя противоречия на каждом слое онтологической модели.

При продолжении исследований необходимо рассмотреть варианты выбора меры конфликта, глубины конфликта и усовершенствовать методы обнаружения конфликтов для каждого из шести типов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скворцов, Н.А.** Вопросы согласования неоднородных онтологических моделей и онтологических контекстов [Текст] / Н.А. Скворцов // Симп. Онтологическое моделирование. – М.: ИПИ РАН, 2008.
2. **Сухарь, Р.С.** Методы отображения онтологий. Обзор [Текст] / Р.С. Сухарь, А.П. Карпенко // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2009. – № 1. – С. 4
3. **Haase, P.** A Framework for Handling Inconsistency in Changing Ontologies [Текст] / P. Haase, Frank van Harmelen [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. – Germany. – Springer-Verlag, 2005. – P. 353–367
4. **Deutsch, N.** The constructive and destructive processes [Текст] / N. Deutsch // New Haven – London, 1973. – P. 13–17.
5. **Тузовский, А.Ф.** Разработка систем управления знаниями на основе единой онтологической базы знаний [Текст] / А.Ф. Тузовский // Изв. Томского политехнического ун-та, 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 182–185.
6. Task Force on Metadata. Summary Report [Электронный ресурс] // American Library Association. – 1999. – June. – Режим доступа: www.libraries.psu.edu/tas/jca/ccda/tf-meta3.html
7. **Павлов, Д.А.** О разрешении проблем противоречивости развивающихся онтологий [Текст] / Д.А. Павлов // Обробка інформації в складних технічних системах. – 2007. – № 3. – С. 65–72.

УДК 004.658.6

И.В. Бутенко

ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ОТЧЕТОВ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МЕТАДАННЫХ

Решение проблемы «информационного взрыва» в современных системах автоматизации производственных процессов требует создания эффективных методов извлечения необходимых данных и программных средств их поддержки.

Развитие информационных систем на этапе операционного учета (OLTP системы) можно определить как накопление данных о состоянии процессов. При этом жизненный цикл подобных систем измеряется уже десятилетиями. В том случае, когда происходит замена соответствующего ПО, необходимые данные обычно конвертируются в новые форматы. Особенность построения информационных систем на настоящий момент заключается в том, что объемы данных не позволяют двигаться по этому пути. Должна обеспечиваться преемственность на основе стандартизации описания данных и, тем самым, возможность обеспечения доступа без указанных преобразований. В связи с этим при создании новых информационных систем разработчики используют аппарат, базирующийся на метаданных (МД). Он предоставляет возможности описания и манипулирования метаданными в рамках либо общей модели CWM (Common Warehouse Metamodel), сформированной группой OMG (Object Management

Group) [7], либо модели конкретной метасистемы (МС).

Таким образом, современные архитектурные решения обеспечивают решение проблемы «информационного взрыва». Однако большое количество информационных систем, которые не были разработаны на базе последовательного системного использования МД, требуют аппарата поддержки и агрегирования в современные информационные пространства предприятий.

Особую потребность в МД испытывают быстро меняющиеся информационные системы. Например, банковские системы, системы бухгалтерского учета, аналитические системы.

Выходом из создавшегося положения является построение МС на основе уже существующих информационных систем. Она должна формировать общее информационное пространство и обеспечивать дальнейшее развитие системы. Это, в свою очередь, требует разработки сопутствующих методов, алгоритмов и программного обеспечения. В [3] предложено решение этих вопросов.

Модели описаний объектов для МС имеют следующий вид.

Модель представления объектов. В рамках информационных систем разработчики оперируют следующим набором сущностей БД, которые и являются объектами МС: таблицы, хранимые процедуры (ХП), колонки таблиц, параметры процедур, типы данных и их описания

$$O = \langle n, t, \{O\}, P, C \rangle,$$

где n – имя объекта (в терминах БД); t – тип объекта (таблица, ХП, колонка, параметр ХП); P – параметры объекта, необходимые (и, может быть, достаточные) для построения объекта O на базе; C – описания объекта.

Модель описания классификаторов
 $\Omega = \{\omega\} \rightarrow O_\omega \subseteq O$. Здесь ω – ограничения, определяемые на множестве всех объектов O и позволяющие однозначно идентифицировать подмножество O_ω .

В процессе преобразований может быть получено следующее описание: $\Omega = \{\omega_p, \omega_r, \omega_c\}$.

Модель загрузки данных в метасистему
 $S_i \rightarrow O_i^j, i \in \{1, n\}, j \geq 1$, где n – количество рассматриваемых объектов в Системе, j – номер описания объекта S .

Для того, чтобы каждый раз не загружать все множество объектов системы в МС, необходимо обрабатывать только те данные, которые изменились с даты последней загрузки. Поэтому, для загрузки данных в МС рассматривается подмножество $S_{load} \subseteq S$, где S_{load} – объекты, измененные после последней загрузки в МС. Такое ограничение вводится, поскольку в рамках задачи рассматриваются объекты БД. Очевидно, что при первоначальной загрузке $S_{load} = S$.

Загрузка метаданных. Для обеспечения универсальности механизма загрузки разработан специализированный формат, который был промежуточным звеном между МС и исходными данными (рис. 1).

При таком подходе можно разделить логику выгрузки данных из внешних источников и логику загрузки данных в МС. Требуется напи-

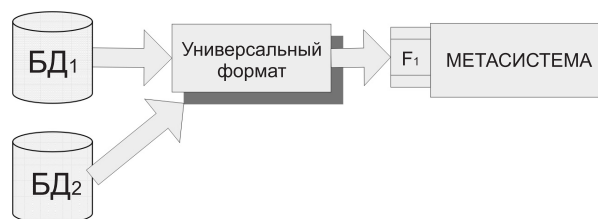


Рис. 1. Загрузка метаданных

сать только один загрузчик данных в МС F1 и, поскольку он будет получать данные в универсальном формате, его можно использовать при загрузке данных из любой системы. Заметим, что различия в СУБД, на которой построена система-источник, отсутствуют.

Организационные мероприятия. Отметим основные моменты, которые могут упростить построение и дальнейшее использование МС. Их можно назвать *организационными мероприятиями*, поскольку эти требования должны быть приняты в рамках всей организации, использующей МС.

При подготовке исходной информации для загрузки необходимо максимально полно описать значения C по выбранным типам описаний K . Алгоритм работы с МС в рамках такого подхода следующий:

- описание значений C для всех объектов системы;

- загрузка данных в МС;

- первичная классификация данных;

- доопределение объектов, если это необходимо в самой МС.

Рекомендуется максимально полно использовать механизм пользовательских типов, встроенный в стандартные поставки большинства промышленных СУБД. Для этого в исходной системе нужно выделить основные, часто используемые домены, и для каждого из них завести свой пользовательский тип. Выделение доменов может производиться в рамках самой МС. То есть после первоначальной загрузки данных начинается выделение и классификация основных типов, которые в дальнейшем переносятся в сами объекты БД.

Методика построения метасистемы

На основе всего сказанного выше детализируем методику построения метасистемы в виде последовательности отдельных этапов.

1. Выбор средств реализации МС. Для реализации МС необходимо выбрать следующие программные средства: СУБД, средства загрузки данных, средства реализации клиентского приложения. При выборе СУБД стоит, в первую очередь, отталкиваться от того, с какой СУБД проще и дешевле работать конкретным разработчикам МС. Связано это с тем, что все модели и алгоритмы могут быть реализованы на любой СУБД. Таким образом, никаких функциональных ограничений при реализации МС нет.

2. Реализация структуры БД МС. В качестве структуры БД можно воспользоваться результатом [3]. Практический опыт показывает, что эта структура достаточна для реализации МС в различных предметных областях и для различных конечных целей (построение аналитических отчетов, использование в качестве справочника по системе). При этом в предложенных моделях, на основе которых построена структура БД, допускается расширение базового набора параметров объектов. Таким образом, и структура БД будет несколько видоизменена. На практике расширение свойств объектов в рамках предложенных моделей влечет за собой увеличение количества параметров у объекта МС. А это, в свою очередь, реализуется добавлением необходимого количества столбцов в таблицу описания.

Поскольку операция расширения описания объекта МС – явление крайне редкое (за время реализации МС автором от начальной предложенной структуры до конечной, реализованной в нескольких коммерческих заказах, описание объекта увеличилось на два параметра), то можно пренебречь накладными расходами на перестроение структуры данных.

3. Загрузка метаданных. В качестве средства загрузки метаданных рекомендуется использовать алгоритм, описанный в [3]. Этот алгоритм может быть недостаточен лишь в ситуации, когда требуется загрузка данных в МС из источников вида: структурированные документы, изображения, специальные программы и т. п. В таком случае будет требоваться реализация своего собственного загрузчика. При этом новый загрузчик должен обладать следующими свойствами:

для уменьшения объемов загрузки данных будут обновляться данные только по объектам, измененным после последней загрузки;

для уменьшения числа затрагиваемых при загрузке параметров будут обновляться только реально обновленные данные.

Сам по себе загрузчик состоит из двух частей: модуля чтения метаданных из внешнего источника и модуля загрузки данных в МС. При этом, в качестве второго модуля *всегда* может быть выбран реализованный в работе загрузчик. Модуль чтения метаданных полностью привязан к источнику данных: его формату, способу хранения данных и т. д. Таким образом, только эта часть реализации загрузчика «ложится на плечи» разработчика МС.

4. Построение дерева классификатора. При построении дерева классификаторов на этапе первоначальной загрузки рекомендуется выделить в описании P такие свойства, по которым можно было бы разграничить объекты по области применения, области действия, типу объекта.

При первоначальном наполнении системы данными, когда еще мало описательной информации, строить классификаторы по C не всегда корректно из-за того, что многие объекты выпадут из рассмотрения. В то же время, классификация объектов по свойствам P гарантирует участие в выборке всех объектов.

5. Организационные мероприятия. Для полноценного использования метасистемы и для минимизации затрат на ее поддержку рекомендуется использовать алгоритмы, состоящие из следующих шагов.

Подготовка исходной информации для загрузки. В рамках данной методики предлагается два варианта подготовки информации для загрузки.

Первый заключается в необходимости максимально полно описать значения C для выбранных типов описаний K . Алгоритм работы с МС для такого подхода следующий:

описание значений C для всех объектов системы;

загрузка данных в МС;

первичная классификация данных;

доописание объектов, если это необходимо в самой МС.

Второй вариант отличается от первого тем, что значения C предварительно не будут заполняться в самих объектах. Загрузка данных МС и первичная классификация будут осуществляться только по значениям вектора P , который всегда заполнен. После загрузки данных необходимо будет вручную максимально полно описать значения C для как можно большего количества типов описаний K . Только после этого можно будет проводить классификацию объектов по их описаниям. Таким образом, такой подход требует следующей последовательности шагов:

загрузка данных в МС;

классификация данных только по значениям вектора P ;

полное описание объектов системы в МС;

классификация объектов МС по сформированным описаниям;

выгрузка заполненных обновленных данных для того, чтобы в дальнейшем не перезаписать и



не потерять только что введенную информацию.

В данном случае выбор подхода ложится на пользователя. Как показал опыт, на деле получается комбинация двух вариантов, поскольку обычно в текстах скриптов встречаются комментарии, которые в нашем случае и являются исходным описанием объекта. Они автоматически загружаются в МС. А те данные, которых не хватает, и те, по которым не было соответствующего комментария, дополнительно вводятся вручную.

Введение пользовательских типов. Рекомендуются максимально полно использовать механизм пользовательских типов, встроенный в стандартные поставки большинства промышленных СУБД. Для этого в исходной системе нужно выделить основные часто используемые домены и для каждого такого домена завести свой пользовательский тип. Выделение доменов может производиться в рамках самой МС. То есть после первоначальной загрузки данных начинается выделение и классификация основных типов, которые в дальнейшем переносятся в сами объекты БД.

Оценка эффективности методики на реальных задачах

В качестве примера применения МС рассмотрим задачу построения OLAP-кубов на основе существующих данных в оперативной БД. Стандартным вариантом решения такой задачи может быть построение необходимого куба данных специалистом, хорошо разбирающимся в структуре БД ИС. На практике таким человеком обычно выступает разработчик этой системы. Если система была куплена в виде коробочного готового решения, то пользователи системы становятся заложниками ситуации: построить нужный им отчет может только фирма-разработчик.

Задачей данной работы было создание такой системы, которая позволит именно специалисту в предметной области, а не в области баз данных, выполнять те или иные настроечные работы.

Покажем, как именно с помощью предлагаемой метасистемы могут быть решены задачи подобного вида.

Рассмотрим задачу анализа работы уборочной техники. В оперативную БД MS SQL Server 2005 каждую минуту поступают данные от каждой единицы уборочной техники (УТ) с информацией о ее параметрах: местоположение, скорость, состояние датчиков (по ним определяется, какие именно работы выполняются), дата

посылки и т. д. Всего в посылке содержится 19 параметров. Все эти данные заносятся в оперативную БД. По требованию заказчика в данной системе предполагалась работа 2 500 единиц УТ одновременно. При этом, независимо от того, стоит УТ в гараже или убирает улицы, частота отправки сообщений одинакова – один раз в минуту.

Таким образом, получаем, что в данной системе каждый день появляется $2\,500 \times 60 \times 24 = 3\,600\,000$ записей. Через месяц данных станет больше 100 млн.

Кроме задач сохранения оперативных данных, система должна обеспечивать возможность пользователю получать отчеты в различных срезах за различные периоды, иначе смысл системы теряется сам по себе. Отметим, что БД работает с большим количеством данных, исчисляемых сотнями миллионов только в одной таблице. Реляционная БД может с таким объемом просто не справиться.

Типичным средством решения задачи анализа данных в больших БД является построение OLAP-кубов [6]. Поскольку исходные объекты системы лежат в MS SQL Server 2005, то в качестве средства построения OLAP выбран продукт, также входящий в MS SQL Server – Analyzes Services (рис. 2).

Рассмотрим более подробно задачу построения OLAP-куба:

- 1) формализация требований технологом в терминах предметной области;
- 2) постановка задачи разработчику в терминах объектов БД;
- 3) настройка разработчиком объектов для расчета куба в Analyzes Services в терминах объектов БД;
- 4) расчет OLAP-куба в среде Analyzes Services;
- 5) работа технолога с OLAP-кубом.

Отметим, что нами рассмотрен случай, когда в качестве «конечного заказчика» выступает технолог. На практике заказчиком может быть руководитель, бухгалтер, сторонняя организация и т. д. В любом случае, задача построения отчета дополнится постановкой задачи технологу, которая может состоять из многих шагов, в зависимости от принятой технологии работы в организации. При этом работа непосредственно по настройке куба сведется к описанным шагам.

Обратим внимание, что пункты можно разбить следующим образом:

постановка – 1, 2;

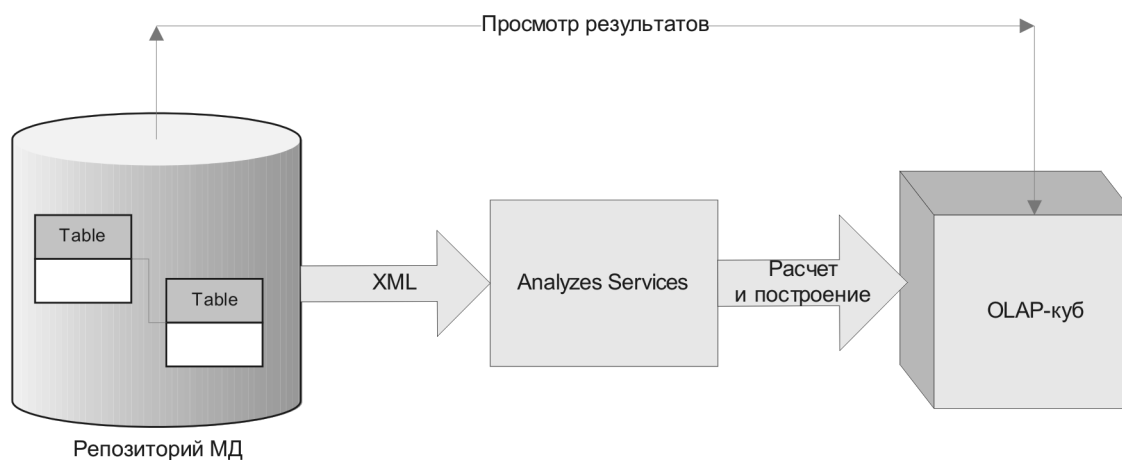


Рис. 2. Формирование OLAP-куба через метасистему

настройка и расчет – 3, 4;
использование – 5.

Постановка в данном случае выполняется два раза: сначала – на языке пользователя, затем – на языке объектов БД. Теперь попробуем решить ту же задачу в рамках системы, которая использует в своем составе МС.

В МС содержатся описания всех объектов исходной БД. Таким образом, представляется логичным именно в рамках МС настраивать объекты, участвующие в расчете куба: таблицы фактов и измерений. Поскольку в МС данные ведутся в терминах предметной области, то это действие должен выполнять технолог.

Следующий этап – обеспечение окончательной настройки по выделенным в МС объектам и расчет куба в самом Analyzes Services. Такие средства предоставляет сам Analyzes Services, поскольку он обеспечивает настройку кубов по сформированным в других средах проектам в виде XML. При этом, в данный XML можно передать кроме ссылок на сами объекты БД еще и мета-описания этих объектов [1, 2, 4]. Таким образом, даже в среде разработки Analyzes Services окончательную настройку может выполнять технолог в терминах предметной области.

Теперь опишем план, при условии, что в рамках данной системы построена МС, содержащая описания объектов БД.

1. Формализация требований технологом в терминах предметной области.

2. Настройка технологом объектов для расчета куба в Analyzes Services в терминах объектов БД.

3. Расчет OLAP-куба в среде Analyzes Services.

4. Работа технолога с OLAP-кубом.

Как видим, пункт общения с разработчиком пропал, теперь задача полностью решается технологом за счет повышения уровня языка с объектов БД на термины предметной области.

В данном примере была использована реализация пользовательского интерфейса МС с помощью технологии WPF. Она представляет собой новую технологию создания интерфейсов. Имеет в своем составе высокоуровневый объектно-ориентированный функциональный слой, позволяющий создавать 2D- и 3D-интерфейсы. В ней для отрисовки объектов используется не GDI+, как в Windows Forms, а DirectX. Также она поддерживает привязку данных, темы и нестандартные для WinForms элементы. Производительность WPF выше, чем у GDI+, за счет использования аппаратного ускорения [5, 8].

Помимо реализации отображения и редактирования данных МС, интерфейсу необходимо добавить функциональность загрузки МД в проект Analysis Services. Эта функциональность является ключевой для данного проекта. Для загрузки метаданных будем формировать каркас AS (Analysis Services) проекта путем программного создания соответствующих XML файлов. Пользователь отмечает, какие объекты и свойства он хочет загрузить из МС в AS проект. После этого программа проходит по всему дереву классификаторов, выбирает отмеченные для загрузки объекты и свойства и на их основе формирует соответствующие XML файлы для создания OLAP-куба. Формирование XML файлов

Шаблоны файлов AS-проекта

Тип файла	Шаблон
Файл определения проекта служб Analysis Services (DWPROJ)	DWPROJ.tpl
Пользовательские настройки проекта служб Analysis Services (DWPROJ.USER)	DWPROJ.USER.tpl
Файл источника данных (DS)	DS.tpl
Файл представления источника данных (DSV)	DSV.tpl
Файл куба (CUBE)	CUBE.tpl
Файл секций (PARTITIONS)	PARTITIONS.tpl
Файл измерения (DIM)	DIMENSION.tpl
Файл базы данных (DATABASE)	DATABASE.tpl

происходит на основе заранее созданных шаблонов (табл.), к которым только добавляются нужные узлы.

При формировании проекта OLAP-куба из XML файлов основной интерес представляют файлы DSV, CUBE и DIM. В файле DSV описаны представления источника данных. Эти представления являются списком таблиц, используемых в

проекте. Описания таблиц и их свойств даются в понятиях метасистемы.

После необходимой доработки полученного каркаса в среде Analysis Services, для формирования из него пригодного к процессингу куба и заполнения этого куба соответствующими данными из исходной системы можно получить обычный OLAP-куб (рис. 3).

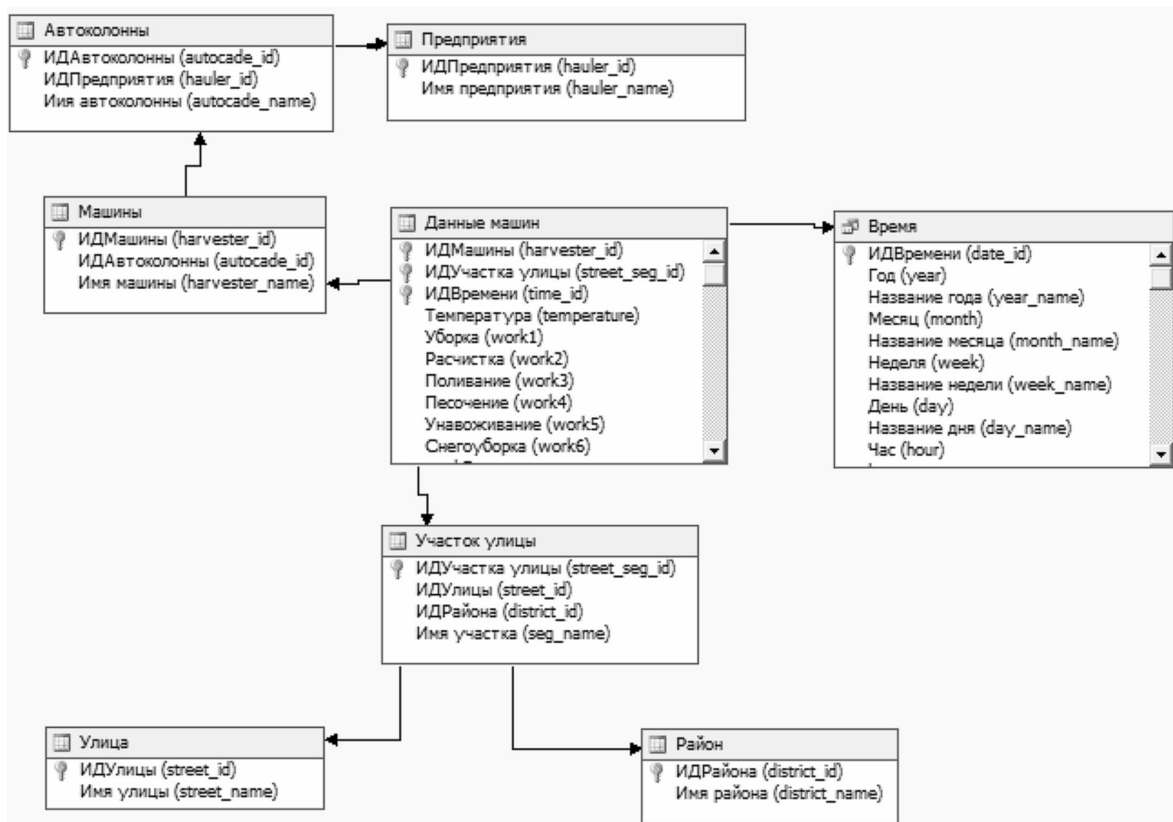


Рис. 3. Окончательная схема куба

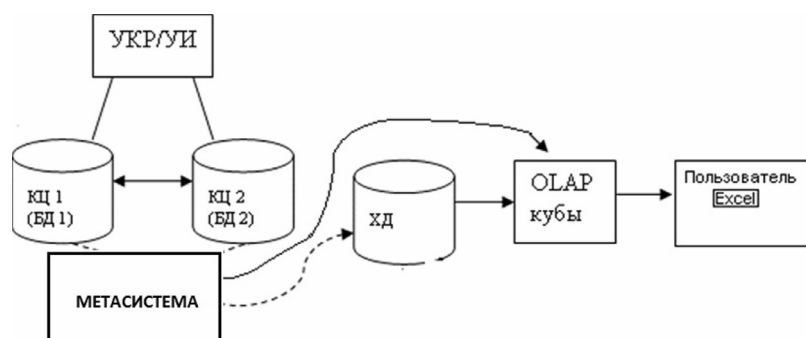


Рис. 4. Предлагаемый вариант аналитической подсистемы

Готовый куб затем можно просмотреть в любом средстве просмотра кубов, например в Excel.

В качестве второго примера была выбрана задача построения аналитической подсистемы для коммерческого банка (рис. 4). Заказчиком подобной системы выступал Северо-Западный Банк Сбербанка РФ. Аналитическая подсистема строилась на базе системы «Управление кассовой работы и управление инкассации» (УКР/УИ). Последняя построена на ядре «СКАУТ 5.0», позволяющем строить учетные системы любой сложности. Эта система предназначена для автоматизации расчетно-кассовых операций, деятельности службы инкассации и других служб коммерческого банка. В ней реализованы системы контроля движения и учета ценностей, обработка заявок, АРМ различных работников, разграничение прав пользователей и др.

В данной системе исходные данные (результаты различных транзакций, справочники и т. п.) хранятся на двух различных базах разных кассовых центров банка (КЦ 1 и КЦ 2). Часть данных

реплицируется. Требуемые для аналитики данные по расписанию выгружаются в хранилище данных (ХД).

При реализации данной задачи МС была использована как промежуточная область между операционными данными (КЦ 1 и КЦ 2) и аналитическими (ХД и OLAP).

В результате, с помощью предлагаемой МС были реализованы двенадцать аналитических отчетов для банка. При этом всю настройку логики работы отчетов осуществляли технологи банка без участия программистов.

Таким образом, предложенная методика построения метасистемы и инструментальные средства поддержки выполнения ее этапов позволяют не только строить информационные системы, наследующие БД с уже определенными структурами данных, но и создавать проблемно-ориентированные оболочки уже существующих систем для обеспечения работы пользователя в его профессионально-смысловой среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко, И.В. Реализация механизма загрузки метаданных в Microsoft Analysis Services [Текст] / И.В. Бутенко, Д.Ф. Дробинцев, В.Э. Ковалевский // Технологии Microsoft в теории и практике программирования. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –С. 97–98.
2. Бутенко, И.В. Использование многомерных структур для обработки больших объемов аналитических данных [Текст] / И.В. Бутенко, В.Э. Ковалевский // Технологии Microsoft в теории и практике программирования. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –С. 96–97.
3. Бутенко, И.В. Методика построения репозитория метаданных для существующей информационной системы [Текст] / И.В. Бутенко, С.М. Устинов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2010. –№ 4 (103). –С. 92–99.
4. Бутенко, И.В. Разработка моделей и методов по-

строения и автоматизированного наполнения системы метаданных [Текст] / И.В. Бутенко, С.М. Устинов // Сб. науч. тр. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. –С. 3–10.

5. Мак-Дональд, Мэтью. WPF: Windows Presentation Foundation в .NET 3.5 с примерами на C# 2008 [Текст] / М. Мак-Дональд; пер. с англ. –СПб.: Вильямс, 2008.

6. Баргесян, А.А. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP [Текст] / А.А. Баргесян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко [и др.]. –СПб.: БХВ-Петербург, 2007. –2-е изд. перераб. и доп. –384 с.

7. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.omg.org/>

8. Wadhwa, P.S. Customized Metadata Solutions for a Data Warehouse – A Success Story [Текст] / P.S. Wadhwa, P. Kamalapur. –White Paper, 2004.

ЭТАПЫ РАНЖИРОВАНИЯ ПОТРЕБНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА ЭКСПЕРТНЫМ МЕТОДОМ (НА ПРИМЕРЕ СФЕРЫ ГОСТЕПРИИМСТВА)

Человек в процессе своей деятельности взаимодействует с окружающим миром с целью удовлетворения своих личностных потребностей. Наличие зависимости между видом деятельности человека и его потребностями, а также услугами сферы гостеприимства, которые направлены на удовлетворение потребностей, обуславливает необходимость формализации потребностей человека для последующего решения задачи управления процессом предоставления услуг. В статье приведены результаты классификационного анализа видов деятельности и потребностей человека, а также описана их взаимосвязь на основе экспертных оценок.

Сложность четкой постановки и описания задачи выбора услуг, которые предоставляются сферой гостеприимства, требует на первом этапе проведения глубокого анализа возможных потребностей человека, при осуществлении им видов деятельности, присущих сфере гостеприимства, а также их ранжирования.

Процесс выбора человеком необходимого набора услуг в сфере гостеприимства характеризуется наличием неопределенных требований и нечеткими данными. Взаимозависимость между

потребностями человека и видами деятельности приводит к необходимости проведения системного исследования данного факта с целью уменьшения степени неопределенности в заказе и, как следствие, в автоматизированном управлении процессом предоставления услуг с использованием информационных систем.

Ранжирование потребностей

Как личности, люди отличаются друг от друга разнообразием имеющихся у них потребностей и особым сочетанием этих потребностей. Количество и качество потребностей, которые имеют живые существа, зависит от уровня их организации, от образа и условий жизни, от места, занимаемого соответствующим организмом на эволюционной лестнице [2].

Потребности – состояние нужды человека или животного в определенных условиях, которых им недостает для нормального существования и развития. Потребность как состояние личности всегда связана с наличием у человека чувства неудовлетворенности, связанного с дефицитом того, что требуется организму (личности) [4]. В большинстве современных трудов авторы ссылаются



Рис. 1. Пирамида потребностей по исследованиям А. Маслоу

на классификацию человеческих потребностей известного американского психолога А.Х. Маслоу (см. рис.).

Ключевым моментом в концепции потребностей Маслоу является то, что потребности не удовлетворяются по принципу все или ничего. Почти о каждом здоровом человеке можно сказать, что он одновременно и удовлетворен, и неудовлетворен во всех своих базовых потребностях. Низшие потребности должны быть удовлетворены в большей мере, чем высшие.

Проведенный анализ возможных потребностей [3] клиента сферы гостеприимства соотносится с классификацией Маслоу [1] следующим образом.

1. *Потребности физиологические (органические):*

$$P_1 = \{p_1^1, p_2^1, p_3^1, p_4^1, p_5^1, p_6^1\}, \quad (1)$$

где p_1^1 – потребность в атмосферном воздухе и его качестве; p_2^1 – в воде и ее качестве; p_3^1 – в пище; p_4^1 – в физиологическом отдыхе; p_5^1 – в физическом развитии; p_6^1 – в продолжении рода и сексуальная потребность.

2. *Потребности в безопасности:*

$$P_2 = \{p_1^2, p_2^2, p_3^2, p_4^2, p_5^2, p_6^2, p_7^2, p_8^2, p_9^2, p_{10}^2, p_{11}^2, p_{12}^2, p_{13}^2, p_{14}^2, p_{15}^2, p_{16}^2, p_{17}^2, p_{18}^2\}, \quad (2)$$

где p_1^2 – потребность в тепловом комфорте; p_2^2 – в пространственном комфорте; p_3^2 – в радиационном комфорте; p_4^2 – в магнитно-волновом комфорте; p_5^2 – в защищенности от паразитарных и вирусно-бактериальных заболеваний и геохимических эндемий; p_6^2 – в гигиене; p_7^2 – в биологическом информационно-пространственном комфорте; p_8^2 – в обеспеченности средствами передвижения; p_9^2 – в личностной безопасности; p_{10}^2 – в поддержании здоровья; p_{11}^2 – в профилактике заболеваний; p_{12}^2 – в лечении болезней; p_{13}^2 – в укреплении здоровья; p_{14}^2 – в развлечениях; p_{15}^2 – в зрелищах; p_{18}^2 – в активном отдыхе; p_{17}^2 – в пассивном отдыхе.

3. *Потребности в принадлежности и любви:*

$$P_3 = \{p_1^3, p_2^3, p_3^3, p_4^3, p_5^3, p_6^3, p_7^3, p_8^3, p_9^3, p_{10}^3, p_{11}^3, p_{12}^3, p_{13}^3, p_{14}^3, p_{15}^3\}, \quad (3)$$

где p_1^3 – потребность вхождения в группу; p_2^3 – в межличностном общении; p_3^3 – в любви и дружбе; p_4^3 – в семье; p_5^3 – в воспитании; p_6^3 – во взаимодействии; p_7^3 – в сочувствии; p_8^3 – в помощи; p_9^3 – в заботе; p_{10}^3 – в гражданских свободах и за-

конности; p_{11}^3 – уверенности в завтрашнем дне; p_{12}^3 – в справедливости; p_{13}^3 – сознания своего пола и возраста; p_{14}^3 – этнические потребности; p_{15}^3 – идеологические потребности.

4. *Потребности уважения (почитания):*

$$P_4 = \{p_1^4, p_2^4, p_3^4, p_4^4, p_5^4, p_6^4, p_7^4, p_8^4, p_9^4, p_{10}^4, p_{11}^4, p_{12}^4, p_{13}^4, p_{14}^4\}, \quad (4)$$

где p_1^4 – потребность в самоутверждении; p_2^4 – в понимании; p_3^4 – в известности; p_4^4 – в признании; p_5^4 – в уважении; p_6^4 – в успехе и благополучии; p_7^4 – в демонстрации достижений; p_8^4 – в привлечении внимания; p_9^4 – в сохранении молодости; p_{10}^4 – быть соблазнительным; p_{11}^4 – быть красивым; p_{12}^4 – в активности; p_{13}^4 – в адекватном материальном и моральном поощрении труда; p_{14}^4 – в обеспечении труда адекватными возможностями его осуществления.

5. *Познавательные потребности* – знать, уметь, понимать, исследовать.

$$P_5 = \{p_1^5, p_2^5, p_3^5, p_4^5, p_5^5, p_6^5, p_7^5, p_8^5, p_9^5, p_{10}^5, p_{11}^5, p_{12}^5, p_{13}^5, p_{14}^5, p_{15}^5, p_{16}^5, p_{17}^5\}, \quad (5)$$

где p_1^5 – потребность в информационно-познавательной среде; p_2^5 – в обеспеченности средствами информации исходя из социальной и трудовой необходимости; p_3^5 – в получении информации; p_4^5 – в обработке информации; p_5^5 – в сохранении информации; p_6^5 – в защите информации; p_7^5 – в обмене информацией; p_8^5 – в принятии решений; p_9^5 – в понимании собеседника; p_{10}^5 – в изложении мыслей; p_{11}^5 – в консультациях; p_{12}^5 – в вере, религии; p_{13}^5 – в повседневном познании; p_{14}^5 – в репродуктивном познании (учеба); p_{15}^5 – в повышении квалификации; p_{16}^5 – в теоретическом (специальном) познании; p_{17}^5 – в продуктивном (открытие принципиально нового знания) познании.

6. *Эстетические потребности:*

$$P_6 = \{p_1^6, p_2^6, p_3^6, p_4^6, p_5^6, p_6^6, p_7^6, p_8^6\}, \quad (6)$$

где p_1^6 – потребность в творчестве и художественной деятельности; p_2^6 – в повышении уровня культуры; p_3^6 – в высоком уровне обеспеченности пищей согласно анатомо-физиологическим, этническим (национально-вкусовым) и престижным нормам; p_4^6 – в высоком уровне обеспеченности одеждой согласно анатомо-физиологическим, повседневным домашним, производственным и рекреационным общественным нормам, этнологическим, этническим, социальным нормам; p_5^6 – в высоком уровне обеспеченности посто-



янным и временным жильем согласно анатомо-физиологическим, повседневным домашним, производственным и рекреационным общественным нормам, этологическим, этническим, социальным нормам; p_6^6 – в высоком уровне обеспеченности предметами обихода, мебелью, личным транспортом, комнатными животными и растениями и т. д. по медико-биологическим и общественным нормам; p_7^6 – в порядке и чистоте; p_8^6 – в роскоши.

7. Потребности в самоактуализации:

$$P_7 = \{p_1^7, p_2^7, p_3^7, p_4^7\}, \quad (7)$$

где p_1^7 – потребность в развитии личности; p_2^7 – в рефлексии; p_3^7 – в созидании; p_4^7 – в реализации способностей.

Этап 1. Выделение видов деятельности человека. Для нашего примера:

$$D = \{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6\}, \quad (8)$$

где D_1 – деятельность на поддержание физиологических потребностей человека (обеспечение жизнедеятельности); D_2 – труд; D_3 – учение; D_4 – досуг; D_5 – общение; D_6 – игра.

Этап 2. Описание системы множеств потребностей человека, реализуемых в различных видах деятельности в матричном виде:

$$M_p = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} & P_{17} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} & P_{27} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} & P_{37} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} & P_{47} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} & P_{57} \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} & P_{67} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где каждый элемент матрицы представляется подмножеством соответствующего множества потребностей (1–7).

Другим способом описания системы множеств потребностей человека, реализуемых в различных видах деятельности, может быть следующий вид:

$$M_p = |p_{ij}|, \quad i = \overline{1, 6}, \quad j = \overline{1, 7}, \quad (10)$$

где $P_{ij} \subseteq P_j$, 6 – количество видов деятельности, 7 – количество видов потребностей.

Этап 3. Проведение первого экспертного опроса по форме, представленной в табл. 1, для определения множеств потребностей P_{ij} , реализуемых в различных видах его деятельности.

Все оценки эксперты выставляли индивидуально, основываясь на собственном опыте. При заполнении формы опроса выдвигались требования:

1) в ячейке ставится знак «плюс», если потребность реализуется в соответствующем виде деятельности человека;

2) если оценку поставить невозможно (например, если потребность непонятна), в графе необходимо ставить прочерк;

Этап 4. Формализация результатов первого экспертного опроса.

Для рассматриваемого примера (сфера гостеприимства), по результатам проведенного экспертного опроса получено 28 анкет с экспертными оценками, которые позволили показать систему множеств потребностей, реализуемых в различных видах деятельности.

Полученные результаты описываются следующими множествами:

потребности физиологические (органические):

$$P_{11} = \{p_1^1, p_2^1, p_3^1, p_4^1, p_5^1, p_6^1\}, P_{21} = \emptyset, P_{31} = \emptyset, P_{41} = \emptyset, P_{51} = \emptyset, P_{61} = \emptyset;$$

потребности в безопасности:

$$P_{62} = \{p_{14}^2, p_{15}^2, p_{19}^2, p_{20}^2\}, \\ P_{12} = \{p_1^2, p_2^2, p_3^2, p_4^2, p_5^2, p_6^2, p_7^2, p_8^2, p_9^2, p_{10}^2, p_{11}^2, p_{12}^2\}, \\ P_{22} = \{p_8^2, p_9^2\}, P_{32} = \emptyset, \\ P_{42} = \{p_{11}^2, p_{13}^2, p_{14}^2, p_{15}^2, p_{16}^2, p_{17}^2, p_{18}^2\}, \\ P_{52} = \{p_7^2, p_{14}^2, p_{16}^2, p_{18}^2\};$$

потребности в принадлежности и любви:

$$P_{13} = \emptyset, P_{23} = \{p_1^3, p_6^3, p_9^3, p_{11}^3\}, \\ P_{33} = \{p_1^3, p_2^3, p_5^3, p_6^3, p_{10}^3, p_{12}^3, p_{13}^3, p_{14}^3, p_{15}^3\}, \\ P_{43} = \{p_1^3, p_2^3, p_3^3, p_4^3, p_5^3, p_6^3, p_{13}^3, p_{14}^3\}, \\ P_{63} = \{p_1^3, p_2^3, p_3^3, p_4^3, p_5^3, p_6^3, p_{12}^3, p_{13}^3\}, \\ P_{53} = \{p_1^3, p_2^3, p_3^3, p_4^3, p_5^3, p_6^3, p_7^3, p_8^3, p_9^3, p_{10}^3, p_{12}^3, p_{13}^3, p_{14}^3, p_{15}^3\};$$

потребности уважения (почитания):

$$P_{24} = \{p_1^4, p_2^4, p_3^4, p_4^4, p_5^4, p_6^4, p_7^4, p_8^4, p_{12}^4, p_{13}^4, p_{14}^4\}, \\ P_{64} = \{p_1^4, p_2^4, p_4^4, p_5^4, p_8^4, p_{12}^4\}, \\ P_{34} = \{p_1^4, p_2^4, p_3^4, p_4^4, p_5^4, p_6^4, p_7^4, p_8^4\}, \\ P_{54} = \{p_1^4, p_2^4, p_3^4, p_4^4, p_5^4, p_7^4, p_8^4, p_{10}^4, p_{12}^4\}, \\ P_{44} = \{p_1^4, p_2^4, p_3^4, p_4^4, p_5^4, p_7^4, p_8^4, p_9^4, p_{10}^4, p_{11}^4, p_{12}^4\}, \\ P_{14} = \emptyset;$$

познавательные потребности:

$$P_{15} = \emptyset, P_{25} = \{p_1^5, p_2^5, p_3^5, p_4^5, p_5^5, p_6^5, p_7^5, p_8^5, p_9^5, p_{10}^5, p_{11}^5, p_{15}^5, p_{17}^5\}, P_{35} = \{p_1^5, p_3^5, p_4^5, p_5^5, p_7^5, p_8^5, p_9^5, p_{10}^5, p_{12}^5, p_{13}^5, p_{14}^5, p_{15}^5\}, \\ P_{45} = \{p_1^5, p_3^5, p_5^5, p_7^5, p_9^5, p_{12}^5, p_{13}^5\},$$

Таблица 1

Фрагмент формы экспертного опроса для определения множеств потребностей, реализуемых в различных видах деятельности

Потребность \ Цель поселения			Обеспечение жизнедеятельности	Труд	Учение	Досуг	Общение	Игра
Потребности физиологические (органические)	1.1	В атмосферном воздухе и его качестве						
	1.2	В воде и ее качестве						
	1.3	В пище						
	1.4							
Потребности в безопасности	2.1	Потребность в тепловом комфорте						
	2.2	В пространственном комфорте						
	2.3	В радиационном комфорте						
	2.4							
Потребности в принадлежности и любви	3.1	Потребность вхождения в группу						
	3.2	В межличностном общении						
	3.3	В любви и дружбе						
	3.4							
Потребности уважения (почитания)	4.1	Потребность в самоутверждении						
	4.2	В понимании						
	4.3	В известности						
	4.4							
Познавательные потребности	5.1	Потребность в информационно-познавательной среде						
	5.2	В обеспеченности средствами информации						
	5.3	В получении информации						
	5.4							
Эстетические потребности	6.1	Потребность в творчестве и художественной деятельности						
	6.2	В повышении уровня культуры						
	6.3	В высоком уровне обеспеченности пищей						
	6.4							
Потребности в самоактуализации	7.1	Потребность в развитии личности						
	7.2	В рефлексии						
	7.3	В созидании						
	7.4							

$$P_{55} = \{p_1^5, p_3^5, p_7^5, p_8^5, p_{10}^5, p_{11}^5, p_{12}^5, p_{13}^5, p_{15}^5\},$$

$$P_{65} = \{p_1^5, p_{10}^5, p_{13}^5, p_{14}^5\};$$

эстетические потребности:

$$P_{16} = \emptyset, P_{26} = \{p_1^6, p_3^6, p_4^6, p_5^6, p_6^6, p_7^6\},$$

$$P_{36} = \{p_2^6, p_3^6, p_4^6, p_5^6, p_6^6, p_7^6\},$$

$$P_{46} = \{p_1^6, p_2^6, p_3^6, p_4^6, p_5^6, p_6^6, p_7^6, p_8^6\}, P_{56} = \{p_2^6\},$$

$$P_{66} = \{p_2^6\}.$$

потребности в самоактуализации:

$$P_{67} = \{p_1^7, p_2^7, p_4^7\}, P_{17} = \emptyset, P_{27} = \{p_1^7, p_3^7, p_4^7\},$$

$$P_{37} = \{p_1^7, p_2^7, p_4^7\}, P_{47} = \{p_1^7, p_2^7, p_4^7\}, P_{57} = \{p_1^7\}.$$

Этап 5. Уточнение системы множеств потребностей человека, реализуемых в различных видах деятельности по результатам экспертного опроса.

Полученные результаты декомпозиции потребностей клиента сферы гостеприимства по видам деятельности упрощают процесс восприятия и, как следствие, анализа системы множеств потребностей. Наличие пустых множеств $P_{21} = \emptyset$, $P_{31} = \emptyset$, $P_{41} = \emptyset$, $P_{51} = \emptyset$, $P_{61} = \emptyset$, $P_{32} = \emptyset$, $P_{13} = \emptyset$, $P_{14} = \emptyset$, $P_{15} = \emptyset$, $P_{16} = \emptyset$, $P_{17} = \emptyset$ позволяет представить матрицу (9) в следующем виде:

$$M_p = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} & P_{27} \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} & P_{37} \\ 0 & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} & P_{47} \\ 0 & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} & P_{57} \\ 0 & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} & P_{67} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

Наличие пустых множеств обусловлено тем, что в результате поддержания жизнедеятельности возникают только физиологические потребности и потребности в безопасности, остальные потребности (P_3-P_7) не характерны для данного вида деятельности. Физиологические потребности не могут быть удовлетворены в процессе учения, досуга, общения либо игры. Учение как процесс также не обеспечивает потребности в безопасности.

Этап 6. Проведение второго экспертного опроса по форме, представленной в табл. 2, для ранжирования потребностей в зависимости от целевого назначения деятельности.

Все оценки эксперты выставляли индивидуально, основываясь на собственном опыте.

При заполнении формы опроса выдвигались следующие требования:

1) все потребности должны быть оценены по шкале от 1 до 9 (т. е. 1, 2, ..., 9);

Таблица 2

Фрагмент формы экспертного опроса для определения ранга потребностей в зависимости от цели поселения в гостинице

Потребность			Цель поселения	Отдых	Лечение	Командировка
Потребности физиологические (органические)	1.1	В атмосферном воздухе и его качестве				
	1.2	В воде и ее качестве				
	1.3	В пище				
	1.4					
Потребности в безопасности	2.1	Потребность в тепловом комфорте				
	2.2	В пространственном комфорте				
	2.3	В радиационном комфорте				
	2.4					
Потребности в принадлежности и любви	3.1	Потребность вхождения в группу				
	3.2	В межличностном общении				
	3.3	В любви и дружбе				
	3.4					
Потребности уважения (почитания)	4.1	Потребность в самоутверждении				
	4.2	В понимании				
	4.3	В известности				
	4.4					
Познавательные потребности	5.1	Потребность в информационно-познавательной среде				
	5.2	В обеспеченности средствами информации				
	5.3	В получении информации				
	5.4					
Эстетические потребности	6.1	Потребность в творчестве и художественной деятельности				
	6.2	В повышении уровня культуры				
	6.3	В высоком уровне обеспеченности пищей				
	6.4					
Потребности в самоактуализации	7.1	Потребность в развитии личности				
	7.2	В рефлексии				
	7.3	В созидании				
	7.4					

Таблица 3

Ранжированный перечень потребностей клиента сферы гостеприимства

Потребность		Цель поселения	Отдых	Лечение	Командировка
1.1	В атмосферном воздухе и его качестве		7,40	7,65	6,55
1.2	В воде и ее качестве		7,65	7,65	7,65
1.3	В пище		7,40	7,65	7,40
1.4	В физиологическом отдыхе		7,65	7,40	6,80
1.5	В физическом развитии		6,21	5,95	5,36
1.6	В продолжении рода и сексуальная потребность		7,40	2,81	4,00
2.1	Потребность в тепловом комфорте		6,30	6,09	5,81
2.2	В пространственном комфорте		4,41	4,20	4,41
2.3	В радиационном комфорте		6,09	6,09	5,60
2.4	В магнитно-волновом комфорте		6,09	5,81	5,60
2.5	В защищенности от паразитарных и вирусно-бактериальных заболеваний		6,09	6,09	5,39
2.6	В гигиене		5,81	5,81	5,39
2.7	В биологическом информационно-пространственном комфорте		4,69	4,20	4,41
2.8	В обеспеченности средствами передвижения		4,69	3,29	5,11
2.9	В личной безопасности		5,39	5,81	6,09
2.10	В поддержании здоровья		5,39	6,30	4,41
2.11	В профилактике заболеваний		4,20	5,60	3,29
2.12	В лечении болезней		3,71	5,81	3,29
2.13	В укреплении здоровья		5,39	5,39	3,29
2.14	В развлечениях		5,81	1,89	2,59
2.15	В зрелищах		5,60	1,89	2,31
2.16	В активном отдыхе		5,39	0,49	1,19
2.17	В пассивном отдыхе		5,39	3,29	2,31
2.18	В стимулированном расслаблении		4,20	2,59	2,59
3.1	Потребность вхождения в группу		2,50	1,35	1,50
3.2	В межличностном общении		2,65	0,85	2,50
3.3	В любви и дружбе		3,85	2,65	1,65
3.4	В семье		4,50	1,85	0,85
3.5	В воспитании		2,00	2,00	1,50
3.6	Во взаимодействии		2,50	2,00	3,00
3.7	В сочувствии		2,00	3,50	1,85
3.8	В помощи		2,15	3,35	2,35
3.9	В заботе		2,85	4,15	1,35
3.10	В гражданских свободах и законности		4,15	4,15	4,15
3.11	Уверенности в завтрашнем дне		4,00	4,00	3,85
3.12	В справедливости		4,00	4,00	4,00
3.13	Сознания своего пола и возраста		2,35	2,50	3,15
3.14	Этнические потребности		2,65	1,00	1,00
3.15	Идеологические потребности		1,85	1,00	1,15
4.1	Потребность в самоутверждении		1,72	1,20	2,52
4.2	В понимании		2,40	1,72	2,80
4.3	В известности		1,48	0,40	1,72
4.4	В признании		1,60	0,52	2,12
4.5	В уважении		2,52	1,88	3,08
4.6	В успехе и благополучии		2,40	2,00	2,52
4.7	В демонстрации достижений		1,88	0,68	2,52
4.8	В привлечении внимания		2,00	1,20	1,88
4.9	В сохранении молодости		2,40	2,40	1,60
4.10	Быть соблазнительным		2,28	1,32	1,48



Потребность		Цель поселения	Отдых	Лечение	Командировка
4.11	Быть красивым		2,80	1,32	2,28
4.12	В активности		2,28	1,08	2,40
4.13	В адекватном материальном и моральном поощрении труда		1,32	1,48	3,48
4.14	В обеспечении труда адекватными возможностями его осуществления		0,80	0,92	3,48
5.1	Потребность в информационно-познавательной среде		1,89	1,20	2,19
5.2	В обеспеченности средствами информации		1,41	0,90	2,10
5.3	В получении информации		1,41	1,41	2,40
5.4	В обработке информации		0,81	0,69	2,40
5.5	В сохранении информации		1,20	0,51	2,40
5.6	В защите информации		1,71	1,29	2,40
5.7	В обмене информацией		1,80	0,99	2,31
5.8	В принятии решений		1,20	0,90	2,31
5.9	В понимании собеседника		1,89	1,59	2,49
5.10	В изложении мыслей		1,11	1,29	2,49
5.11	В консультациях		1,41	1,89	2,31
5.12	В вере, религии		1,59	1,80	1,50
5.13	В повседневном познании		1,71	1,11	1,59
5.14	В репродуктивном познании (учеба)		0,81	0,99	1,59
5.15	В повышении квалификации		0,69	0,81	2,01
5.16	В теоретическом (специальном) познании		0,81	0,90	2,19
5.17	В продуктивном (открытие принципиально нового знания) познании		0,60	0,60	1,89
6.1	Потребность в творчестве и художественной деятельности		1,26	0,60	1,00
6.2	В повышении уровня культуры		1,40	0,66	1,20
6.3	В высоком уровне обеспеченности пищей		1,54	0,80	0,86
6.4	В высоком уровне обеспеченности одеждой		1,20	0,74	1,46
6.5	В высоком уровне обеспеченности жильем		1,34	0,74	1,14
6.6	В высоком уровне обеспеченности предметами обихода		1,26	0,80	1,00
6.7	В порядке и чистоте		1,34	1,40	1,26
6.8	В роскоши		1,20	0,60	0,66
7.1	Потребность в развитии личности		0,47	0,43	0,53
7.2	В рефлексии		0,47	0,33	0,50
7.3	В созидании		0,40	0,23	0,53
7.4	В реализации способностей		0,47	0,27	0,70

2) допускается выставление одинаковых оценок как в строке, так и в столбце;

3) если оценку поставить невозможно (например, если потребность непонятна), в графе допускается ставить прочерк;

4) в графе «Примечание» при необходимости в произвольной форме могут быть даны пояснения к оценке.

Для нашего примера был проведен экспертный опрос людей разных профессий, которые согласились принять участие в анкетировании. В качестве основных целей выбраны отдых, лечение и командировка. По результатам проведенного экспертного опроса получено 48 анкет с экспертными оценками, которые позволили показать ранги

потребностей клиента гостиничного комплекса в зависимости от цели поселения (отдых, лечение, командировка).

Этап 7. Нормирование значений экспертных оценок рангов потребностей.

Учитывая тот факт [1, 3], что у среднестатистического гражданина физиологические потребности должны быть удовлетворены на 85 %, потребность в безопасности – на 70 %, потребность в принадлежности и любви – на 50 %, потребность в уважении – на 40 %, познавательные – на 30 %, эстетические – на 20 %, а потребность в самоактуализации – на 10 %, для наших целей необходимо ввести нормировочный коэффициент k_n :

$$k_n = \begin{cases} 0,85, \text{ для } P_1; \\ 0,70, \text{ для } P_2; \\ 0,50, \text{ для } P_3; \\ 0,40, \text{ для } P_4; \\ 0,30, \text{ для } P_5; \\ 0,20, \text{ для } P_6; \\ 0,10, \text{ для } P_7. \end{cases} \quad (12)$$

Нормируя (путем умножения на нормировочный коэффициент) значения экспертных оценок рангов потребностей клиента гостиничного комплекса, в зависимости от цели поселения, получена таблица ранжированных потребностей клиента сферы гостеприимства (табл. 3).

Полученный ранжированный перечень потребностей клиента сферы гостеприимства позволит упростить процесс выбора услуг гостиничного комплекса за счет исключения из рассмотрения в интеллектуальных процедурах выбора гостиничного номера потребностей, которые имеют ранг ниже заданного порога. В качестве направления дальнейшего исследования необходимо выделить разработку процедуры ранжирования услуг гостиничного комплекса, основанную на полученных результатах, а также разработку метода интеллектуального выбора гостиничного номера, основанного на математическом аппарате, экспертных оценках, приведенных в данной работе, и интеллектуальной процедуре многокритериальной оптимизации выбора в условиях неопределенности.

Предложенная классификация потребностей человека при использовании услуг сферы гостеприимства строго сочетается с классификацией Абрахама Маслоу, что позволяет сделать вывод о ее адекватности.

Используя данные экспертного опроса, удалось:

определить систему множеств потребностей человека, реализуемых в различных видах деятельности для сферы гостеприимства;

выполнить ранжирование потребностей клиента гостиничного комплекса в зависимости от цели поселения в гостиницу (отдых, лечение, командировка).

Данные результаты стали основой для получения матрицы потребностей клиента гостиничного комплекса и выполнения процедуры ранжирования. Предложенная матрица потребностей человека для сферы гостеприимства основана на взаимозависимости между потребностями и видами деятельности человека. Наличие нулевых элементов матрицы упрощает процесс анализа возможных потребностей.

Внедрение полученных результатов в информационную систему автоматизированного управления процессом предоставления услуг позволит уменьшить степень неопределенности заказа клиента при условии ранжирования потребностей в зависимости от целевого направления его деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрахам Маслоу и иерархия потребностей // Энциклопедия маркетинга [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.marketing.spb.ru/lib-around/maslow.htm>
2. Блэкуэлл, Р.Д. Поведение потребителей : Учебник [Текст] / Р.Д. Блэкуэлл, П.У. Миниард, Д.Ф. Энджел. – 9-е междунар. изд. – СПб.: Питер, 2002. – 621 с.
3. Орлов, С.В. Человек и его потребности: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям сервиса [Текст] / С.В. Орлов. – СПб.: Питер, 2006. – 158 с.
4. Маклаков, А.Г. Общая психология [Текст] / А.Г. Маклаков. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.

ШУМЫ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Акустоэлектронные устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) находят широкое применение в различных радиоэлектронных и оптоэлектронных системах. Основными применениями устройств на ПАВ являются: фильтры промежуточной частоты (ПЧ); дуплексеры; резонаторы; генераторы, управляемые напряжением; линии задержки (ЛЗ) и фильтры для аналоговых и цифровых абонентских станций подвижных систем связи стандартов GSM, DECT, CDMA, цифровой сотовой связи (DCS), персональной радиотелефонной связи (PCN), беспроводной локальной вычислительной сети (Wireless LAN), спутниковых систем связи INMARSAT-C; дисперсионные ЛЗ; фильтры Найквиста для базовых станций (БС), радиорелейных линий (РРЛ); канальные фильтры телевизионных станций и сетей кабельного телевидения; модули выделения тактового сигнала для волоконно-оптических линий связи в стандартах SDH, ATM, SONET; устройства радиочастотных меток для идентификации транспортных средств и контейнеров; конвольверы для широкополосных систем и средств связи. Таким образом, областями применения устройств на ПАВ являются практически все перспективные системы и аппаратура передачи и обработки информации нового поколения: подвижные, спутниковые, тропосферные и радиорелейные линии связи, спутниковое, кабельное, цифровое, сотовое телевидение и телевидение высокой четкости [1].

Важная характеристика устройств, применяемых в системах обработки информации, – динамический диапазон (ДД). Нижняя граница ДД определяется минимальным уровнем полезного сигнала, различимого на выходе устройства с заданной вероятностью ошибки. Применительно к системам обработки информации с использова-

нием устройств на поверхностных акустических волнах различают два подхода к определению нижней границы ДД. Первый, изложенный в [2], сводится к возможности различения полезного сигнала от возникающих в системе ложных сигналов. Их появление связано, прежде всего, с отражениями от встречно-штыревых преобразователей, которые, участвуя в дальнейшем процессе формирования выходного сигнала, порождают ложные отклики. Другой подход, принимаемый в [3], определяет нижнюю границу ДД уровнем тепловых шумов устройства. Такой подход является более общим, поскольку определяет фундаментальное ограничение на минимальное значение полезного сигнала и позволяет отдельно рассматривать задачу снижения уровня ложных сигналов в системе обработки информации при минимизации шумов.

Цель данной работы – экспериментальное исследование шумов акустоэлектронных приемных устройств на ПАВ и разработка методики оптимизации параметров пьезоплаты и усилителя с целью минимизации общего коэффициента шума и расширения динамического диапазона всего радиоэлектронного тракта при минимальных вносимых искажениях.

Постановка мал шумящего усилителя впереди пьезоплаты способна обеспечить малое значение коэффициента шума всего акустоэлектронного модуля. Однако возникающие за счет нелинейности входного усилителя интермодуляционные сигналы имеют значительную величину, неприемлемую во многих практических случаях, когда их частоты попадают в полосы прозрачности пьезоплаты. Коэффициент усиления входного усилителя, с точки зрения минимального значения коэффициента шума, должен быть выбран таким, чтобы в значительной степени ослабить шу-

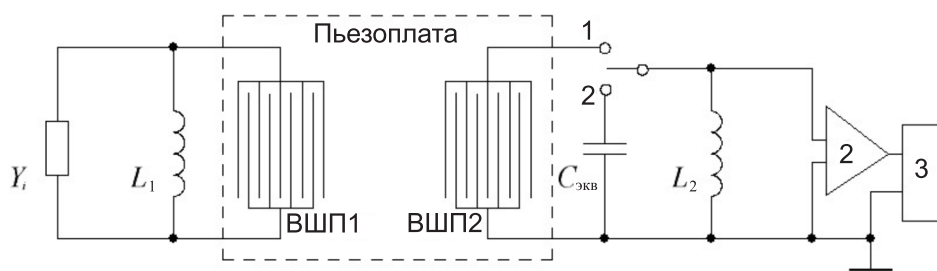


Рис. 1. Структурная схема измерений шумовых параметров

мовой вклад последующего прибора на ПАВ и, в то же время, иметь наименьшее значение, чтобы создавать минимальные интермодуляционные сигналы.

Для уточнения параметров эквивалентной шумовой схемы пьезокристаллических устройств на ПАВ были проведены измерения эквивалентного шумового тока ВШП ряда образцов линий задержки и полосовых фильтров с помощью схемы измерений, изображенной на рис. 1.

Шумовой сигнал ВШП усиливается выходным усилителем 2. Селективным микровольтметром 3 в положении переключателя 1 измеряется спектральная плотность мощности шума ВШП с уси-

лителем; в положении 2 – усилителя с емкостью на входе, которой ВШП обладает на измеряемой частоте в параллельной эквивалентной схеме замещения. Через известные параметры усилителя спектральные плотности шума пересчитываются к его входу. Поскольку шумы усилителя и ВШП некоррелированы между собой, спектральная плотность шумового тока ВШП определяется разностью квадратов показаний селективного микровольтметра в первом и во втором случаях, пересчитанных ко входу усилителя.

Шумовые характеристики пьезокристаллических устройств на ПАВ измерялись для широкого класса фильтров и линий задержки различных

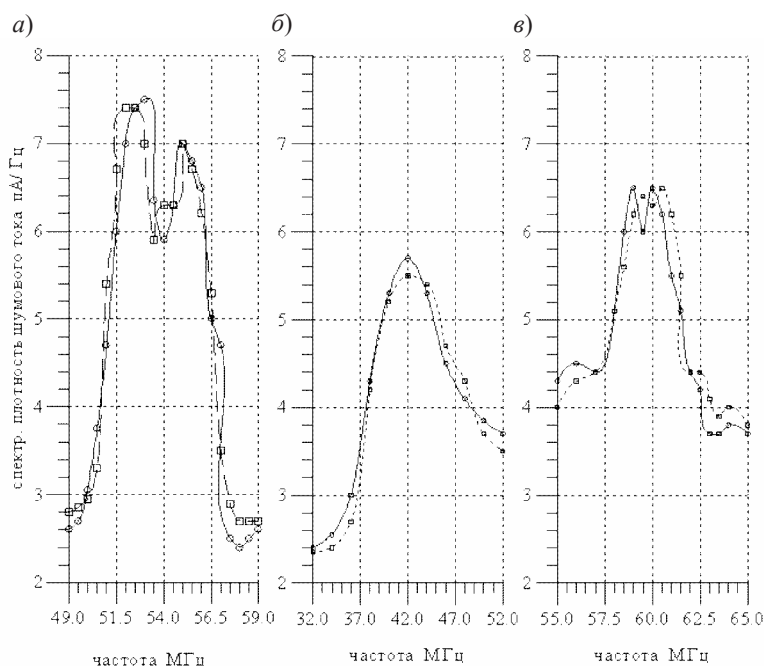


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности шумового тока от частоты:
а – фильтра 04ФЕ1-Е на первой гармонике; б – фильтра 04ФЕ2-Е на второй гармонике; в – фильтра 04ФЕ2-Е на третьей гармонике
(○—○—○) измеренная спектр. плотность шумового тока ВШП;
(□—□—□) рассчитанная спектр. плотность теплового шума активного сопр. ВШП

функциональных назначений. В качестве примера на рис. 2 представлены типичные зависимости спектральной плотности шумового тока входных аподизованных ВШП фильтров 04ФЕ1-Е на частоте акустического синхронизма (а) и 04ФЕ2-Е с расщепленными электродами на второй (б) и третьей гармонике (в) частоты акустического синхронизма. На тех же графиках пунктирной линией приведена зависимость рассчитанного по формуле Найквиста теплового шума активного сопротивления, измеряемого на зажимах ВШП. В пределах погрешности измерения эти кривые совпадают. Многочисленные измерения для других ВШП на различных гармониках обнаруживают аналогичное совпадение.

Таким образом, наблюдается довольно точное соответствие шумов ПАВ-приборов тепловому шуму активной части сопротивления на зажимах ВШП и отсутствие каких-либо существенных шумов. Максимальные значения пиков спектральной плотности шумового тока достигают значения $6-8 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$. При этом спектральная плотность мощности шума в 3–5 раз превосходит значение спектральной плотности мощности шума собственно усилителя. Таким образом, динамический диапазон пьезокристаллических устройств на ПАВ с малошумящим предварительным усилителем и противозумовой коррекцией определяется, в основном, именно шумами пьезокристаллических устройств, а не шумами предварительного усилителя.

Эквивалентную шумовую схему сборки «прибор на ПАВ – усилитель» с противозумовыми коррекциями возможно представить в виде, изображенном на рис. 3.

Система $|Y|$ -параметров описывает акусто-электронное устройство на ПАВ как четырехполюсник, причем $Y_{11} = G_{a1} + jB_{a1}$, $Y_{22} = G_{a2} + jB_{a2}$, где G_{a1} , G_{a2} – проводимости излучения входного и выходного ВШП, L_1 и L_2 – индуктивности противозумовых коррекций на входе и выходе пьезоплаты. Шумовые генераторы I_{n1} и I_{n2} от-

ражают тепловой шум сопротивления излучения, соответственно, входного и выходного ВШП, причем спектральная плотность их определяется выражениями $\overline{I_{n1}^2} = 4kT\Delta f G_{a1}$, $\overline{I_{n2}^2} = 4kT\Delta f G_{a2}$. Проводимости излучения G_{a1} , G_{a2} и проводимость передачи Y_{21} в соответствии с эквивалентной схемой Мэзона равны [4]:

$$\begin{aligned} G_{a1} &= 8N^2 Y_0 l \left(\frac{\sin\left(\pi N \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)}{\pi N \frac{\Delta\omega}{\omega_0}} \right)^2, \\ G_{a2} &= 8M^2 Y_0 l \left(\frac{\sin\left(\pi M \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)}{\pi M \frac{\Delta\omega}{\omega_0}} \right)^2, \\ Y_{21} &= \sqrt{w} 8NM Y_0 l \frac{\sin\left(\pi N \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right) \sin\left(\pi M \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)}{\pi N \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \pi M \frac{\Delta\omega}{\omega_0}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где N, M – эффективное количество пар электродов входного и выходного ВШП; ω_0 – частота акустического синхронизма; w – зависящий от конструкции пьезоплаты параметр; $Y_0 = \frac{k_m^2 C_0 \omega_0}{2\pi}$ – удельная характеристическая акустическая проводимость ВШП; k_m^2 – коэффициент электро-механической связи для ПАВ в материале; l – апертюра ВШП; C_0 – емкость пары электродов на единицу длины электродов. Данная емкость определяется геометрией электродов и диэлектрической проницаемостью материала звукопровода. В зависимости от отношения ширины электрода к половине расстояния между центрами электродов d_n емкость C_0 может быть вычислена по приближенной формуле $C_0 = 2[6,5d_n^2 + 1,08d_n + 2,37](\epsilon_r + 1)$ [4].

Коэффициент электро-механической связи, определяемый как отношение электрической и акустической энергий волны, однозначно характеризует пьезоэлектрические свойства материала.

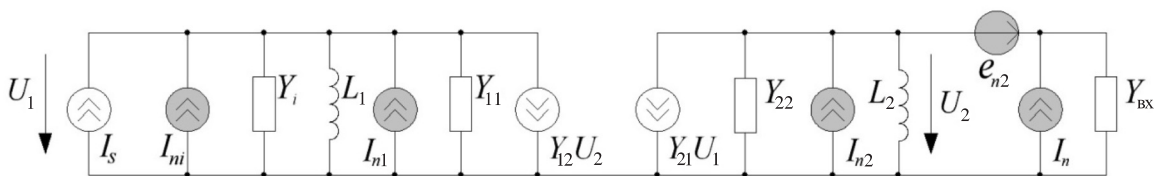


Рис. 3. Эквивалентная шумовая схема сборки «прибор на ПАВ – усилитель»

Одним из наибольших значений коэффициента электромеханической связи $k_m^2 = 0,045$ обладает ниобат лития (LiNO_3). Один из самых дешевых материалов – окись цинка (ZnO) имеет значение коэффициента $k_m^2 = 0,004$.

Коэффициент шума, определяемый как отношение полной мощности шумов на выходе к мощности шумов на выходе идеального (не шумящего) устройства, определяется выражением [5]:

$$F = 1 + 2(wF_y - 1) + \frac{G_{11}}{G_i} \left\{ wF_y \left(1 + \frac{(B_i + B_{L1} + B_{11})^2}{G_{11}^2} \right) - 1 \right\} + \frac{G_i}{G_{11}} wF_y, \quad (2)$$

$$F_y = 1 + \frac{G_n}{G_{22}} + R_n G_{22} \left(1 + \frac{(B_{22} + B_{L2})^2}{G_{22}^2} \right) + \frac{B_{22} + B_{L2}}{G_{22}} 2\beta\sqrt{R_n G_n} + 2\alpha\sqrt{R_n G_n},$$

где $Y_{11} = G_{11} + jB_{11}$, $Y_{22} = G_{22} + jB_{22}$, $Y_i = G_i + jB_i$ – полные проводимости входного и выходного ВШП и источника сигнала соответственно; R_n, G_n и $\gamma = \alpha + j\beta$ – рациональная система шумовых параметров усилителя; B_{L1} и B_{L2} – проводимости реактивностей противошумовых коррекций на входе и выходе пьезоплаты; $w = \frac{G_{11}G_{22}}{|Y_{21}|^2}$ – зависящий от конструкции пьезоплаты параметр. Минимальное значение w в случае двунаправленных ВШП на частоте акустического синхронизма равно двум. В случае идеальных однонаправленных ВШП $w = 1$.

Минимальное значение собственного коэффициента шума при согласованном источнике сигнала для двунаправленных ВШП, в соответствии с полученным выражением при $F_y = 1$, может составлять величину около 7 дБ.

Анализ выражения (2) показывает, что коэффициент шума возможно существенно снизить за счет применения противошумовых коррекций на входе и выходе пьезоплаты. Значения соответствующих реактивностей, при условии малости мнимой части коэффициента корреляции шумовых источников усилителя, определяются выражениями $B_i + B_{L1} + B_{11} = 0$ и $B_{22} + B_{L2} = 0$, откуда определяются значения индуктивностей противошумовых коррекций:

$$L_1 = \frac{1}{\omega_0 \left(\frac{2\pi Y_0 N l}{k_m^2} + B_i \right)}, L_2 = \frac{k_m^2}{\omega_0 2\pi Y_0 M l} \quad (3)$$

Условия эффективности противошумовой коррекции для выходного ВШП пьезоплаты, в отличие от входного, не совпадают с условиями согласования ВШП и усилителя по мощности. Соответствующий выбор значения L_2 позволяет в некоторой степени снизить уровень трехпролетного эхо-сигнала, однако снять эту проблему полностью в большинстве случаев не может. В том случае, если активная часть сопротивления излучения выходного ВШП пьезоплаты близка к активной части входного сопротивления предварительного усилителя, применение указанных противошумовых коррекций приближает режим работы устройства к режиму согласования по мощности. За счет этого поднимается уровень трехпролетного эхо-сигнала и сужается рабочая полоса устройства, что крайне нежелательно во многих практических случаях.

В значительной степени избежать этого эффекта позволяет применение в первом каскаде усилителя включения транзистора по схеме с общей базой (ОБ). Оптимальные проводимости источников сигнала с точки зрения согласования по шумам для каскадов с общим эмиттером (ОЭ) и (ОБ) примерно одинаковы, а для согласования по мощности отличаются на один–два порядка. Следовательно, при использовании включения транзистора по схеме с ОБ, возможно обеспечить одновременно режим полного шумового согласования и значительно большего рассогласования по мощности, чем в случае использования каскада с ОЭ. Таким путем существенно снижается уровень паразитного трехпролетного эхо-сигнала и сопутствующих искажений амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик устройства. Принципиальная схема выходного усилителя, разработанного для снижения уровня шумов и расширения ДД сборки «прибор на ПАВ – усилитель», представлена на рис. 4. Индуктивность в схеме выполняет роль противошумовой коррекции.

Экспериментальная проверка результатов расчета значения коэффициента шума по выражению (2) была проведена на образцах фильтров 04ФЕ1А, 04ФЕ1Б и радиочастотной линии задержки (РЛЗ) на 1 мкс с полосой пропускания около 30 %, выполненных на ниобате лития. Уровень подавления трехпролетного эхо-сигнала при работе совместно с серийно выпускаемым усилителем типа 290УР-1 без дополнительного согласования имел значение около –40 дБ. Для исследуемых РЛЗ была также проведена комплексная

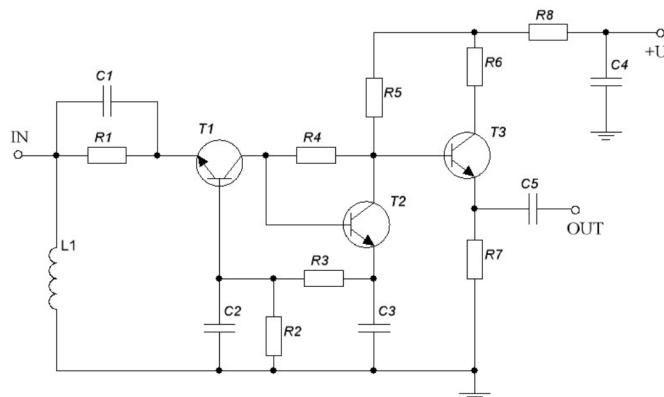


Рис. 4. Принципиальная схема выходного усилителя

оптимизация параметров с использованием метода нелинейного программирования.

Результаты экспериментальных измерений и расчетов коэффициента шума по формуле (2) для образцов РЛЗ с упомянутым выше серийным усилителем и усилителем с включением во входном каскаде транзистора с ОБ приведены на рис. 5.

Сплошными линиями нанесены экспериментальные кривые, пунктирными – расчетные. Кривые 1 и 2 – зависимости коэффициента шума РЛЗ с усилителем 290УР-1 при наличии противозумовой коррекции и без нее от сопротивления источника сигнала. Кривые 3 и 4 – те же зависимости для усилителя, входной каскад которого выполнен по схеме рис. 4 с включением транзистора с ОБ. Все измерения и расчеты проводились на частоте акустического синхронизма.

Как видно из графиков, для обоих типов усилителей противозумовая коррекция дает существенный выигрыш – около 10 дБ вблизи оптимального значения сопротивления источника сигнала. Однако для серийно выпускаемого усилителя, имеющего высокоомный вход ($Z_{вх} = 200\text{--}300\text{ Ом}$), применение противозумовых коррекций имеет резко отрицательные последствия: значительно (до 20 %) сужается полоса пропускания устройства, и на 15 дБ вырастает трехпролетный эхо-сигнал. Это практически сводит на нет возможность применения противозумовых коррекций для таких усилителей при широкой полосе рабочих частот устройства. Значение коэффициента шума макетных образцов микросборки РЛЗ с серийным усилителем при стандартном режиме включения в 50-омном тракте составляет около 38 дБ. Минимальное значение коэффициента шума РЛЗ с предложен-

ным входным каскадом усилителя, достигнутое при оптимальном с точки зрения шумового согласования сопротивлении источника сигнала (3,0 кОм), составило 18 дБ. Важно также отметить, что этот выигрыш возможно реализовать, а в некоторых случаях еще улучшить и при других значениях сопротивления источника сигнала, в т. ч. и в 50-омном тракте.

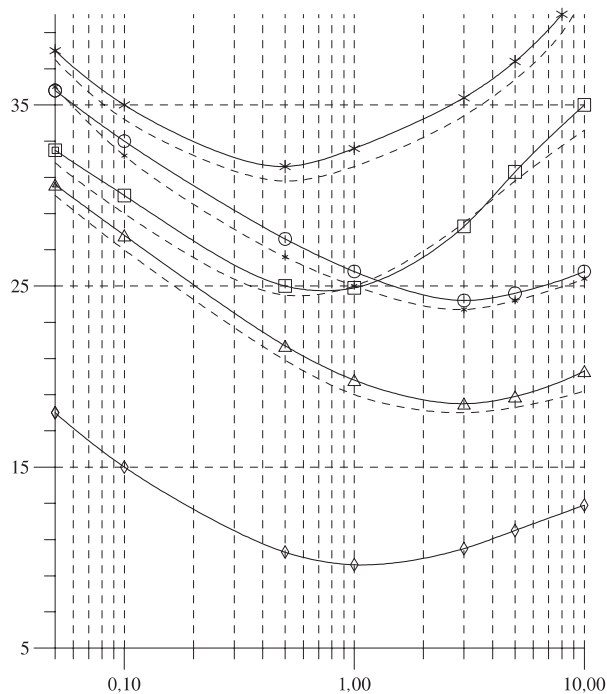


Рис. 5. Зависимость коэффициента шума от сопротивления источника сигнала устройств на ПАВ, работающих совместно с (*—*) 1 микросборкой 290 УР-1; (○—○—○) 2 микросборкой 290 УР-1 с противозумовой коррекцией; (□—□—□) 3 усилителем с ОБ; (△—△—△) 4 усилителем с ОБ с противозумовой коррекцией; (◇—◇—◇) 5 усилителем с ОБ при комплексной оптимизации

Обеспечение режима полного шумового согласования в пьезокристаллических устройствах на ПАВ со встроенными транзисторными усилителями должно производиться при удовлетворении основных рабочих характеристик, присущих каждому конкретному классу устройств на ПАВ. Например, к радиочастотным линиям задержки на ПАВ предъявляются требования по обеспечению заданной полосы пропускания и уровню подавления трехпролетного эхо-сигнала. Для фильтров на ПАВ к этим требованиям добавляются заданный уровень селективности по боковым лепесткам, коэффициент прямоугольности АЧХ. Таким образом, задача минимизации общего уровня шума пьезокристаллических устройств на ПАВ, работающих совместно с транзисторным усилителем, сводится к минимизации функционала (2)

$$\frac{|Y_{21}|}{|Y_{210}|} (G_{110} + G_i) \frac{[(G_{220} + G_{\text{вх}})^2 + B_{\text{вх}}^2]^{1/2}}{\left[(G_{11} + G_i)^2 + \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} N \frac{2\pi Y_{0l}}{k_m^2} \right)^2 \right]^{1/2} \left[(G_{22} + G_{\text{вх}})^2 + \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} M \frac{2\pi Y_{0l}}{k_m^2} + B_{\text{вх}} \right)^2 \right]^{1/2}} = 0,707, \quad (4)$$

где G_{110} , G_{220} – активные проводимости излучения ВШП на частоте акустического синхронизма $G_{110} = 8N^2 Y_{0l}$, $G_{220} = 8M^2 Y_{0l}$.

Ограничение по уровню подавления L трехпролетного эхо-сигнала выражается неравенством:

$$\frac{w}{L} \left(1 + \frac{G_i}{8N^2 Y_{0l}} \right) \left[\left(1 + \frac{G_{\text{вх}}}{8M^2 Y_{0l}} \right)^2 + \left(\frac{B_{\text{вх}}}{8M^2 Y_{0l}} \right)^2 \right]^{1/2} > 1. \quad (5)$$

Таким образом, задача комплексной оптимизации РЛЗ на ПАВ и усилителя по критерию максимального отношения сигнала к шуму сводится к минимизации функционала (2) при ограничении–равенстве (4) и ограничении–неравенстве (5). Вычисления проводились для малошумящих высокочастотных транзисторов типа 2Т3114, 2Т3121 и других, имеющих высокую граничную частоту, малое значение объемного сопротивления базы и высокое значение коэффициента передачи по току.

Для достижения минимального значения коэффициента шума оптимизируются значения количества пар электродов и апертура входного и выходного ВШП пьезоплаты, а также ток эмиттера входного транзистора усилителя. На каждый из оптимизационных параметров накладываются ограничения сверху и снизу по технически реализуемым значениям: количество пар электродов

при ограничениях, наложение которых связано с удовлетворением технических параметров, характерных для данного класса устройств. Решение поставленной задачи может быть осуществлено методом нелинейного программирования при нелинейных ограничениях, соответствующих классу устройств.

Для демонстрации указанной возможности была проведена комплексная оптимизация совокупности параметров пьезоплаты РЛЗ и усилителя методом нелинейного программирования с ограничениями. Наложение ограничений связано с удовлетворением заданной полосы пропускания устройства и уровню подавления трехпролетного эхо-сигнала.

Полоса пропускания по уровню 3 дБ определяется уравнением:

ВШП – от 2 до 50; их апертура – от 1 до 10 мм; ток эмиттера транзистора – от 0,25 до 10 мА. Поиск минимума функционала осуществлялся численными методами с использованием алгоритма нелинейной оптимизации Флетчера–Пауэлла первого порядка, который предусматривает вычисление производных по оптимизационным параметрам функционала (2) и ограничений (4) и (5). Ввиду громоздкости эти выражения здесь не приводятся.

В расчетах использовались следующие измеренные и рассчитанные параметры: удельная характеристическая акустическая проводимость пьезоплаты $Y_0 = 1,2$ мкСм/м; коэффициент электромеханической связи $k_m^2 = 0,048$; распределенное сопротивление базы транзистора 15 Ом; коэффициент передачи тока 100; коэффициент $w = 2$.

Нижняя кривая на рис. 5 представляет собой зависимость значения минимального коэффициента шума РЛЗ с полосой пропускания 30 % и подавлением трехпролетного сигнала на 40 дБ, работающей совместно с усилителем, входной каскад которого выполнен по схеме с ОБ (см. рис. 4), от значения сопротивления источника сигнала, для которого производится оптимизация. Значение глобального минимума коэффициента шума составило 10 дБ при сопротивлении источника 1 кОм. Дополнительный выигрыш от оптимизации

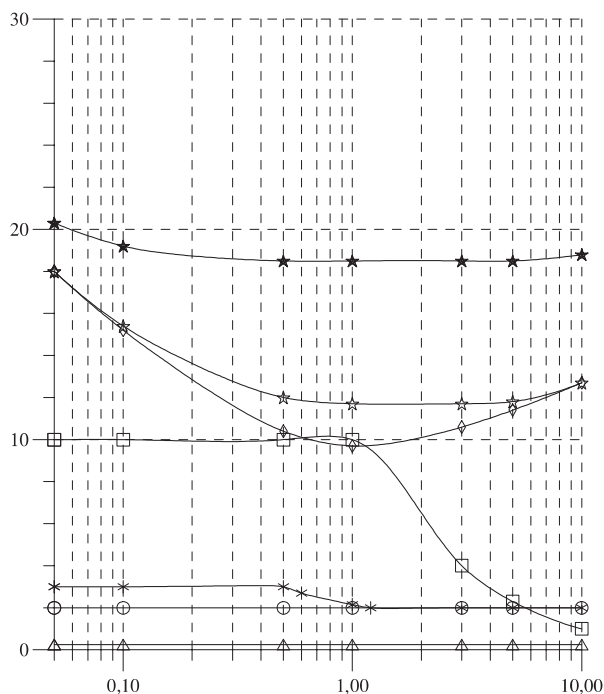


Рис. 6. Зависимость коэффициента шума (дБ) и параметров оптимизации от сопротивления источника сигнала

- (*—*—*) 1 количество пар электродов входного ВШП;
- (○—○—○) 2 количество пар электродов выходного ВШП;
- (□—□—□) 3 апертура ВШП, мм;
- (△—△—△) 4 ток эмиттера транзистора, мА;
- (◇—◇—◇) 5 минимизированный коэфф. шума при подавлении эхо-сигнала 40 дБ;
- (☆—☆—☆) 6 минимизированный коэфф. шума при подавлении эхо-сигнала 60 дБ;
- (★—★—★) 7 минимизированный коэфф. шума при подавлении эхо-сигнала 80 дБ

ции параметров пьезоплаты и усилителя составил 8 дБ. На рис. 6 представлено изменение при минимизации коэффициента шума оптимизационных параметров для того же случая. Кривые 1 и 2 — зависимости количества пар электродов соответственно, входного — N и выходного — M ВШП пьезоплаты; 3 — апертуры l , мм; 4 — тока эмиттера I_e транзистора, мА; 5, 6, 7 — минимизированного коэффициента шума в дБ при уровнях подавления трехпролетного эхо-сигнала 40, 60 и 80 дБ от сопротивления источника сигнала, для которого производится оптимизация. Повышение минимального коэффициента шума на краях определяется техническими ограничениями на оптимизационные параметры.

На рис. 7 представлены результаты оптимизации в зависимости от значения полосы пропускания РЛЗ. Обозначения кривых сохра-

няются. Значение глобального минимума для узкополосных приборов (до 25 % от центральной рабочей частоты) несколько ниже, чем для широкополосных (25 % и более). На рис. 8 приведены результаты оптимизации узкополосной РЛЗ (ширина полосы пропускания 5 %). Обозначения кривых такие же, как и на предыдущих рисунках. Глобальный минимум коэффициента шума по сравнению с 30-процентной РЛЗ достигается в более широком диапазоне сопротивлений источника сигнала.

К фильтрам на ПАВ предъявляются такие технические требования, как заданная полоса пропускания, коэффициент прямоугольности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), уровень селективности по боковым лепесткам и неравномерность АЧХ в полосе прозрачности фильтра. Данные требования обеспечиваются выбором количества пар электродов и функцией аподизации ВШП, по которой осуществляется

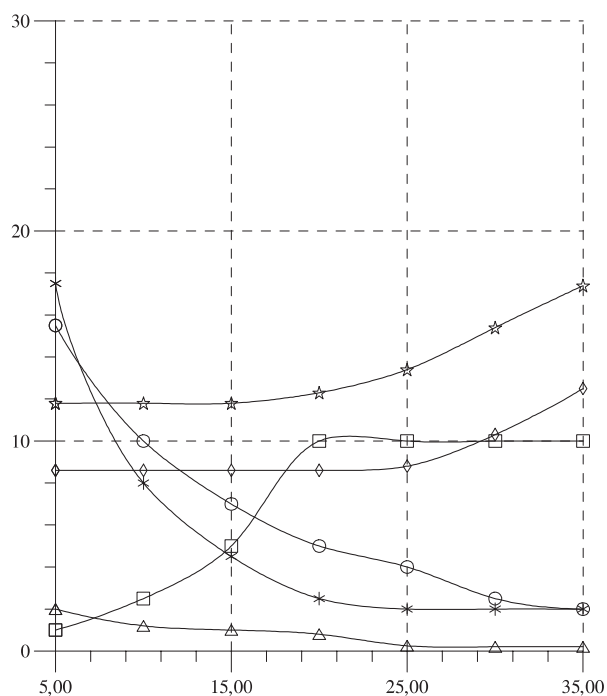


Рис. 7. Зависимость коэффициента шума (дБ) и параметров оптимизации от относительной полосы пропускания

- (*—*—*) 1 количество пар электродов входного ВШП;
- (○—○—○) 2 количество пар электродов выходного ВШП;
- (□—□—□) 3 апертура ВШП, мм;
- (△—△—△) 4 ток эмиттера транзистора, мА;
- (◇—◇—◇) 5 минимизированный коэфф. шума при подавлении эхо-сигнала 40 дБ;
- (☆—☆—☆) 6 минимизированный коэфф. шума при подавлении эхо-сигнала 60 дБ

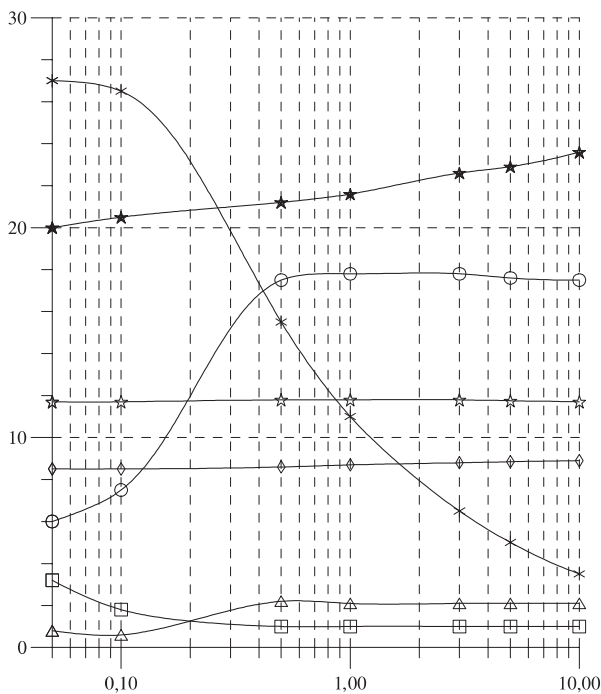


Рис. 8. Зависимость коэффициента шума и параметров оптимизации от сопротивления источника сигнала узкополосного прибора на ПАВ (*—*) 1 количество пар электродов входного ВШП; (○—○) 2 количество пар электродов выходного ВШП; (□—□) 3 апертура ВШП, мм; (△—△) 4 ток эмиттера транзистора, мА; (◇—◇) 5 минимизированный коэф. шума при подавлении эхо-сигнала 40 дБ; (☆—☆) 6 минимизированный коэф. шума при подавлении эхо-сигнала 60 дБ; (★—★) 7 минимизированный коэф. шума при подавлении эхо-сигнала 80 дБ

перекрытие электродов согласно импульсному отклику фильтра. Методики проектирования фильтров на ПАВ к настоящему времени в достаточной степени разработаны. Факторами, не влияющими на технические характеристики фильтра на ПАВ, являются инвариантность АЧХ к апертуре и перестановке местами аподизованного и неаподизованного преобразователей по отношению к источнику сигнала. В свою очередь известным фактом является зависимость шумовых свойств транзисторного усилителя от протекающего через него тока и внутреннего сопротивления источника сигнала. Таким образом, заданные технические характеристики радиоэлектронного тракта с использованием фильтра на ПАВ обеспечиваются выбором количества пар электродов и функцией аподизации ВШП, при этом шумовое согласование в системе обеспечивается выбором

апертуры пьезоплаты, сопротивления источника сигнала и тока транзисторного усилителя.

Функция аподизации электродов ВШП определяется Фурье-преобразованием заданной частотной характеристики фильтра. Импульсный отклик, полученный таким образом, имеет неограниченную протяженность. Для практической реализации фильтра топология электродов на пьезоплате, выполненная согласно импульсному отклику, должна быть ограничена конечным числом боковых лепестков. Ограничение длины приводит к появлению пульсаций Гиббса на реальной частотной характеристике, которые могут привести к существенному ухудшению избирательных свойств фильтра. Простое ограничение Фурье-преобразования идеальной частотной характеристики эквивалентно умножению на прямоугольную «оконную» весовую функцию. Пульсации Гиббса могут быть эффективно понижены путем специальной модификации оконной функции более сложного вида, например, «окна Кайзера», однако при проведении шумового согласования поправка на различный вид функции окна незначительна. Во многих практических случаях функция окна ограничивает топологию электродов по функции аподизации типа $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$ на двух боковых лепестках по обе стороны от главного лепестка. Поскольку АЧХ тракта инвариантна по отношению к перестановке преобразователей, исследованию подлежат два возможных варианта включения фильтра на ПАВ в радиоэлектронный тракт:

1) входной ВШП неаподизован, выходной ВШП аподизован;

2) входной ВШП аподизован, выходной ВШП неаподизован [6].

Задача минимизации общего уровня шума фильтра на ПАВ, работающего совместно с транзисторным усилителем, была исследована в [7] для различных материалов пьезоплат, наиболее часто применяемых в акустоэлектронике: ниобата лития YZ-среза ($k_m^2 = 0,048$, $C_0 = 4,6$ пф/см), танталата лития YZ-среза ($k_m^2 = 0,0074$, $C_0 = 5,7$ пф/см), оксида цинка ($k_m^2 = 0,004$, $C_0 = 4,51$ пф/см) и кварца YX-среза ($k_m^2 = 0,0023$, $C_0 = 0,55$ пф/см).

Для того, чтобы использование прибора на ПАВ, обладающего потерями, не ухудшало коэффициент шума радиоэлектронного тракта, необходимо выполнение условия, следующего из формулы Фрииса:



$$K_{1P} > F, \quad (6)$$

где K_{1P} – номинальный коэффициент передачи по мощности входного усилителя, стоящего впереди пьезоплаты; F – коэффициент шума прибора на ПАВ с выходным усилителем. Для больших значений F требуются большие значения K_{1P} . Однако при фиксированном значении потребляемой мощности от источника питания, рост K_{1P} приводит к снижению уровня максимального входного сигнала, что снижает динамический диапазон приемного блока. Нелинейные искажения пропорциональны амплитуде входного сигнала и обратно пропорциональны току, протекающему через оконечные каскады входного усилителя. Минимальные нелинейные искажения в радиоэлектронном тракте будут иметь место в случае использования оптимизации по шумам ПАВ фильтра и выходного усилителя. Буферный каскад входного усилителя при этом должен иметь выходное сопротивление, равное сопротивлению источника сигнала оптимизированной структуры. Минимизация нелинейных искажений при фиксированном потреблении от источника питания достигается за счет обеспечения минимального коэффициента передачи входного усилителя согласно выражению (6).

Использование противозумовой коррекции в малошумящем транзисторном усилителе позволяет снизить шумы усилителя настолько, что спектральная плотность мощности шума ВШП в несколько раз превосходит значение спектраль-

ной плотности мощности шума собственного усилителя.

Минимально достижимый коэффициент шума пьезокристаллических устройств на ПАВ с двуправленными преобразователями соответствует величине 6–7 дБ. Однако при использовании таких устройств в радиоэлектронных системах совместно с серийно выпускаемыми усилителями, стыковка с которыми осуществляется без оптимизации, он может увеличиваться вплоть до 40 дБ и выше.

С помощью противозумовой коррекции, введения в усилитель дополнительного малошумящего каскада с включением транзистора с ОБ и выбора оптимального значения сопротивления источника сигнала достигнуто значение коэффициента шума пьезокристаллических устройств на ПАВ около 18 дБ без ухудшения всех остальных технических характеристик.

Оптимизация параметров пьезоплаты и выходного усилителя дает возможность дополнительного снижения коэффициента шума микросборок радиочастотных линий задержки и фильтров на ПАВ со встроенными транзисторными усилителями до 10–12 дБ. При этом рабочие характеристики устройств также полностью сохраняются.

Предложенный метод оптимизации по критерию максимального отношения сигнала к шуму возможно распространить на широкий класс устройств на ПАВ, что потребует лишь изменения нелинейных ограничений в задаче оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасарян, А.С. Устройства на поверхностных акустических волнах в системах и средствах связи [Текст] / А.С. Багдасарян // Инженерная микроэлектроника. – 2002. – Т. 71. – Вып. 8. – С.33–39.
2. Кочемасов, В.Н. Акустоэлектронные фурье-процессоры [Текст] / В.Н. Кочемасов, Е.В. Долбня, Н.В. Соболев. – М.: Радио и связь, 1987. – С.168.
3. Речицкий, В.И. Акустоэлектронные компоненты [Текст] / В.И. Речицкий. – М.: Радио и связь, 1987. – С. 193.
4. Орлов, В.С. Фильтры на поверхностных акустических волнах [Текст] / В.С. Орлов, В.С. Бондаренко. – М.: Радио и связь, 1984. – С. 272.
5. Груздев, А.В. Исследование шумовых свойств активных пьезокристаллических устройств на ПАВ [Текст] / А.В. Груздев, В.Д. Купцов, В.С. Усов // Техника средств связи. Сер. Общетеchnическая. – 1990. – Вып. 1. – С. 104–113.
6. Zeijl, Paul T.M. Noise and dynamic range optimization of SAW transversal filters [Текст] / Paul T.M. van Zeijl // IEEE trans. On ultrasonics, ferroelectrics and frequency control. – 1992. – Vol. 39. – № 4. – P. 519–524.
7. Валухов, В.П. Согласование фильтров на поверхностных акустических волнах в радиоэлектронных трактах [Текст] / В.П. Валухов, Ю.В. Иванов, В.Д. Купцов // Радиотехника. – 1998. – № 1. – С.82–87.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МИКРОЭЛЕКТРОННОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ КЛАССА Е С УЧЕТОМ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ

Усилитель мощности (УМ) – один из компонентов передатчика, предназначен для усиления мощности входного модулированного сигнала. УМ состоит из усилительного элемента и цепей согласования. Усилительный элемент, как правило, МОП-транзистор – усиливает сигнал за счет преобразования мощности источника питания. Цепи согласования согласуют усилительный элемент с источником сигнала и нагрузкой. В передатчике абонентской станции мобильной системы связи УМ должен обеспечивать требуемую мощность в нагрузке при заданном уровне нелинейных искажений и максимальном коэффициенте полезного действия (КПД) для увеличения времени работы устройства без дополнительной подзарядки.

Рабочие частоты передатчиков абонентских станций мобильных систем связи третьего поколения стандартов W-CDMA и MC-CDMA находятся в диапазоне 1,7–2,0 ГГц, а мощность передатчика составляет до 24 дБм [1]. Усилители мощности, изготовленные по МОП-технологии с минимальным разрешением 65 нм, с рабочими частотами до 2,0 ГГц и уровне выходной мощности до 30 дБм обладают коэффициентом полезного действия до 60 %. При этом усилитель занимает на кристалле площадь до 0,3 кв. мм [2]. Благодаря высокому КПД усилители мощности класса Е являются основным классом УМ, используемым в абонентских устройствах мобильных систем связи. В монографиях [3, 4] и периодической литературе [2, 5] расчет УМ класса Е сводится к вычислению номиналов элементов стоковой цепи. При этом расчет производится с учетом или без учета влияния выходной паразитной емкости МОП-транзистора и величины дроссельной индуктивности в цепи стока, однако, не учитываются аналогичные эффекты в цепи затвора. Это приводит к уменьшению уровня выходной мощности и КПД реальной схемы.

В данной работе предлагается методика расчета микроэлектронного усилителя мощности класса Е абонентской станции мобильной си-

стемы связи стандартов W-CDMA и MC-CDMA с учетом влияния паразитных емкостей МОП-транзистора и дроссельных индуктивностей как в стоковой цепи, так и в цепи затвора. Статья построена следующим образом: в главе 1 рассматриваются основные режимы работы усилителей мощности; классы моделей МОП-транзисторов и особенности применения модели BSIM3v3 на высоких частотах представлены в главе 2; в главе 3 обосновывается выбор согласующих цепей; функционирование и методика расчета УМ класса Е рассмотрены в главах 4 и 5 соответственно.

1. Режимы работы усилителей мощности

Режимы работы УМ подразделяются на линейный (режим А), квазилинейные (режимы АВ, В, С) и ключевые (режимы D, Е, F). Линейный и квазилинейные режимы различаются углом отсечки выходного тока усилительного элемента: в режиме А угол отсечки составляет 180 градусов, в режиме АВ – от 180 до 90, в режиме В – 90 градусов, а в режиме С – менее 90. К достоинствам линейных и квазилинейных режимов относится низкий уровень нелинейных искажений сигнала, который возрастает с уменьшением угла отсечки. Недостатком является постоянное рассеивание мощности на транзисторе, что приводит к значительному снижению КПД. Так, теоретически достижимый КПД в режиме А составляет 50 %, в режиме АВ – 50–78,5 %, в режиме В – 78,5 %. В режиме С теоретически достижимый КПД равен 100 %, однако такой результат достигается только при угле отсечки равном нулю, т. е. при отсутствии полезного сигнала на выходе усилителя.

Принцип работы ключевых усилителей мощности заключается в следующем: когда входной сигнал достигает определенного уровня, МОП-транзистор открывается (при этом ток через транзистор максимальный, а падение напряжения на нем близко к нулю) или запирается (при этом ток через транзистор близок к нулю, а падение напряжения максимально). В обоих случаях рассеи-



ваемая мощность близка к нулю. Таким образом, теоретически достижимый КПД равен 100 %, что является основным преимуществом ключевых режимов перед линейным и квазилинейными. Для данных режимов характерен высокий уровень нелинейных искажений. Как правило, для уменьшения уровня нелинейных искажений необходимо использовать фильтры.

В режиме D для преобразования сигнала к балансному виду используются трансформатор и дополнительный МОП-транзистор или пара комплементарных МОП-транзисторов. Каждый из транзисторов усиливает один полупериод входного сигнала, в результате в нагрузке после сложения формируется усиленный исходный сигнал. В режиме E для обеспечения условий работы вместо трансформатора и дополнительного транзистора используется шунтирующий конденсатор, что значительно упрощает изготовление и уменьшает размеры микросхемы. Шунтирующий конденсатор накапливает заряд за время, в течение которого транзистор открыт, и после запираания транзистора передает заряд в нагрузку. Недостатком УМ класса E является значительная величина пикового напряжения. Усилитель мощности, работающий в режиме F, состоит из транзистора и набора последовательных и параллельных фильтров. Фильтры пропускают спектральные составляющие тока и напряжения на частотах, кратных частоте входного сигнала, которые затем суммируются в нагрузке. Теоретически данный режим обеспечивает меньшее пиковое напряжение, по сравнению с режимом E. Однако теоретически достижимый КПД получается только при сложении всех четных спектральных компонент для тока и нечетных для напряжения, что существенно усложняет частотно-избирательную цепь. Перечисленные обстоятельства определяют широкое использование УМ класса E на практике в передатчиках мобильных систем связи.

2. Модель транзистора

МОП-транзистор является основным элементом УМ. Выделяют три группы моделей МОП-транзисторов [6]: областные модели (BSIM, MM9), модели, основанные на методе расчета характеристик транзистора через поверхностный потенциал (MM11, SP2001), гибридные модели (EKV). Областные модели описывают работу транзистора на линейном участке и в области насыщения вольт-амперной характеристики с помо-

щью отдельных уравнений на основе дрейфовой аппроксимации тока стока. Главное преимущество такого подхода в том, что уравнения, описывающие модель, являются явными функциями от приложенного напряжения. Недостатки заключаются в использовании приближенных выражений для вычисления тока стока и большом количестве дополнительных параметров. Модели, основанные на методе расчета характеристик транзистора через поверхностный потенциал, используют дрейфово-диффузионную аппроксимацию тока стока. Данные модели позволяют использовать одно выражение для точного расчета тока стока. Основными недостатками являются необходимость итерационных процедур для расчета основных потенциалов как функций приложенного напряжения, относительно сложная процедура составления модели и значительное время расчета. Гибридные модели объединяют в себе способы описания двух предыдущих моделей. Поверхностный потенциал на стороне истока обычно описывается аналитически, а потенциал на стороне стока аппроксимируется аналогично областным моделям.

Областная модель BSIM3v3 является наиболее полной и широко используемой моделью МОП-транзистора. Однако данная модель достоверна лишь на частотах до нескольких сотен мегагерц. На более высоких частотах МОП-транзистор следует рассматривать как распределенный элемент, что делает необходимым усовершенствование модели для учета следующих эффектов [7]: неквазистатического; распределенного сопротивления затвора; влияния подложки.

При медленном изменении напряжения на электродах транзистор работает в квазистатическом режиме, при этом ток, протекающий через канал, и свойства канала мало изменяются. Этот режим описывается стандартной BSIM3v3 моделью и используется для работы с постоянными и низкочастотными сигналами. Однако при быстром изменении напряжения транзистор выходит из квазистатического режима. Неквазистатический эффект может быть учтен использованием дополнительного резистора, подключенного к затвору, который вносит задержку изменения тока в канале [8]. Эффект влияния сопротивления затвора важен при работе с высокочастотными сигналами. Большое сопротивление приводит к увеличению теплового шума и уменьшению максимального коэффициента усиления. Сопротивление затвора

определяется геометрическими размерами транзистора (шириной затвора – W и длиной затвора – L) и удельным сопротивлением затвора $R_{\square}$. В случае субмикронных транзисторов преобладает влияние геометрических размеров. На высоких частотах сопротивление затвора моделируется как дискретный резистор:

$$Rg = \frac{1}{3} R_{\square} \frac{W}{L}.$$

Данное выражение справедливо для однозатворного транзистора. Для двухзатворного транзистора коэффициент $\frac{1}{3}$ заменяется на $\frac{1}{12}$. Для учета влияния эффектов подложки используется RC-цепочка, соединяющая истоковый, стоковый электроды и электрод подложки. Возможны несколько вариантов реализации этой цепи [8, 9] наиболее точная из которых описана в [9]. Таким образом, в качестве модели МОП-транзистора УМ наиболее целесообразно использовать модель BSIM3v3 с дополнительными элементами, учитывающими высокочастотные эффекты.

3. Цепи согласования

Согласование сопротивлений заключается в трансформации нагрузочного сопротивления в оптимальное рабочее сопротивление, которое в общем случае равно комплексно сопряженному сопротивлению источника сигнала. Поскольку коэффициент перекрытия по частоте, который определяется как отношение верхней (ω_v) и нижней (ω_n) частот рабочего диапазона, в стандартах WCDMA и MC-CDMA равен

$$K_f = \frac{\omega_v}{\omega_n} = \frac{2}{1,7} = 1,176$$

и не превышает 1,2, то следует считать полосу частот узкой и использовать цепи согласования (ЦС) из элементов с сосредоточенными параметрами. По количеству элементов согласующие цепи разделяются на схемы второго порядка (двухэлементные), третьего порядка (трехэлементные), четвертого порядка (четырёхэлементные).

Простейшими ЦС являются цепи второго порядка. К недостаткам данных цепей относится отсутствие возможности оптимального выбора номиналов элементов. Как следствие, полученные при расчете значения элементов могут не удовлетворять условиям физической реализуемости. Цепи согласования третьего порядка наиболее широко используются благодаря своей простоте и возможности оптимального выбора номиналов

элементов. Цепи согласования четвертого порядка обеспечивают точное согласование сопротивлений на двух различных частотах и обычно требуются для широкополосного согласования. Поскольку рассматриваемая полоса частот является узкой, то нет необходимости в использовании ЦС четвертого порядка. Таким образом, цепи согласования третьего порядка оптимальны с точки зрения количества элементов и возможности выбора номиналов. Известны четыре структуры цепей согласования третьего порядка: две схемы, содержащие одну индуктивность и два конденсатора, и две схемы, содержащие две индуктивности и один конденсатор. Поскольку планарные индуктивности занимают большую площадь на кристалле и обладают значительными потерями, целесообразно использовать ЦС с минимальным количеством индуктивностей. Таким образом, предполагается использовать ЦС третьего порядка с одним индуктивным элементом, представленную на рис. 1 а. Номиналы элементов данной цепи вычисляются как [10]

$$C_{\text{цс1}} = \frac{1}{\omega R_H \sqrt{R_T / R_H (1 + Q_{\text{цс}}^2) - 1}}, \quad (1)$$

$$C_{\text{цс2}} = \frac{Q_{\text{цс}} - \sqrt{R_T / R_H (1 + Q_{\text{цс}}^2) - 1}}{\omega R_T (1 + Q_{\text{цс}}^2)}, \quad (2)$$

$$L_{\text{цс}} = \frac{Q_{\text{цс}} R_T}{\omega}, \quad (3)$$

где R_T – входное или выходное сопротивление транзистора; R_H – внутреннее сопротивление источника сигнала или сопротивление нагрузки; $Q_{\text{цс}}$ – добротность выходного импеданса ЦС. Как следует из выражения (1), параметр $Q_{\text{цс}}$ должен удовлетворять условию:

$$Q_{\text{цс}} > \sqrt{\frac{R_H}{R_T} - 1}. \quad (4)$$

Для обеспечения максимальной полосы пропускания цепи согласования необходимо выбирать величину $Q_{\text{цс}}$, близкую к $\sqrt{R_H / R_T} - 1$. Минимальное значение $Q_{\text{цс}}$ определяется из условий физической реализуемости элементов.

4. Усилитель мощности класса Е

На рис. 1 б показана структурная схема усилителя мощности класса Е, которая включает [3]: транзистор, представленный в виде идеального ключа; шунтирующий конденсатор C_p ; сопро-

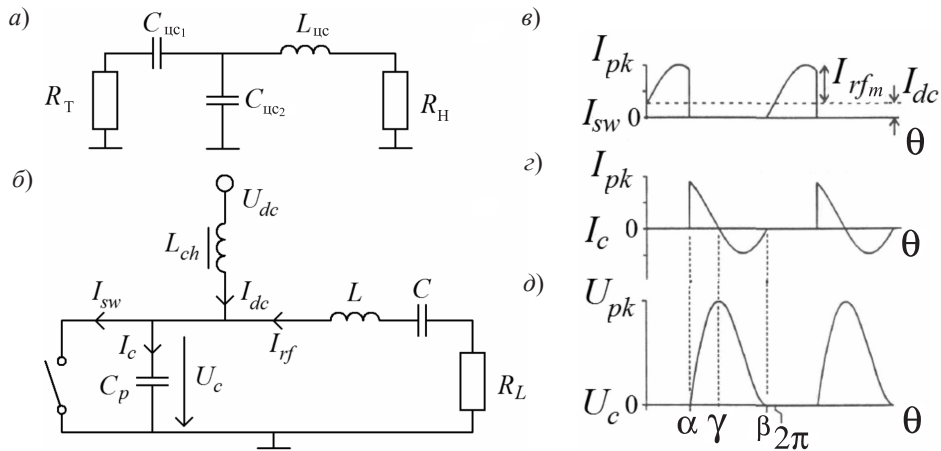


Рис. 1. Эквивалентная схема усилителя мощности класса Е, цепь согласования и зависимости токов и напряжений в усилителе от угла отсечки: а – цепь согласования третьего порядка с одним индуктивным элементом; б – схема усилителя мощности класса Е; в – ток через ключ; г – ток через конденсатор C_p ; д – напряжение на конденсаторе C_p

тивление нагрузки R_L ; последовательный колебательный LC -контур, который играет роль фильтра; дроссельную индуктивность L_{ch} , через которую подается постоянный ток I_{dc} . Токи, протекающие через ключ I_{sw} и через шунтирующий конденсатор I_c , представляют сумму постоянного тока I_{dc} и переменного тока I_{rf} RLC -цепи.

Рассмотрим один цикл работы УМ, который включает в себя одно отпирание и одно замыкание ключа. В течение цикла фаза выходного колебания θ изменяется в пределах $[0; 2\pi]$. Ток I_{sw} , протекающий через ключ, показан на рис. 1 в. Ток I_c , протекающий через конденсатор C_p , показан на рис. 1 г. Напряжение на конденсаторе C_p изображено на рис. 1 д. Когда ключ замкнут, ток протекает только через ключ, ток через конденсатор C_p и напряжение на конденсаторе равны нулю. В

момент времени, когда ключ отпирается ($\theta = \alpha$), ток начинает протекать через конденсатор C_p , напряжение на конденсаторе нарастает и достигает своего максимума U_{pk} при $\theta = \gamma$. Далее напряжение начинает падать, ток достигает минимума и при $\theta = \beta$ возвращается в нуль – ключ замыкается.

5. Методика расчета и моделирование усилителя мощности класса Е

Принципиальная схема УМ классе Е показана на рис. 2. Входной сигнал от источника V_1 с внутренним сопротивлением R_1 через входную трехэлементную цепь согласования $C_1C_2L_1$ поступает на МОП-транзистор T_1 , к которому подключен шунтирующий конденсатор C_4 . Выходной сигнал со стока МОП-транзистора через

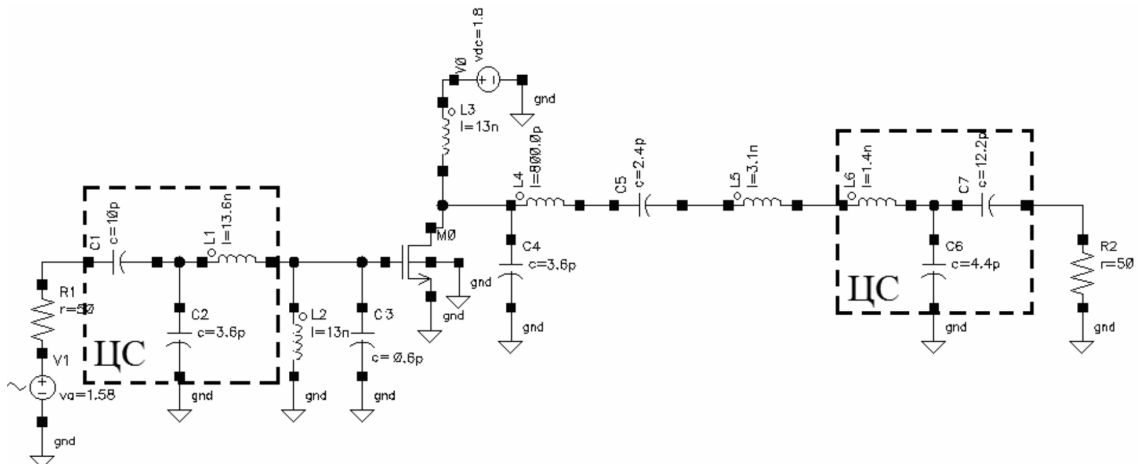


Рис. 2. Схема разработанного усилителя мощности

компенсирующую индуктивность L_4 , фильтр C_5L_5 и выходную трехэлементную цепь согласования $C_6C_7L_6$ поступает в нагрузку R_2 . Затвор транзистора заземлен по постоянному току через дроссельную индуктивность L_2 , влияние которой компенсируется конденсатором C_3 . Постоянный ток от источника питания V_0 подается через дроссельную индуктивность L_3 .

Для повышения точности расчета УМ класса Е в данной работе предлагается методика вычисления элементов УМ с учетом входной и выходной емкости МОП-транзистора и конечной величины дроссельных индуктивностей цепей затвора и стока. Для минимизации влияния дроссельных индуктивностей на параметры усилителя необходимо выбирать номиналы L_2 и L_3 максимально возможными. Как показало проведенное моделирование, влиянием индуктивности L_3 в цепи стока можно пренебречь при величине индуктивности более 10 нГн. Однако пренебречь влиянием индуктивности L_2 в цепи затвора нельзя даже при максимальных значениях индуктивности, допустимых для планарной реализации (как правило, 10–12 нГн) в выбранной технологии изготовления.

Исходными данными для расчета усилителя мощности класса Е являются: выходная мощность P_{rf} ; диапазон рабочих частот $\Delta\omega = \omega_b - \omega_n$; средняя частота диапазона ω , напряжение сток-исток U_{ds} , входной импеданс $Z_{вх} = R_{вх} + jX_{вх} = R_{вх} - j/(\omega C_{вх})$ и выходной импеданс $Z_{вых} = R_{вых} + jX_{вых} = R_{вых} - j/(\omega C_{вых})$ транзистора при заданном уровне входного сигнала; пиковый ток I_{pk} (см. рис. 1 в), равный $I_{pk} = I_{dc} + I_{rfm}$, где I_{rfm} – амплитуда переменного тока в RLC -цепи.

Порядок расчета усилителя мощности представляется следующим алгоритмом.

1. Рассчитать углы α и β по заданной выходной мощности P_{rf} , которые связаны соотношениями:

$$\sin(\beta) = \frac{\cos(\beta) - \cos(\alpha)}{\alpha - \beta},$$

$$P_{rf} = I_{pk} U_{dc} \frac{\sin(\beta)}{1 - \sin(\beta)}.$$

2. Определить токи I_{rfm} , I_{dc} :

$$I_{rfm} = \frac{I_{pk}}{1 + \varepsilon} \text{ и } I_{dc} = \frac{I_{pk}}{1 + \frac{1}{\varepsilon}},$$

где $\varepsilon = -\sin(\beta)$.

3. Определить величину шунтирующей емкости C_p :

$$C_p = \frac{I_{pk} u_{dc}(\alpha)}{\omega U_{dc}},$$

где $u_{dc}(\alpha) = \frac{1}{2\pi(1 + \varepsilon)} \left[\frac{1}{2} (\cos(\beta) + \cos(\alpha))(\beta - \alpha) - \sin(\beta) + \sin(\alpha) \right]$.

4. Вычислить величину шунтирующего конденсатора C_4 с учетом выходной паразитной емкости транзистора $C_{вых}$:

$$C_4 = C_p - C_{вых}.$$

5. Определить величину сопротивления, на которое должен быть нагружен УМ:

$$R_L = \frac{I_{pk} u_{ci}(\alpha)}{\omega C_p I_{rf}},$$

где $u_{ci}(\alpha) = \frac{1}{4\pi(1 + \varepsilon)} [3\cos(2\beta) + \cos(2\alpha) - \cos(\beta + \alpha) - 2\sin(2\beta)(a - b)]$.

6. Определить номинал индуктивности, компенсирующей фазовый сдвиг напряжения:

$$L_4 = \frac{I_{pk} u_{cq}(\alpha)}{\omega^2 C_p I_{rf}},$$

где $u_{cq}(\alpha) = \frac{\varepsilon}{\pi(1 + \varepsilon)} \left[\sin(\beta)(\beta - \alpha) + (\cos(\beta) - \cos(\alpha)) \right] + \frac{1}{4} [4\cos(\alpha)(\sin(\beta) - \sin(\alpha)) + 2(\alpha - \beta) - \sin(2\beta) + \sin(2\alpha)]$.

7. Рассчитать элементы фильтра L_5C_5 :

$$L_5 = \frac{R_L Q}{\omega}, \quad C_5 = \frac{1}{\omega^2 L_5}.$$

где $Q = \frac{\omega}{\Delta\omega}$ – добротность контура.

8. Задать номиналы дроссельных индуктивностей $L = L_2 = L_3$ и рассчитать номинал конденсатора C_3 , компенсирующего влияние индуктивности в цепи затвора:

$$C_3 = \frac{1}{\omega^2 L}.$$

9. Задать добротность выходного импеданса ЦС $Q_{ЦС}$, исходя из выражения (4) и условий физической реализуемости элементов.

10. Рассчитать входную и выходную цепи согласования. Номиналы конденсаторов входной (C_1, C_2) и выходной (C_6, C_7) цепей согласования, а также индуктивность выходной цепи L_6 вычисляются согласно выражениям (1)–(3). Номи-

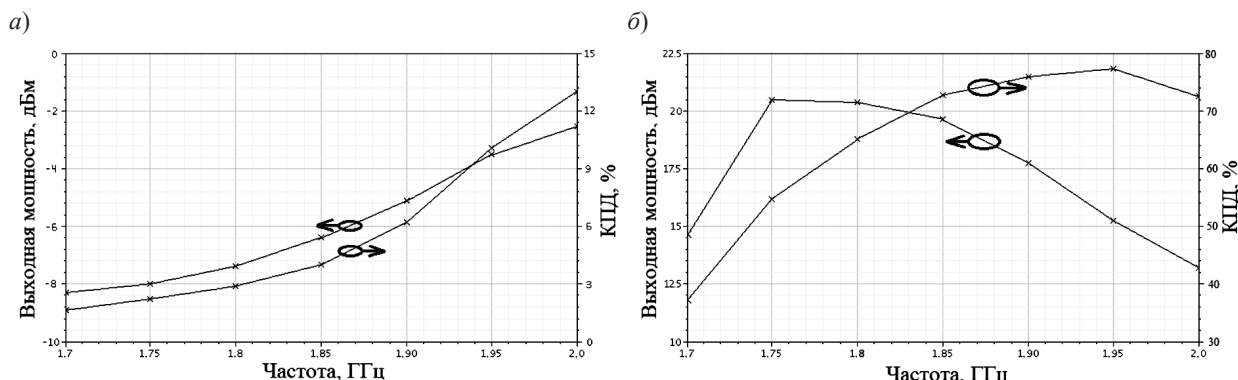


Рис. 3. Зависимости выходной мощности и КПД добавленной мощности разработанного усилителя мощности от частоты: а – без учета влияния $C_{вх}$ и L_2 ; б – с учетом влияния $C_{вх}$ и L_2

нал индуктивности L_1 определяется из условия компенсации входной паразитной емкости МОП-транзистора $C_{вх}$:

$$L_1 = \frac{1}{\omega^2 C_{вх}} + \frac{Q_{сц} R_{вх}}{\omega}.$$

Согласно данной методике проведен расчет УМ со следующими исходными данными: выходная мощность $P_{эф} = 21$ дБм; диапазон рабочих частот $\Delta\omega = 2\pi \cdot (2,0 - 1,7)$ рад·ГГц; средняя частота диапазона $\omega = 2\pi \cdot 1,85$ рад·ГГц; напряжение сток-исток $U_{ds} = 1,8$ В; входной импеданс $Z_{вх} = 8,40 - 139,24j$ Ом и выходной импеданс $Z_{вых} = 4,97 - 123,43j$ Ом транзистора при воздействии на него входного сигнала мощностью $P_{вх} = 8$ дБм; пиковый ток $I_{pk} = 280$ мА. Полученные номиналы элементов приведены на рис. 2. Моделирование рассчитанного усилителя мощности осуществлялось в программном пакете Cadence Virtuoso v. 5.141. Использована BSIM3v3 модель МОП-транзистора компании UMC с разрешением 180 нм с дополнительными реактивными элементами, учитывающими высокочастотные эффекты, рассмотренные в главе 2. Внутреннее сопротивление источника сигнала и нагрузки моделируются сопротивлениями номиналом 50 Ом.

На рис. 3 представлены зависимости уровня выходной мощности и КПД добавленной мощности от частоты для двух случаев расчета УМ: по известной методике [3, 4] (рис. 3 а),

т. е. без учета влияния паразитной емкости МОП-транзистора $C_{вх}$ и дроссельной индуктивности L_2 в цепи затвора, и по методике, предлагаемой в данной работе (рис. 3 б).

Как видно из рисунков, паразитные эффекты в цепи затвора приводят к снижению уровня максимальной выходной мощности и КПД: с 21 дБм до -2 дБм и с 76 % до 13 % соответственно.

В статье представлена методика расчета усилителя мощности класса Е с учетом влияния паразитных емкостей транзистора и конечной величины дроссельных индуктивностей в цепях стока и затвора. Согласно приведенной методике с использованием параметров МОП-технологии с разрешением 180 нм рассчитан микросистемный усилитель мощности абонентской станции мобильной системы связи стандарта WCDMA со следующими характеристиками: диапазон рабочих частот 1,7–2,0 ГГц, уровень выходной мощности 21 дБм, КПД 76 %, что соответствует результатам, полученным в [2], но для параметров МОП-технологии с разрешением 65 нм. Таким образом, можно утверждать, что применение предложенной методики с использованием параметров МОП-технологии с разрешением менее 180 нм позволит существенно улучшить известные ранее результаты.

Исследования выполнены в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gilmor, R. Practical RF Circuit Design for Modern Wireless Systems [Текст] / R. Gilmor, L. Besser // Vol. II: Active Circuits and Systems. –Artech House, 2003. –Р. 569.
2. Heijden, M.P. A 65 nm CMOS 30 dBm Class-E RF Power Amplifier With 60 % PAE and 40 % PAE at 16 dB Back-Off [Текст] / M.P. Heijden [et al.] // IEEE J. Solid-State Circuits. –May 2009. –Vol. 44. –№ 5. –Р. 1372–1379.

3. **Cripps, S.** RF Power Amplifiers for Wireless Communications [Текст] / S. Cripps. –Artech House, 1999. –P. 376
4. **Grebennikov, A.** Switchmode RF power amplifiers [Текст] / A. Grebennikov, N.O. Sokal. –Newnes, 2007. –P. 443.
5. **You, F.** Efficiency Enhancement of Class-E Power Amplifiers at Low Drain Voltage [Текст] / F. You [et al.] // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. –Apr. 2010. –Vol.58. –№ 4. –P. 788–794.
6. **Angelov, G.** MOSFET Models at the Edge of 100-nm Sizes [Текст] / G. Angelov [et al.] // Proc. 24th International Conf. on Microelectronics. –16–19 May 2004. –Vol.1. –P. 295–298.
7. **Борисов, С.А.** Методика построения малосигнальной высокочастотной модели МОП-транзистора [Текст] / С.А. Борисов, А.С. Коротков // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. –2010. –Т.53. –№ 7. –С. 21–30.
8. **Tin, S.F.** A simple subcircuit extension of the BSIM3v3 model for CMOS RF design [Текст] / S.F. Tin, A.A. Osman [et al.] // IEEE J. Solid-State Circuits. –Apr. 2000. –Vol.35. –№ 4. –P. 612–624.
9. **Liu, W.** RF MOSFET modeling accounting for distributed substrate and channel resistances with emphasis on the BSIM3v3 SPICE model [Текст] / W. Liu [et al.] // Dig. Tech. Papers IEDM-97. –Dec. 1997. –P. 309–312.
10. **Albulet, M.** RF power amplifiers [Текст] / M. Albulet. –Noble, 2001. –P. 366.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫМ КРОВООБРАЩЕНИЕМ С АДАПТАЦИЕЙ ПО ФОРМЕ ПЕРФУЗИОННОГО ИМПУЛЬСА

Системы вспомогательного искусственного кровообращения (СИКО) – одно из перспективных направлений развития медицинской техники. Один из видов таких систем – системы контрпульсации, задача которых состоит в понижении давления в желудочках сердца за счет внедрения в общий круг кровообращения дополнительного управляемого устройства, частично берущего на себя насосную функцию сердца [1, 2], а также – системы вено-артериальной перфузии, основная цель которой – разгрузка сердца по объему перекачиваемой крови [1, 2] (рис. 1).

Важной задачей является кардиосинхронизация – обеспечение соответствия между импульсом крови, поступающей в артерию из сердца, и импульсом, генерируемым перфузионным модулем, как по фазе, так и по форме [3]. Для осуществления регулируемой циркуляции крови применен мехатронный модуль, в котором осу-

ществлена интеграция энергетических и информационных процессов, обеспечивающий требуемый режим ввода и циркуляции в организм пациента. Их взаимодействие в автоматизированных СИКО обеспечивается центральным компьютером по совокупности исходных, биологически обоснованных и текущих данных о параметрах рабочих жидкостей (РЖ, чаще всего такой жидкостью является кровь): средних расходах, давлениях, температурах и т. д. Перфузионный роликовый насос конструктивно встроен в модуль, содержащий локальную систему микроконтроллерного управления электродвигателем, связанным механически через редуктор с роликовым механизмом (РМ), воздействующим на полимерную магистраль (ПМ) для импульсного продвижения РЖ [4]. Среднее давление (расход) РЖ контролируется датчиками давления (расхода) и может корректироваться центральным компьютером.

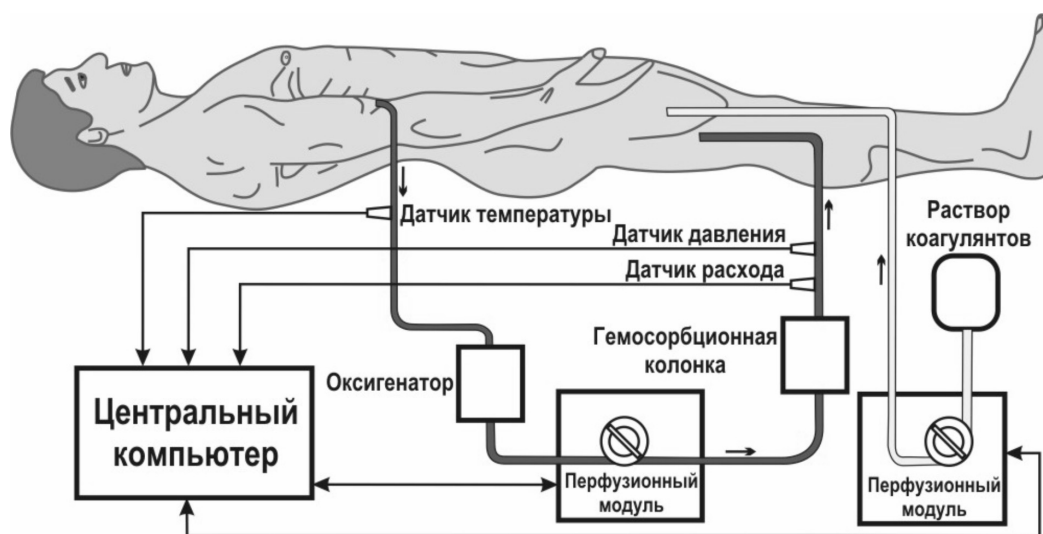


Рис.1. Система вспомогательного искусственного кровообращения

Описание системы управления

СИКО широко используются с конца 50-х гг. XX в. и постоянно совершенствуются [1]. Недостатком в работе существующих перфузионных модулей в СИКО является неуправляемость формы импульса РЖ по мгновенному (во времени t) давлению $P(t)$ и дополнительное его искажение по мере прохождения через упругую ПМ. В целом имеется отклонение импульса от желательного $Pz(t)$ для естественного режима работы организма. Этот недостаток компенсируется простотой управления перфузионным модулем по объему подачи РЖ в организм (реализован принцип управления разомкнутыми системами [5]) и надежностью работы механики. Последняя требует высокоточного изготовления и специализированных разработок роликового механизма (РМ) с кинематикой, обеспечивающей хоть приближенную форму импульсов РЖ к желаемой, что существенно удорожает изделие. Наблюдается тенденция нерентабельности производства отечественной перфузионной техники и вытеснение ее зарубежной [6]. На данный момент в России такое производство практически не осуществляется, а наиболее популярными на отечественном рынке аппаратами искусственного кровообращения являются продукты немецкой фирмы Maquet (например, полнофункциональные аппараты ИК – Jostra HL 20 и HL 30) [7], а также Sarns, Stockert

и др. Эти аппараты, несмотря на их несомненные достоинства и высокую технологичность, дорогостоящие и, кроме того, не приспособлены к использованию в мобильных госпиталях.

Предлагается управление модулем осуществлять с помощью адаптивной следящей системы [5] с использованием быстродействующих датчиков мгновенного давления (расхода) на выходе ПМ и вводом получаемой информации X_{oc} в микроконтроллер (МК) по локальной обратной связи (рис. 2) с программным обеспечением устойчивости и качества слежения. Такой подход снизит требования к жесткости характеристик звена «роликовый механизм – полимерная магистраль» и точности изготовления, упростит и устранил разновидности конструкций роликовых насосов. Используются возможности современной встроенной вычислительной техники с алгоритмами управления, учитывающими математику динамики всех взаимодействующих узлов модуля.

Ниже описаны принципы разработки корректирующего алгоритма для данной системы. Технологически требуемый импульс мгновенного давления $Pz(t)$ с периодом T вводится в память микроконтроллера с допустимой погрешностью. Его удобно задать в виде транспонированной матрицы $Mz(1)$ с координатами по строкам $t(c)$ и Pz (мм рт.ст.):

$$Mz = \begin{pmatrix} 0 & 0,08 & 0,14 & 0,18 & 0,23 & 0,30 & 0,36 & 0,38 & 0,42 & 0,46 & 0,52 & 0,6 & 1 \\ 0 & 24 & 125 & 152 & 149 & 67 & 67 & 90 & 93 & 52 & 19 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T. \quad (1)$$

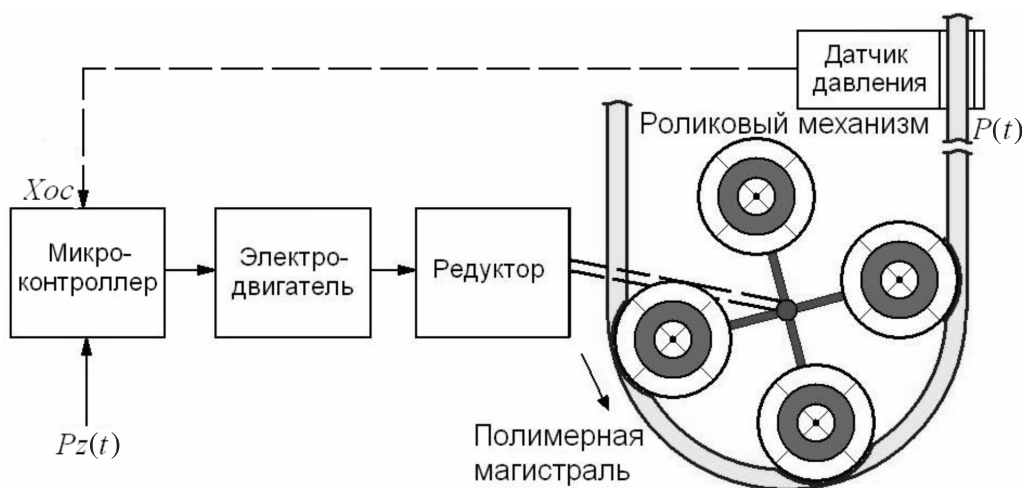


Рис. 2. Функциональная схема мехатронного перфузионного модуля СИКО

Далее заданный импульс восстанавливается методом сплайновой интерполяции из этих координат. Сплайновая интерполяция выбрана как наиболее простой из методов, полностью удовлетворяющий поставленной задаче: линейные методы не дают удовлетворительного результата с точки зрения качества сглаживания результирующей функции. Путем сравнения заданного импульса Pz и выходного P , искаженного ПМ, получается рассогласование ϵ , на основании которого с помощью корректирующего оператора $Wk(s)$ формируется воздействие на исходную нескорректированную структуру с передаточной функцией $Wnc(s)$ для воспроизведения требуемого импульса с допустимой погрешностью. Исходная структура включает в себя исполнительный механизм, в данном случае, перфузионный роликовый насос с управляющей схемой [8], который при задании выходного параметра (импульса) должен выполнять интегрирующие функции; объекта управления-ПМ, представляющей [8] колебательное звено (ξ – колебательность, $T0$ – инерционность) с «чистым» запаздыванием τ и безынерционный датчик контроля. В целом передаточная функция имеет вид:

$$Wnc(s) = \frac{Q}{s \cdot (T0^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T0 \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau \cdot s}, \quad (2)$$

где Q – добротность, при синтезе определяемая максимальной скоростью изменения входного сигнала $Pz'_{max}(t)$ (рис. 3) и абсолютной допустимой погрешностью ($\epsilon_{доп}$) слежения за входным сигналом, т. е. $Q = Pz'_{max}(t) / \epsilon_{доп}$.

Для получения корректирующего алгоритма $Wk(\omega)$ использован типовой подход [5] с рассмотрением на логарифмической частотной плоскости разности $Lk(\omega)$ желаемой $Lsk(\omega)$ и нескорректированной $L(\omega)$ амплитудных характеристик разомкнутой САУ, где соответственно фазовые характеристики нескорректированной $\phi(\omega)$ и скорректированной $\phi sk(\omega)$ систем для определения устойчивости при параметрах $T0 = 0,3$ с, $\xi = 0,2$, $\tau = 0,4$ с и $Q = 250$. ЛАЧХ нескорректированной системы с приближенным учетом «чистого» запаздывания имеет вид (3):

$$L(\omega) \approx 20Lg \times \left[\frac{Q}{j\omega} \cdot \frac{1}{T0^2(j\omega)^2 + 2\xi T0(j\omega) + 1} \cdot \frac{1}{\tau(j\omega) + 1} \right], \quad (3)$$

$$\phi(\omega) \approx \arg[Wnc(\omega)].$$

Синтез желаемой характеристики при требованиях заданного быстродействия $tp \ll T$, перерегулировании Kp , частоты среза ωc и границ среднечастотного участка (ωL , ωH) может быть выполнен в виде ломаной $Lsk(\omega)$ при условиях:

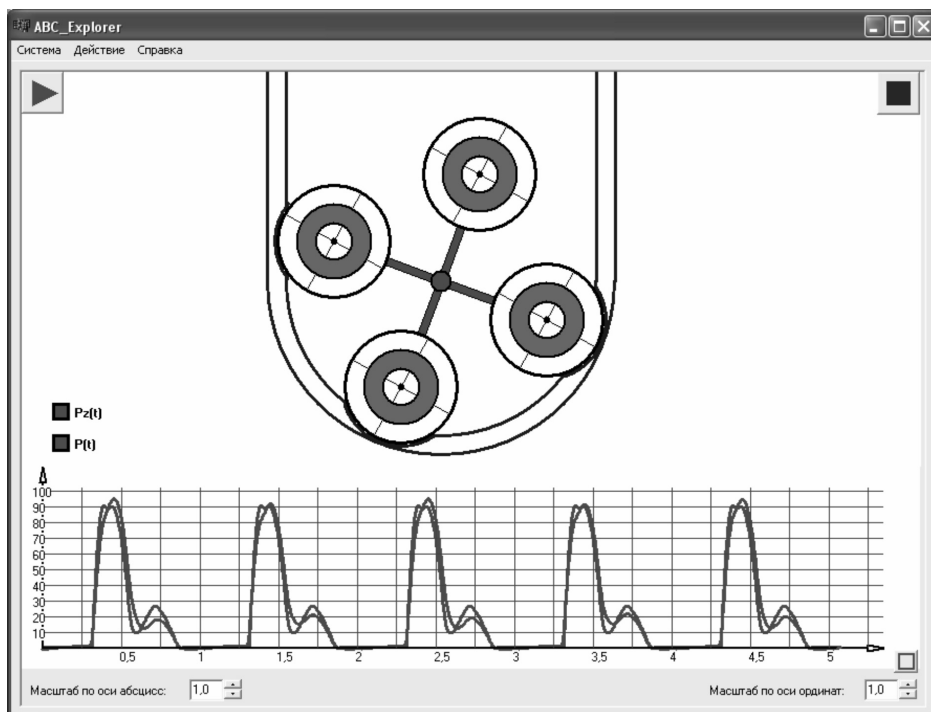


Рис. 3. Математическое моделирование работы алгоритма адаптации

$$\omega_c \approx \frac{\pi \cdot Kp}{tp}, \quad \omega_L \approx \frac{\omega_c}{3}, \quad \omega_H \approx 3 \cdot \omega_c \quad (4)$$

и конкретных значениях $tp = 0,01$ с, $Kp = 1,8$, $T0 = 0,3$ с. Разностная характеристика $Lk(\omega)$ даст выражение (5) корректирующего звена:

$$Wk(s) = \frac{(T1s + 1)^4}{(TLs + 1) \cdot (THs + 1)^3}. \quad (5)$$

В контуре адаптации используются два параметра – $T1$ и TL , что обеспечит удерживание в точке экстремума показателю качества J . После осуществления синтеза модель процесса управления представится матрицей состояния по дискретным моментам $i = 0..N$ с временным шагом Δt и номерами циклов адаптации j :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{j,i+1} \\ x1_{j,i+1} \\ x2_{j,i+1} \\ x3_{j,i+1} \\ x4_{j,i+1} \\ x5_{j,i+1} \\ x6_{j,i+1} \\ x7_{j,i+1} \\ x8_{j,i+1} \\ x9_{j,i+1} \\ x10_{j,i+1} \\ x11_{j,i+1} \\ P_{j,i+1} \\ J_j \\ pTL_j \\ TL_{j+1,i} \\ pT1_j \\ T1_{j+1,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Pz_{j,i} - P_{j,i} \\ x1_{j,i} + \Delta t \cdot \varepsilon_{j,i} \cdot Q1 \\ x2_{j,i} + (x1_{j,i} - x2_{j,i}) \cdot \frac{\Delta t}{T0} \\ x3_{j,i} + (x2_{j,i} - x3_{j,i}) \cdot \frac{\Delta t}{T0} \\ x4_{j,i} + (x3_{j,i} - x4_{j,i}) \cdot \frac{\Delta t}{T0} \\ x4_{j,i} + if(i > 0, \frac{x4_{j,i} - x4_{j,i-1}}{\Delta t} \cdot T1_{j,i}, 0) \\ x5_{j,i} + if(i > 0, \frac{x5_{j,i} - x5_{j,i-1}}{\Delta t} \cdot T1_{j,i}, 0) \\ x6_{j,i} + if(i > 0, \frac{x6_{j,i} - x6_{j,i-1}}{\Delta t} \cdot T1_{j,i}, 0) \\ x7_{j,i} + if(i > 0, \frac{x7_{j,i} - x7_{j,i-1}}{\Delta t} \cdot T1_{j,i}, 0) \\ x9_{j,i} + (x8_{j,i} - x9_{j,i}) \cdot \frac{\Delta t}{TL_{j,i}} \\ x10_{j,i} + (x9_{j,i} - x10_{j,i}) \cdot \frac{\Delta t}{TH} \\ x11_{j,i} + (x10_{j,i} - x11_{j,i}) \cdot \frac{\Delta t}{TH} \\ P_{j,i} + (x11_{j,i} - P_{j,i}) \cdot \frac{\Delta t}{TH} \\ if \left[j > 0, if \left[i = N, \sum_{k=0}^N (i \cdot \Delta t)^2, J_{j-1} \right], J_0 \right] \\ if \left(j > 0, if \left(i = N \wedge TL_{j,i} \neq TL_{j-1,i}, \frac{J_j - J_{j-1}}{TL_{j,i} - TL_{j-1,i}}, pTL_{j-1} \right), pTL_0 \right) \\ if \left(j > 0, if \left(i = N, TL_{j-1,i} + \Delta TL \cdot pTL_j \cdot KL, TL_{j-1,i} \right), TL_{0,i} \right) \\ if \left(j > 0, if \left(i = N \wedge T1_{j,i} \neq T1_{j-1,i}, \frac{J_j - J_{j-1}}{T1_{j,i} - T1_{j-1,i}}, pT1_{j-1} \right), pT1_0 \right) \\ f \left(j > 0, if \left(i = N, T1_{j-1,i} + \Delta T1 \cdot pT1_j \cdot K1, T1_{j-1,i} \right), T1_{0,i} \right) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Работа алгоритма адаптации проверялась в рамках построенной математической модели с

помощью пакета MathCad. Кроме того, в рамках исследований было разработана компьютерная



модель – демонстрационная программа [9], позволяющая более эффективно и наглядно визуализировать работу алгоритма при любом заданном импульсе. Результаты представлены на рис. 3.

Реализация подобной схемы управления позволит существенно снизить требования к классу точности систем роликовых перфузионных насосов, используемых в системах искусственного

кровообращения. Как следствие, появится возможность существенного удешевления этой техники. Предполагается, что эти факторы позволят получить возможность дальнейшего развития систем вспомогательного кровообращения в мобильных и полумобильных вариантах. Дальнейшие практические исследования должны прояснить возможности системы, а также ограничения по ее применению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шумаков, В.И.** Искусственное сердце и вспомогательное кровообращение [Текст] / В.И. Шумаков, В.Е. Толпекин, Д.В. Шумаков. – М.: Янус-К, 2003.
2. **Аграненко, В.А.** Принципы трансфузионной медицины [Текст] / В.А. Аграненко // Вестник службы крови России. – 1998. – № 2. – С. 5–8.
3. **Salisbury, P.** Philosophy of assist circulation. Mechanical devices to assist the failing heart [Текст] / P. Salisbury // National Academy of science. – Washington D.C., 1966.
4. **Кириченко, В.В.** Мехатронные перфузионные системы [Текст] / В.В. Кириченко, К.Ю. Сенчик, В.Б. Митренин [и др.] // Мехатроника и робототехника (МиР-2007): Тр. Междунар. науч.-тех. конгресса. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. – С. 85–90.
5. **Юревич, Е.И.** Теория автоматического управления [Текст] / Е.И. Юревич. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008.
6. **Кудрявцев, Ю.С.** К вопросу о состоянии парка медицинского оборудования в государственных учреждениях здравоохранения Санкт-Петербурга и финансировании его закупок из городского бюджета в сравнении с данными по другим регионам РФ [Текст] / Ю.С. Кудрявцев // Вестник Северо-Западного регионального отделения Академии медико-технических наук. – 2003. – № 7. – С. 69–70.
7. Официальный сайт Maquet Продуктов насосной сердечной хирургии [Электронный ресурс] = Maquet official site. On-pump cardiac surgery products : предоставляет информацию об аппаратах искусственного кровообращения, производимых компанией – Режим доступа : <http://www.maquet.com/productPage.aspx?m1=112599774495&m2=0&productGroupID=121118652068&divisionID=-99&languageID=1>
8. **Кириченко, В.В.** Исследование динамических характеристик полимерной магистрали как звена автоматизированной системы искусственного кровообращения [Текст] / В.В. Кириченко, В.Б. Митренин, А.В. Кузнецов [и др.] // Тр. науч.-практ. X конф. Актуальные проблемы защиты и безопасности. – СПб.: НПО специальных материалов. – 2007. – Т.5. – С. 247–253.
9. **Митренин, В.Б.** Расчетно-анимационная программа анализа динамики перфузионных насосов [Текст] / В.Б. Митренин, А.В. Полянский, Д.В. Эйсмонт // Матер. IV Всерос. науч.-техн. конф. 21.02.2006. – Вологда: ВоГТУ, 2006. – С. 238–241.

УДК 517.93, 518:512.3

Н.В. Абрамов, Р.Г. Мухарлямов, Н.В. Мотовилов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЧАПЛЫГИНА

Моделирование механических систем, на которые наложены голономные и неголономные связи, приводит к построению уравнений динамики с неопределенными множителями [1]. Выражения множителей Лагранжа обычно определяются из условия равенства нулю производных от уравнений связей. Подстановка их в уравнения динамики

приводит к системе дифференциальных уравнений, численное решение которой оказывается неустойчивым по отношению к уравнениям связей. Замена уравнений связей уравнениями программных связей с соответствующими уравнениями возмущений связей позволяет построить разностные схемы решения уравнений движений, не связан-

ные с накоплением погрешностей численного интегрирования. В статье предложен метод построения уравнений неголономных связей, отражающих требуемые свойства движения системы, и метод составления уравнений динамики неголономных систем с программными связями. Приведено решение задачи управления движением двухколесной тележки из произвольной точки плоскости в начало координат с обходом препятствия.

Уравнения динамики систем Чаплыгина с программными связями. Рассмотрим механическую систему, положение которой определяется обобщенными координатами $q_1, \dots, q_n$ и на которую наложены неголономные связи, заданные однородными линейными относительно обобщенных скоростей $\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n$ уравнениями:

$$A(q)\dot{q} = 0, \quad (1.1)$$

$$A = (a_{ij}), a_{ij} = a_{ij}(q_1, \dots, q_p), i = 1, \dots, n-p.$$

Представим систему уравнений (1.1) в виде суммы:

$$A^{(1)}\dot{q}^{(1)} + A^{(2)}\dot{q}^{(2)} = 0, \quad (1.2)$$

$$A^{(1)} = (a_{ij}), j = 1, \dots, p, \dot{q}^{(1)} = (\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_p),$$

$$A^{(2)} = (a_{ij}), j = p+1, \dots, n, \dot{q}^{(2)} = (\dot{q}_{p+1}, \dots, \dot{q}_n).$$

Полагая, что $\det A^{(2)} \neq 0$ и обобщенные скорости $\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_p$ являются произвольными, определим решение системы (1.2) относительно $\dot{q}_{p+1}, \dots, \dot{q}_n$:

$$\dot{q}^{(2)} = B(q)\dot{q}^{(1)}. \quad (1.3)$$

Далее, будем считать, что коэффициенты $b_{hk}(q)$ в правой части равенства (1.4) зависят только от соответствующих координат $q_1, \dots, q_p$. Тогда уравнения связей (1.1) можно представить в виде:

$$\dot{q}_h = \sum_{k=1}^p b_{hk}(q_1, \dots, q_p)\dot{q}_k, h = p+1, \dots, n. \quad (1.4)$$

Голономные связи, наложенные на механическую систему, будем считать склерономными. Тогда кинетическая энергия системы определяется квадратичной формой относительно обобщенных скоростей:

$$2T = \sum_{i,j=1}^n a_{ij}\dot{q}_i\dot{q}_j. \quad (1.5)$$

Если наряду с коэффициентами b_{hk} уравнений неголономных связей (1.4) коэффициенты a_{ij} квадратичной формы (1.5) также зависят только от обобщенных координат $q_1, \dots, q_p$, то механи-

ческая система является системой Чаплыгина [2]. Уравнения динамики системы Чаплыгина составляют замкнутую систему p уравнений относительно независимых координат $q_1, \dots, q_p$:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T^*}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T^*}{\partial q_k} + \sum_{h=p+1}^n \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_h} \left(\sum_{l=1}^p \left(\frac{\partial b_{hl}}{\partial q_k} - \frac{\partial b_{hk}}{\partial q_l} \right) \dot{q}_l \right) = Q_k + R_k, \quad (1.6)$$

$$k = 1, \dots, p.$$

Следуя С.А. Чаплыгину, под T^* будем понимать выражение кинетической энергии, полученное заменой обобщенных скоростей $\dot{q}_h$ в выражении (1.5) правыми частями уравнения связей (1.4):

$$2T^* = \sum_{i,j=1}^p a_{ij}^* \dot{q}_i \dot{q}_j, \quad (1.7)$$

$$a_{ij}^* = a_{ij} + 2 \sum_{h=p+1}^n a_{ih} b_{hk} + \sum_{h,l=p+1}^n a_{hl} b_{hi} b_{lj}.$$

Ввиду того, что кинетическая энергия T является положительной функцией, матрица A^* квадратичной формы T^* также является положительно определенной, и ее определитель отличен от нуля.

Функции Q_k в правых частях уравнений (1.6) определяют обобщенные активные силы. Функции R_k в зависимости от природы связей соответствуют либо реакциям связей, ограничивающих перемещения точек системы, либо управляющим силам, призванным обеспечить выполнение уравнений дополнительно заданных связей (серво-связей). Будем считать, что силы Q_k и R_k также зависят только от координат $q_1, \dots, q_n$.

Определение реакций программных связей. Пусть на обобщенные координаты $q_1, \dots, q_p$ скорости $\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_p$ механической системы наложены дополнительные связи, определяемые уравнениями

$$\omega_\mu(q_1, \dots, q_p) = \alpha_\mu, \mu = 1, \dots, m,$$

$$\omega_v(q_1, \dots, q_p, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_p) = \alpha_v, \quad (2.1)$$

$$v = m+1, \dots, r < p,$$

правые части которых удовлетворяют уравнениям возмущений связей

$$\ddot{\alpha}_\mu = a_\mu(\dot{\alpha}, \alpha', \alpha, q, \dot{q}), \mu = 1, \dots, m,$$

$$\dot{\alpha}_v = a_v(\dot{\alpha}, \alpha', \alpha, q, \dot{q}), v = m+1, \dots, r, \quad (2.2)$$

$$\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m), \alpha' = (\alpha_{m+1}, \dots, \alpha_r).$$



Системы уравнений (2.1) и (2.2) представляют собой уравнения программных связей (2.1) и уравнения возмущений связей (2.2). Правые части уравнений системы (2.2) составляются так, чтобы тривиальное решение $\alpha_p = 0$, $p = 1, \dots, r$ было асимптотически устойчиво. В [4] показано, что, полагая

$$\alpha_p = \sum_{\mu=1}^m p_{p\mu} \alpha_\mu + \sum_{\mu=1}^m p_{p,m+\mu} \dot{\alpha}_\mu + \sum_{k=1}^{r-m} p_{p,2m+k} \dot{\alpha}_k, \quad p = 1, \dots, r,$$

можно определить ограничения, накладываемые на коэффициенты $p_{p\gamma}$, $\gamma = 1, \dots, m + r$, обеспечивающие выполнение необходимой точности $|\alpha_\gamma| \leq \varepsilon$ соблюдения уравнений связей при численном решении уравнений динамики системы в обобщенных координатах.

Рассмотрим задачу определения сил R_k , обеспечивающих выполнение уравнений программных связей (2.1) и уравнений возмущений связей (2.2). Представим уравнения (1.6) в виде, разрешенном относительно старших производных:

$$\ddot{q}_i + \sum_{j,k=1}^p a_i^{jk} \dot{q}_j \dot{q}_k = \sum_{j=1}^p a_i^{ij} (Q_j + R_j). \quad (2.3)$$

Функции a_i^{jk} аналогичны символам Кристоффеля второго рода в уравнениях Лагранжа.

Если программные связи (2.1) полагать идеальными, то силы R_k определяются через множители Лагранжа $\lambda_1, \dots, \lambda_r$, составляющие вектор λ :

$$R = F^T \lambda, \quad R = (R_1, \dots, R_p), \quad (2.4)$$

$$F = (f_{ij}), \quad f_{ij} = \frac{\partial \omega_\mu}{\partial q_j}, \quad \mu = 1, \dots, m, \\ f_{vj} = \frac{\partial \omega_v}{\partial \dot{q}_j}, \quad v = m+1, \dots, r, \quad j = 1, \dots, p.$$

Вектор неопределенных множителей Лагранжа $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_r)$ определяется исключением вектора $\ddot{q}$ из системы уравнений (2.3), записанной в векторном виде, и учетом равенства (2.4):

$$\ddot{q} + \dot{q}^T G \dot{q} = (A^*)^{-1} (Q + F^T \lambda), \quad (2.5) \\ G = (a_i^{jk}), \quad i, j, k = 1, \dots, p$$

и векторных уравнений

$$\begin{cases} \omega_q \ddot{q} + \dot{q}^T \omega_{q^T q} \dot{q} = a(\dot{\alpha}, \alpha', \alpha, q, \dot{q}), \\ \omega'_q \ddot{q} + \omega'_q \dot{q} = a(\dot{\alpha}, \alpha', \alpha, q, \dot{q}), \end{cases} \quad (2.6)$$

полученных дифференцированием выражений (2.1),

$$\omega_q = (f_{ij}), \quad \omega'_q = (f_{vj}),$$

$$\omega_{q^T q} = (\omega_i^{jk}), \quad \omega_i^{jk} = \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial q_j \partial q_k}, \\ \omega'_q = (\omega_j^v), \quad \omega_j^v = \frac{\partial \omega_v}{\partial q_j}.$$

Перепишем уравнения (2.6) в виде

$$F \ddot{q} + w = b, \quad (2.7) \\ F = \begin{pmatrix} \omega_q \\ \omega'_q \end{pmatrix}, \quad w = \begin{pmatrix} \dot{q}^T \omega_{q^T q} \dot{q} \\ \omega'_q \dot{q} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} a \\ a' \end{pmatrix}.$$

Подстановка выражения $\ddot{q}$ из (2.5) в (2.7) приводит к уравнению для определения вектора λ :

$$S \lambda = b + F(\dot{q}^T G \dot{q}) - F(A^*)^{-1} Q - w, \\ S = F(A^*)^{-1} F^T.$$

Предполагая, что $\det S \neq 0$, находим

$$\lambda = S^{-1} (b + F(\dot{q}^T G \dot{q}) - (A^*)^{-1} Q - w).$$

Отметим один частный случай, когда $Q \equiv 0$ и функции ω_v линейны относительно обобщенных скоростей:

$$\omega_v = \sum_{j=1}^p \omega_{vj}(q_1, \dots, q_p) \dot{q}_j, \quad v = m+1, \dots, r. \quad (2.8)$$

Тогда элементы матрицы F зависят только от координат $q_1, \dots, q_p$. Полагая $b \equiv 0$ и учитывая, что $\omega'_q \dot{q} = (\gamma_{m+1}, \dots, \gamma_r)$, $\gamma_v = \sum_{i,j=1}^p \frac{\partial \omega_{vj}}{\partial q_i} \dot{q}_i \dot{q}_j$,

$$\lambda = S^{-1} (F(\dot{q}^T G \dot{q}) - w), \quad w = \begin{pmatrix} \dot{q}^T f_{q^T q} \dot{q} \\ \dot{q}^T R_q \dot{q} \end{pmatrix}, \quad \text{получаем выражение}$$

$$\lambda = S^{-1} (F(\dot{q}^T G \dot{q}) - (\dot{q}^T \Gamma \dot{q})), \quad (2.9)$$

$$\Gamma = (\gamma_{1,ij}, \dots, \gamma_{r,ij}), \quad \gamma_{\mu,ij} = \frac{\partial^2 \omega_{\mu j}}{\partial q_i \partial q_j}, \quad \mu = 1, \dots, m,$$

$$\gamma_{v,ij} = \frac{\partial^2 \omega_v}{\partial q_i \partial q_j}, \quad v = m+1, \dots, r.$$

Так как сила R_k имеет структуру $u = F^T \lambda$, то оказывается справедливым следующее утверждение.

Теорема 1. Если уравнения неголономных программных связей (2.8) линейны относительно обобщенных скоростей и внешние силы отсутствуют: $Q \equiv 0$, то управление программным движением неголономной системы осуществляется обобщенной силой, представляющей квадратичную форму относительно обобщенных скоростей с коэффициентами, зависящими от координат.

Построение уравнений неголономных связей. Для программирования движений управляе-

мых механических систем может быть эффективно использован метод построения динамических систем с заданными свойствами траекторий. Рассмотрим следующую задачу. Пусть требуется определить аналитические выражения управляющих воздействий, приложенных к механической системе для перемещения изображающей точки в пространстве состояний $q_1, \dots, q_n$ из произвольной точки M_0 в начало координат с обходом препятствий $P_i, i = 1, \dots, l$.

Для программирования соответствующего движения зададим s функций

$$f_i(x) = 0, i = 1, \dots, s, x = (x_1, \dots, x_N), \quad (3.1)$$

обладающих непрерывными частными производными по всем переменным $x_1, \dots, x_N$, определяющим состояние механической системы относительно базовой системы координат. Функции (3.1) определяют в некоторой области $G \in R_N$ поверхности $\Psi_i, i = 1, \dots, q$, ограничивающие области G_i , в которых содержатся препятствия P_i и точки $A_i, i = q+1, \dots, s$. Предположим, что $\sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_k} \right)^2 = 0$, если $f_i(x) = 0$ есть уравнение поверхности, и $\sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_k} \right)^2 \neq 0$, когда равенство $f_i(x) = 0$ выполняется в отдельной точке A_i . Тогда можно построить множество систем дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = v(x), \quad (3.2)$$

для которых поверхности Ψ_i и точки A_i будут, соответственно, интегральными поверхностями и особыми точками.

Будем считать, что дифференциальное уравнение (3.2) имеет единственное решение, удовлетворяющее заданным начальным условиям $x(t_0) = x^0$. Тогда траектория изображающей точки, соответствующей его решению $x = x(t)$, $x(t_0) = x^0, f_i(x^0) \neq 0$, не может пересечь ни одну поверхность Ψ_i . Если начало координат является точкой притяжения системы (3.2), то изображающая точка придет к ней, минуя все препятствия $P_i, i = 1, \dots, l$.

Выразим значения координат $x_1, \dots, x_N$ системы через обобщенные координаты $q_j, j = 1, \dots, n$: $x_k = x_k(q_1, \dots, q_n), k = 1, \dots, N$. Определив производные $\dot{x}_k = \sum_{j=1}^n \frac{\partial x_k}{\partial q_j} \dot{q}_j$ через $q_j, \dot{q}_j$, систему дифференциальных уравнений (3.2) можно пред-

ставить как уравнения линейных неголономных связей $B(q)\dot{q} + b(q) = 0, B = (b_{kj}), b = (b_k), b_{kj} = \frac{\partial x_k}{\partial q_j}, b_k = -v_k(x(q))$, наложенных на механическую систему.

Покажем решение задачи построения системы (3.2) на двумерной плоскости [3]. Пусть $f(x, y) = f_0 f_1 \dots f_p f_{p+1} \dots f_q f_{q+1} \dots f_r f_{r+1} \dots f_s f_{s+1}$, где

$$\begin{aligned} f_0 &\equiv 1, f_i = (u_i^2 + v_i^2 - r_i^2), i = 1, \dots, q, \\ r_i &= 0, i = 1, \dots, p, r_i \neq 0, i = p+1, \dots, q, \\ u_i &= a_{i1}x + b_{i1}y + c_{i1}, v_i = a_{i2}x + b_{i2}y + c_{i2}, \\ \Delta_i &= a_{i1}b_{i2} - a_{i2}b_{i1} \neq 0, i = 1, \dots, q, \\ f_j &= a_j x + b_j y + c_j, j = q+1, \dots, r, \\ f_k &= f_k(x, y), k = r+1, \dots, s, f_{s+1} \equiv 1. \end{aligned}$$

Уравнения $f_i(x, y) = 0$ при $i = 1, \dots, p$ равносильны уравнениям пары прямых $a_{i1}x + b_{i1}y + c_{i1} = 0, a_{i2}x + b_{i2}y + c_{i2} = 0$, определяющих в пересечении точку A_i ; при $i = p+1, \dots, q$ получаем эллипсы E_i и при $i = q+1, \dots, r$ — прямые L_i . Будем считать, что каждая прямая L_j пересекается по крайней мере с одной прямой L_m и не проходит через точки A_p , что E_i также не проходят через точки A_i . Равенства $f_k(x, y) = 0, k = r+1, \dots, s$ определяют кривые Ψ_k , которые не имеют общих точек с кривыми E_i и не проходят через точки A_i . Через точку A_{jm} пересечения прямых L_j и L_m не проходят другие прямые.

Множество систем дифференциальных уравнений, имеющих особые точки типа *фокус* или *центр* в точках A_p , предельные циклы E_p , особые точки типа *узел* или *седло* в точках A_{jm} и сепаратрисы Ψ_k , разделяющие области, заполненные траекториями разных типов, записывается в виде:

$$\begin{cases} \dot{x} = k(x, y) \sum_{l=1}^r \frac{1}{f_l(x, y)} \left(\alpha_l \frac{\partial f_l}{\partial x} + \beta_l \frac{\partial f_l}{\partial y} \right) - \\ - v(x, y) \sum_{l=1}^s \frac{1}{f_l(x, y)} \cdot \frac{\partial f_l}{\partial y}, \\ \dot{y} = k(x, y) \sum_{l=1}^r \frac{1}{f_l(x, y)} \left(\gamma_l \frac{\partial f_l}{\partial x} + \delta_l \frac{\partial f_l}{\partial y} \right) + \\ + v(x, y) \sum_{l=1}^s \frac{1}{f_l(x, y)} \cdot \frac{\partial f_l}{\partial x}, \end{cases} \quad (3.3)$$

$$k(x, y) = \Phi(x, y)f(x, y), v(x, y) = M(x, y)f(x, y),$$

$$\Phi(x, y) = F(x, y)f_{p+1} \dots f_q,$$

где $F = F(x, y), M = M(x, y)$ — произвольные не-



прерывные функции, отличные от нуля в рассматриваемой области G изменения переменных x, y . Коэффициенты $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ назначаются так, чтобы точки A_i, A_{jm} и кривые E_i были, соответственно, особыми точками заданного типа и устойчивыми или неустойчивыми предельными циклами.

Так, если $\alpha_j = \alpha_m = \delta_j = \delta_m = 0, \gamma_j = -\beta_j, \gamma_m = -\beta_m$, а β_j, β_m определяются из равенств

$$\begin{aligned} (M_{mj} - \beta_m \Phi_{mj}) \Delta_{mj} f_{mj} &= \lambda_{mj}, \\ (M_{jm} - \beta_j \Phi_{jm}) \Delta_{jm} f_{jm} &= \lambda_{jm}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где $\Delta_{mj} = a_m b_j - a_j b_m$, $M_{mj}, \Phi_{mj}, f_{mj}$ – соответственно значения функций $M = M(x, y)$, $\Phi(x, y) = F(x, y) f_{p+1} \dots f_q$ и произведения $f_1 \dots f_{j-1} f_{j+1} \dots f_{m-1} f_{m+1} \dots f_s$ в точке A_{jm} , то в точке A_{jm} будем иметь устойчивый (при $\lambda_{jm} < 0, \lambda_{mj} < 0$) или неустойчивый (при $\lambda_{jm} > 0, \lambda_{mj} > 0$) узел или седло (при $\lambda_{jm} \lambda_{mj} < 0$).

Для $j = 1, \dots, p$ величины $\alpha_j, \beta_j + \gamma_j, \delta_j$ определяются как решение системы линейных уравнений

$$\begin{cases} a_{j1}^2 \alpha_j + a_{j1} b_{j1} (\beta_j + \gamma_j) + b_{j1}^2 \delta_j = \frac{\lambda_j}{k_j}, \\ 2a_{j1} a_{j2} \alpha_j + (a_{j1} b_{j2} + a_{j2} b_{j1}) (\beta_j + \gamma_j) + \\ + 2b_{j1} b_{j2} \delta_j = 0, \\ a_{j2}^2 \alpha_j + a_{j2} b_{j2} (\beta_j + \gamma_j) + b_{j2}^2 \delta_j = \frac{\lambda_j}{k_j}, \end{cases} \quad (3.5)$$

где $k_j = \Phi(x_j, y_j) f_1(x_j, y_j) \dots f_{j-1}(x_j, y_j) f_{j+1} \times \times (x_j, y_j) \dots f_s(x_j, y_j)$ и λ_j – произвольная величина. Заметим, что определитель системы (3.5) равен $\Delta_j^3 \neq 0$ и решение ее единственно. В зависимости от знака λ_j система (3.3) имеет в точке A_j неустойчивый фокус ($\lambda_j > 0$), центр ($\lambda_j = 0$) или устойчивый фокус ($\lambda_j < 0$).

Если $j = p + 1, \dots, q$ и величины $\alpha_j, \beta_j + \gamma_j, \delta_j$ определены как решение системы (3.5), а величина λ_j выбрана так, что

$$\begin{aligned} \lambda_j p_j(x, y) + q_j(x, y) &\leq -\eta_j < 0 (\geq \eta_j > 0), \\ p_j(x, y) &= r_j^2 F(x, y) f_1 \dots f_p f_{p+1}^2 \dots f_{j-1}^2 f_{j+1}^2 \dots \\ &\dots f_q^2 f_{q+1} \dots f_s, \\ q_j(x, y) &= M(x, y) \sum_{l=1}^s \left(\frac{\partial f_l}{\partial x} \frac{\partial f_j}{\partial y} - \frac{\partial f_l}{\partial y} \frac{\partial f_j}{\partial x} \right) \times \\ &\times f_1 \dots f_{l-1} f_{l+1} \dots f_{j-1} f_{j+1} \dots f_{s+1}, \end{aligned}$$

то предельный цикл E_j будет асимптотически устойчивым ($\lambda_j < 0$), устойчивым ($\lambda_j = 0$) или

неустойчивым ($\lambda_j > 0$).

Управление движением двухколесной тележки. Рассмотрим задачу управления движением двухколесной тележки по шероховатой плоскости. Положение тележки на плоскости определяется координатами $q_1 = x, q_2 = y, q_3 = \theta, q_4 = \phi_1, q_5 = \phi_2$, где x и y – декартовы координаты точки M пересечения оси симметрии тележки с осью, на которые посажены колеса; θ – угол между осью симметрии и осью Ox на плоскости; ϕ_1 и ϕ_2 – углы поворотов, соответственно, правого и левого колес. Условие качения без проскальзывания приводит к уравнениям трех неголономных связей [5]:

$$\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta + b \dot{\theta} + a \dot{\phi}_1 = 0, \quad (4.1)$$

$$\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta - b \dot{\theta} + a \dot{\phi}_2 = 0, \quad (4.2)$$

$$\dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta = 0, \quad (4.3)$$

где a – радиус колес, b – длина полуоси.

Кинетическая энергия тележки определяется выражением [4]:

$$2T = m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + 2m_0 l \dot{\theta} (\dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta) + J \dot{\theta}^2 + C(\dot{\phi}_1^2 + \dot{\phi}_2^2), \quad (4.4)$$

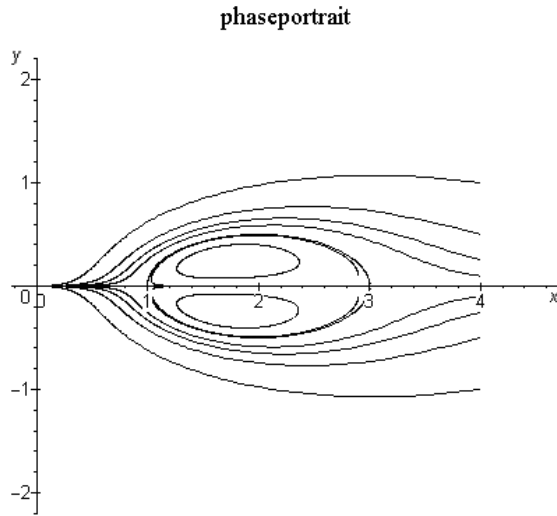
где $m = m_0 + 2m_1$ – масса всей системы; m_0 – масса кузова; m_1 – масса каждого колеса; l – расстояние от точки $M(x, y)$ до центра масс тележки; $J = m_0 k_0^2 + 2m_1 b^2 + 2A$ – момент инерции системы относительно вертикальной оси, проходящей через точку $M(x, y)$; k_0 – радиус инерции колеса кузова относительно той же вертикали; A – момент инерции колеса относительно диаметра; C – осевой момент инерции колеса.

Будем считать, что управление тележкой осуществляется моментами M_1 и M_2 , приложенными к колесам, и действующими так, чтобы точка M совершала переход из произвольной точки плоскости в начало координат с обходом препятствия, ограниченного кривой

$$(x - 2)^2 + 4y^2 - 1 = 0. \quad (4.5)$$

Требуемые движения тележки будут осуществляться, если координаты x, y и скорости $\dot{x}, \dot{y}$ точки M удовлетворяют системе дифференциальных уравнений [5]:

$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{1}{3} x((x - 2)^2 + 4y^2 - 1) - 4xy^2, \\ \dot{y} = -\frac{2}{3} y((x - 2)^2 + 4y^2 - 1) + xy(x - 2). \end{cases} \quad (4.6)$$



Фазовый портрет системы

Начало координат является особой точкой системы (4.6) типа *устойчивый узел*, кривая (4.5) соответствует ее сепаратрисе. Фазовый портрет системы (4.6) приведен на рисунке.

Будем считать, что управляющие моменты M_1 и M_2 зависят от координат x, y, θ . Тогда целесообразно за независимые обобщенные координаты принять $q_1 = x, q_2 = y, q_3 = \theta$. Уравнения (4.1), (4.2) негOLONOMНЫХ связей используем для исключения $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1 = b_{41}\dot{x} + b_{42}\dot{y} + b_{43}\dot{\theta}, \\ \dot{\phi}_2 = b_{51}\dot{x} + b_{52}\dot{y} + b_{53}\dot{\theta}. \end{cases} \quad (4.7)$$

$$b_{41} = b_{51} = -\frac{\cos \theta}{a}, \quad b_{42} = b_{52} = -\frac{\sin \theta}{a}, \\ b_{43} = -b_{53} = -\frac{b}{a}.$$

Приведенная кинетическая энергия системы определяется выражением:

$$2T^* = \sum_{i=1}^3 a_{ij}^* \dot{q}_i \dot{q}_j, \quad a_{ij}^* = a_{ji}^*, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (4.8)$$

$$a_{11}^* = m + 2d \cos^2 \theta, \quad d = \frac{C}{a^2}, \quad a_{12}^* = d \sin 2\theta,$$

$$a_{13}^* = -m_0 l \sin \theta, \quad a_{22}^* = m + 2d \sin^2 \theta,$$

$$a_{23}^* = -m_0 l \cos \theta, \quad a_{33}^* = J + 2db^2.$$

Полагая, что внешние силы отсутствуют: $F_x = F_y = F_\theta = 0$, составим уравнения Чаплыгина (1.6):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T^*}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T^*}{\partial q_i} +$$

$$+ \sum_{h=4}^5 \frac{\partial T^*}{\partial \dot{q}} \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial b_{hj}}{\partial q_i} - \frac{\partial b_{hi}}{\partial q_j} \right) \dot{q}_j = Q_i + R_i, \quad (4.9) \\ i = 1, 2, 3.$$

Силы Q_i соответствуют управляющим моментам M_1 и M_2 :

$$Q_1 = b_{41}M_1 + b_{51}M_2, \quad Q_2 = b_{42}M_1 + b_{52}M_2,$$

$$Q_3 = b_{43}M_1 + b_{53}M_2,$$

R_i – реакции связи (4.3). Для определения выражений M_1, M_2, R_i введем уравнения программных связей (2.1) с учетом равенств (4.3), (4.6):

$$f_1 \equiv X \sin \theta - Y \cos \theta = \alpha_0,$$

$$f_2 \equiv \dot{x} - X = \alpha_2, \quad f_3 \equiv \dot{y} - Y = \alpha_3. \quad (4.10)$$

$$X = -\frac{1}{3}x((x-2)^2 + 4y^2 - 1) - 4xy^2,$$

$$Y = -\frac{2}{3}y((x-2)^2 + 4y^2 - 1) + xy(x-2).$$

Уравнения возмущений связей (2.2) можно представить в виде

$$\tilde{\alpha} = \tilde{P}\tilde{\alpha}, \quad \tilde{\alpha} = (\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3), \quad \tilde{P} = (p_{kl}), \quad (4.11)$$

$$p_{kl} = \delta_{kl}, \quad k, l = 0, 1, 2, 3.$$

Полагая связи (4.10) идеальными, получим выражения для R_i :

$$R_1 = f_{11}\lambda, \quad R_2 = f_{12}\lambda, \quad R_3 = f_{13}\lambda,$$

$$f_{11} \equiv \frac{\partial f_1}{\partial x} = -\frac{1}{3} \left((3x^2 - 8x + 3 + 16y^2) \sin \theta + \right. \\ \left. + \frac{2}{3}(x+1)y \cos \theta \right),$$

$$f_{12} \equiv \frac{\partial f_1}{\partial x} = -\frac{32}{3}xy \sin \theta - \frac{1}{3}((x^2 + 2x - 6 - 24y^2) \times \\ \times \cos \theta),$$

$$f_{13} \equiv \frac{\partial f_1}{\partial z} = X \cos \theta + Y \sin \theta.$$

Представим систему (4.9) в развернутом виде:

$$\sum_{j=1}^3 a_{ij}^* \ddot{q}_j + a_i = \sum_{j=1}^3 d_{ij} u_j, \quad (4.12)$$

$$a_i = \sum_{j,k=1}^3 (\gamma_{i,jk} + \beta_{i,jk}) \dot{q}_j \dot{q}_k,$$

$$\gamma_{i,jk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial a_{ji}^*}{\partial q_k} + \frac{\partial a_{ki}^*}{\partial q_j} - \frac{\partial a_{jk}^*}{\partial q_i} \right),$$

$$\beta_{i,jk} = C \sum_{h=4}^5 b_{hk} \left(\frac{\partial b_{hj}}{\partial q_i} - \frac{\partial b_{hi}}{\partial q_j} \right),$$



$$u_1 = -\frac{M_1 + M_2}{a}, \quad u_2 = \frac{b}{a}(M_2 - M_1),$$

$$u_3 = -\frac{\lambda}{3}.$$

После проведения необходимых выкладок будем иметь следующие значения функций a_i и коэффициентов d_{ij} :

$$a_1 = 2d \dot{\theta} \cos^2 \theta - \dot{x} \dot{\theta} \sin 2\theta - m_0 l \dot{\theta}^2 \cos \theta,$$

$$a_2 = -d \dot{\theta} \sin 2\theta - 2d \dot{x} \dot{\theta} \sin^2 \theta - m_0 l \dot{\theta}^2 \sin \theta,$$

$$a_3 = 0,$$

$$d_{11} = \cos \theta, \quad d_{12} = 0, \quad d_{13} = -3f_{11},$$

$$d_{21} = -\sin \theta, \quad d_{22} = 0, \quad d_{23} = -3f_{12},$$

$$d_{31} = 0, \quad d_{32} = 1, \quad d_{33} = X \cos \theta - Y \sin \theta.$$

Запишем систему (4.12) в матричном виде:

$$A^* \ddot{q} + a = Du, \quad A^* = (a_{ij}^*), \quad D = (d_{ij}), \quad (4.13)$$

$$q = (q_1, q_2, q_3), \quad u = (u_1, u_2, u_3).$$

Остается определить вектор управляющих функций u . Для этого следует продифференцировать дважды функцию f_1 и по одному разу функции f_2, f_3 с учетом равенств (4.11). В результате получается следующее матричное равенство:

$$F \ddot{q} + w = P \tilde{f}, \quad (4.14)$$

$$F = (f_{ij}), \quad w = (w_1, w_2, w_3), \quad P = (p_{is}),$$

$$\tilde{f} = (f_1, \dot{f}_1, f_2, \dot{f}_2, f_3, \dot{f}_3),$$

$$i, j = 1, 2, 3, \quad s = 0, 1, 2, 3,$$

$$f_{21} = 1, \quad f_{22} = 0, \quad f_{23} = 0,$$

$$f_{31} = 1, \quad f_{32} = 0, \quad f_{33} = 0,$$

$$w_1 = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^3 w_{1,ij} \dot{q}_i \dot{q}_j,$$

$$w_{1,11} = -\frac{4}{3}((3x+4)\sin \theta + y \cos \theta),$$

$$w_{1,12} = -\frac{4}{3}((x+1)\cos \theta + 16y \sin \theta),$$

$$w_{1,13} = \frac{4}{3}(x+1)y \sin \theta - \frac{2}{3}(6x^2 - 8x + 3 + 16y^2) \times$$

$$\times \cos \theta,$$

$$w_{1,22} = -\frac{64}{3}x \sin \theta + 32y \cos \theta,$$

$$w_{1,23} = \frac{2}{3}(x^2 + 2x - 6 - 24y^2) \sin \theta - \frac{64}{3}xy \cos \theta,$$

$$w_{1,33} = \frac{2}{3}(x^2 - 4x + 3 + 16y^2)x \sin \theta + \frac{2}{3}(x^2 + 2x -$$

$$- 6y - 8y^2)y \cos \theta,$$

$$w_2 = \frac{1}{3}(3x^2 - 8x + 3 + 16y^2)\dot{x} + \frac{32}{3}xy\dot{y},$$

$$w_3 = -\frac{2}{3}(x+1)y\dot{x} - \frac{1}{3}(x^2 + 2x - 6 - 24y^2)\dot{y}.$$

Из (4.13), (4.14) следует выражение для вектора управления:

$$u = \left(F(A^*)^{-1} D \right)^{-1} \left(P \tilde{f} + F(A^*)^{-1} a - w \right).$$

Рассмотренные и смоделированные методы (метод построения уравнений неголономных связей, отражающих требуемые свойства движения системы, и метод составления уравнений динамики неголономных систем с программными связями) позволят легко просчитать их на любой компьютерной системе аналитических вычислений, в данном случае часть задачи была смоделирована в системе MathCAD, что позволит в дальнейшем использовать результаты в различных прикладных областях. Данные методы являются перспективными в развитии направления моделирования и решения задач управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 10-01-00381-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухарлямов, Р.Г. Об уравнениях кинематики и динамики несвободных механических систем [Текст] / Р.Г. Мухарлямов // Механика твердого тела. –2000. –Вып. 30. –НАН Украины, Донецк. –С. 68–79.
2. Чаплыгин, С.А. Исследования по динамике неголономных систем [Текст] / С.А. Чаплыгин. –М. –Л.: Гостехиздат, 1949. –112 с.
3. Мухарлямов, Р.Г. К обратным задачам ка-

чественной теории дифференциальных уравнений [Текст] / Р.Г. Мухарлямов // Дифференц. уравнения. –1967. –Т.3. –№ 10. –С. 1673–1681.

4. Мухарлямов, Р.Г. Уравнения движения механических систем [Текст] / Р.Г. Мухарлямов. –М.:Изд-во РУДН, 2001. –99 с.

5. Неймарк, Ю.И. Динамика неголономных систем [Текст] / Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. –М.:Наука, 1967. –519 с.

УДК 681.5.015

Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЯ С ЗАВИСИМЫМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ

Внедрение систем автоматического регулирования (САР) и учета тепловой энергии на базе современного энергоэффективного оборудования в системах теплоснабжения зданий помогло реконструировать элеваторные тепловые узлы, заменить физически и морально устаревшее оборудование и значительно повысить эффективность процесса отопления зданий. Алгоритмическое обеспечение существующих САР позволяет решать задачи программного управления подачей теплоносителя в систему отопления (СО) здания по суточному и недельному расписанию, в основном, с использованием ПИ-закона управления, а также погодной коррекции на основе задаваемого температурного графика [1, 2].

Рассмотрим процесс отопления здания с зависимым присоединением к тепловым сетям, применяемым как при централизованном, так и при децентрализованном теплоснабжении. На рис. 1 представлена схема системы отопления здания, в которой приняты следующие обозначения: M_2 , K_1 – исполнительный механизм с регулирующим клапаном; M_1 , H_1 – электропривод с циркуляционным насосом; СО – система отопления здания; KO_1 – обратный клапан. При этом обозначения параметров системы следующие: G_1 , T_{c1} – соответственно, расход и температура теплоносителя из теплосетей; T_{c2} – температура возвращаемого в теплосети теплоносителя; G_{co} , T_{co} – соответственно, расход и температура теплоносителя в подающем трубопроводе СО здания; $G_{ок}$ и T_o – соот-

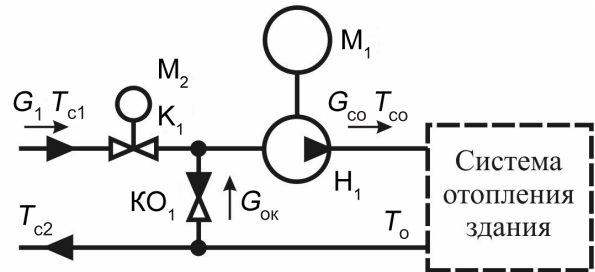


Рис. 1. Схема системы отопления с зависимым теплоснабжением

ветственно расход и температура теплоносителя участка смешивания.

Проведенные на базе учебного корпуса БГТУ имени В.Г. Шухова экспериментальные исследования особенностей процесса отопления зданий с САР температуры теплоносителя, подаваемого в систему отопления, с ПИ-законом регулирования, показали избыточное теплотребление во время смены режима работы САР, например, с ночного на дневной или наоборот (рис. 2).

Регулируемой переменной при данном способе управления является T_{co} , регулирующей переменной – G_1 . Избыточное теплотребление обусловлено существующим алгоритмом управления, оно возникает при значительном изменении задания (более чем на 20 °С), и чем больше рассогласование, тем выше мгновенное избыточное теплотребление. При получении нового задания, в соответствии с алгоритмом

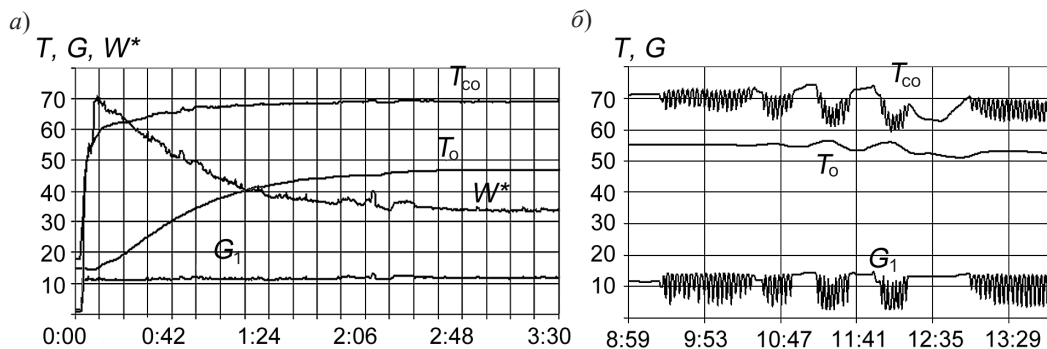


Рис. 2. Типовые переходные характеристики ОУ при ступенчатом (а) и периодическом (б) изменениях расхода G_1 (W^* – энергопотребление в отн. ед.; G_1 в м³/ч; T в °С; временная ось в ч:мин)



управления, контроллер стремится уменьшить рассогласование и воздействует на регулирующий клапан посредством исполнительного механизма, изменяя G_1 [3]. Вследствие малой инерционности участка смешивания теплоносителя происходит практически мгновенное изменение T_{co} , и пока температура теплоносителя в обратном трубопроводе не начнет увеличиваться после протекания его по системе ветвей и стояков СО, теплотребление будет выше, чем в установившемся режиме, о чем свидетельствует экстремум функции относительного теплотребления W^* (рис. 2 а). Для снижения избыточного теплотребления необходимо изменять алгоритм управления регулятора, который реализует программное обеспечение. Однако, как правило, программное обеспечение регуляторов температуры, входящих в состав САР не может быть обновлено или модернизировано, поскольку решает ограниченный, четко заданный круг задач [4]. Следовательно, для внедрения новых методов или алгоритмов управления процессом отопления необходимо использовать в качестве регуляторов свободно программируемые контроллеры с возможностью подключения различных модулей ввода/вывода.

Подытоживая результаты экспериментов, следует отметить следующее.

- Традиционный способ управления подачей теплоносителя в ИТП с использованием регулируемой переменной T_{co} является неэффективным при смене режимов теплотребления (см. рис. 2 а). Для снижения избыточного теплотребления необходимо ввести коррекцию в контур регулирования и учитывать T_o в качестве регулируемой переменной.

- По каналу регулирования « $T_{co} - T_o$ » исследуемый процесс обладает свойствами фильтра нижних частот. Например, средний градиент изменения температуры T_{co} от 18 °С до 60 °С составляет 0,25 °С/с. Максимальный градиент изменения температуры T_o составляет 0,01 °С/с. Кроме того, за счет значительной инерционности ветвей и стояков при протекании по ним теплоносителя зависимость $T_o(t)$ является гладкой даже при скачкообразных периодических изменениях G_1 (см. рис. 2 б).

Для оценки эффективности существующих и апробации новых методов и алгоритмов управления необходимо обладать адекватной математической моделью процесса отопления здания. В общем случае нестационарные процессы в системе отопления определяются на основе решения краевой задачи с уравнением теплопроводности с учетом вынужденной конвекции [5]. Сложность данной модели обусловлена необходимостью задания существующей конфигурации системы отопления с точным расположением ветвей, стояков и отопительных приборов, а также различных параметров, таких, как расход по ветвям и стоякам, теплотребление отопительных приборов и т. д., значения которых могут изменяться в процессе эксплуатации. Исходя из изложенного выше, целесообразно применять способ построения математической модели, основанный на использовании результатов экспериментальных исследований объекта.

В соответствии с экспериментами математическую модель процесса по каналу регулирования « $T_{co} - T_o$ » можно аппроксимировать апериодическим звеном второго порядка на основании экспоненциального вида типовых переходных характеристик исследуемого процесса (рис. 3 а) и свойств фильтра нижних частот (рис. 3 б).

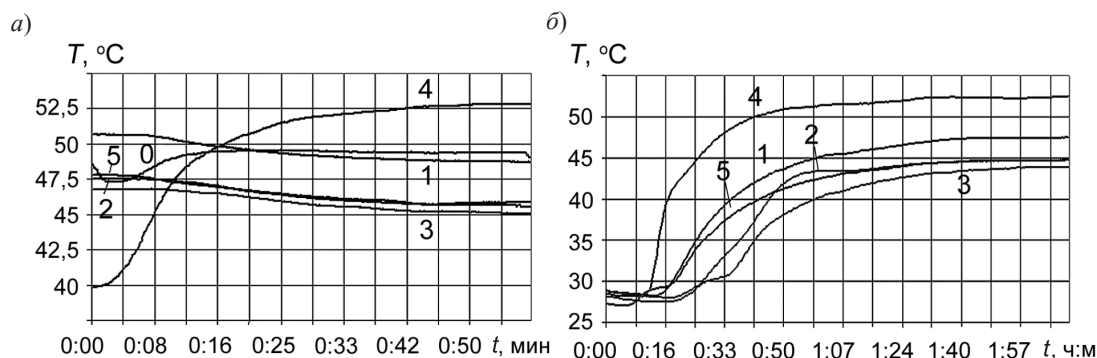


Рис. 3. Экспериментальные переходные характеристики ветвей СО:
а – при $G_4 = \text{var}$, $T_{co} = \text{const}$; б – при $G_i = \text{const}$, $T_{co} = \text{var}$
(1...5 – температура в обратных ветвях СО; 0 – температура обратного трубопровода)

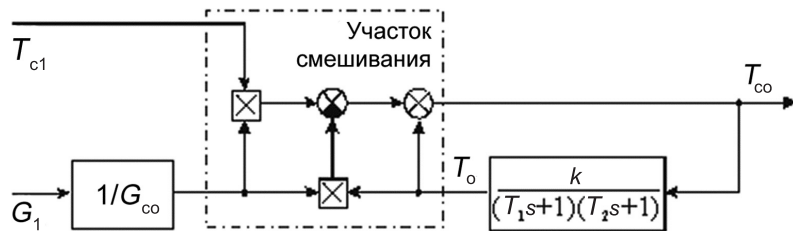


Рис. 4. Математическая модель процесса отопления здания в виде структурной схемы

На основе параметрической идентификации, с учетом законов сохранения массы и количества теплоты на базе принятых допущений разработана математическая модель процесса отопления здания (рис. 4), учитывающая нелинейный участок смешивания теплоносителей из подающего трубопровода теплосетей и обратного трубопровода системы отопления здания, расположенный после регулирующего клапана K_1 (см. рис. 1). В разработанной модели, в отличие от известных, T_o является одним из регулируемых параметров. Разработанная математическая модель позволяет исследовать алгоритмы управления, обеспечивающие энергосбережение.

С использованием обобщенного метода наименьших квадратов по ретроспективной информации с глубиной выборки 500 записей и временем квантования 158 с получена оценка параметров модели объекта управления (табл. 1) по каналу регулирования « $T_{co} - T_o$ ».

В качестве способа исследования разработанной математической модели целесообразно использовать метод фазовой плоскости. Процесс отопления здания определяется системой уравнений [6], включающей нелинейное алгебраическое уравнение, описывающее участок смешивания теплоносителя, уравнение неразрывности струи и линейное дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее СО здания:

$$\begin{cases} T_{c1}G_1(t) + T_o(t) \cdot (G_{co} - G_1(t)) = G_{co}T_{co}(t), \\ G_{ок}(t) + G_1(t) = G_{co}, \\ T_1T_2 \frac{d^2T_o}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dT_o}{dt} + T_o(t) = kT_{co}(t). \end{cases} \quad (1)$$

Динамические процессы в системе отопления описываются апериодическим звеном второго порядка, причем для СО здания выходная величина – $T_o(t)$, а входная, соответственно – $T_{co}(t)$.

Введем следующую замену переменных: $T_{co}(t) = x_1$, $T_o(t) = x_2$, $G_1(t) = U$. Тогда система уравнений в форме пространства состояний будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{dt} = x_3, \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{k-1}{T_1T_2}x_2 - \frac{(T_1+T_2)}{T_1T_2}x_3 + \frac{kT_{c1}}{T_1T_2G_{co}}U - \\ - \frac{k}{T_1T_2G_{co}}x_2U. \end{cases} \quad (2)$$

В аналитическом виде фазовый портрет движения исследуемой системы на базе дифференциальных уравнений (рис. 5) и уравнения особых линий – сепаратрис – в фазовой плоскости следующие:

$$\begin{cases} H = L_1(x_2, x_3, U) = x_3 - (x_2 + \frac{c}{a})(\frac{b + \sqrt{b^2 + 4a}}{2}), \\ V = L_2(x_2, x_3, U) = x_3 - (x_2 + \frac{c}{a})(\frac{b - \sqrt{b^2 + 4a}}{2}). \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{где } a = \frac{(k-1)G_{co} - kU}{T_1T_2G_{co}}, \quad b = -\frac{(T_1+T_2)}{T_1T_2}, \quad c = \frac{kT_{c1}U}{T_1T_2G_{co}}.$$

При анализе динамики исследуемой системы установлено, что существуют рациональные (квазиоптимальные) режимы движения изображающей точки (ИТ) по сепаратрисам H , V (см. уравнения 3), характеризующиеся определенным качеством управления. Переход в ква-

Таблица 1

Оценки параметров объекта управления

Параметр	T_1 , с	T_2 , с	k	Время квантования, с
Значение	766,00	1336,00	0,69	158,00

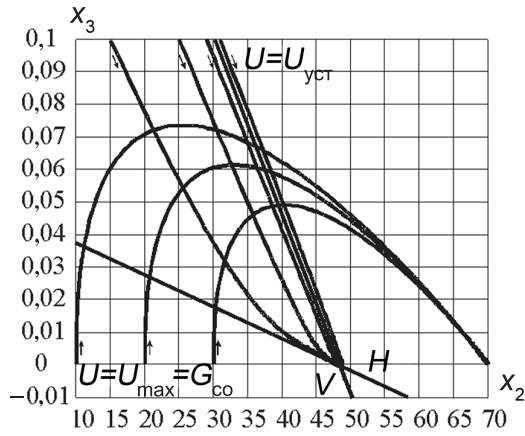


Рис. 5. Фазовые траектории исследуемой системы

зиоптимальный режим возможен при $x_3 \neq 0$; следовательно, чтобы ИТ двигалась по одной из сепаратрис необходимо в определенный момент времени осуществлять переключение управления U . При этом ИТ достигает конечного состояния за меньшее время или с меньшим энергопотреблением.

Энергоэффективное управление при стабили-

зации T_{co}^{def} будет иметь следующий вид:

$$U = \begin{cases} U_{\max}, L_{1,2}(x_2, x_3, U_{уст}) < 0 \\ U_{уст}, L_{1,2}(x_2, x_3, U_{уст}) > 0 \end{cases}, \varepsilon > 0; \quad (4)$$

$$U = \begin{cases} U_{\min}, L_{1,2}(x_2, x_3, U_{уст}) > 0 \\ U_{уст}, L_{1,2}(x_2, x_3, U_{уст}) < 0 \end{cases}, \varepsilon < 0,$$

где $\varepsilon = (T_{co}^{def} - T_{co})$ – рассогласование;

$U_{уст} = \frac{T_{co}^{def} G_{co} (1-k)}{(T_{cl} - T_{co}^{def})k}$ определяется из уравнения участка смешивания теплоносителя; $U_{\max} = G_{co}$; $U_{\min} = 0$.

Для оценки эффективности предложенного управления сравним его с существующим ПИ-регулированием по критерию теплотребления, которое оценим по следующей формуле:

$$Q^* = \frac{Q}{Q_{\min}} = \int_0^T (T_{cl} - x_2(t)) U(t) dt, \quad (5)$$

где $Q_{\min}$ – теплотребление при $U = U_{уст}$.

Результаты анализа эффективности приведены в табл. 2. Обозначения в таблице следующие:

Таблица 2

Результаты моделирования

$T_{co}^{def}, ^\circ C$	30	40	50	60	70	80	90
$U_{уст} / G_{co}$	0,11	0,17	0,23	0,31	0,41	0,55	0,73
$Q_1^*, \%$	0,91	4,75	5,79	5,51	4,55	3,20	1,64
$Q_2^*, \%$	1,25	1,56	1,51	1,63	1,65	1,50	1,26
$Q_3^*, \%$	2,51	6,98	8,89	8,37	7,22	5,34	2,99

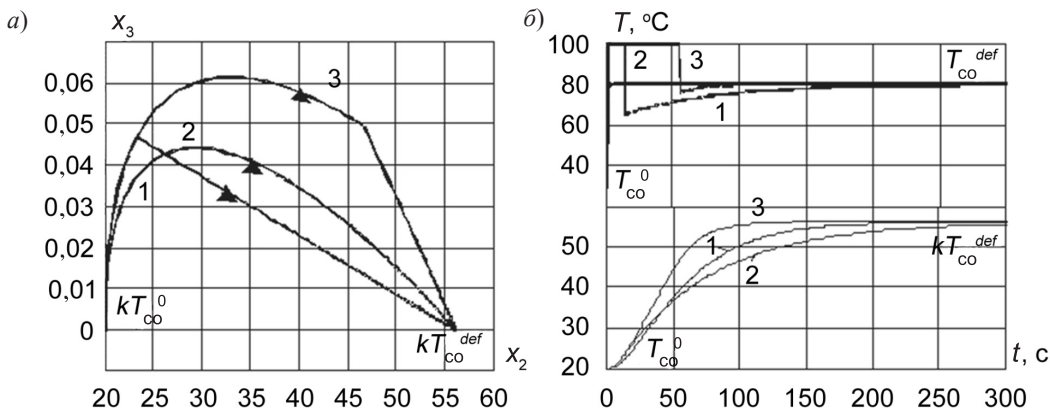


Рис. 6. Фазовые траектории (а) и переходные характеристики (б) при различных законах управления
1 – управление по ПИ-закону; 2 – по линии переключения H ; 3 – по линии переключения V

Q_1^* – управление по ПИ-закону, Q_2^* – управление по линии переключения H , Q_3^* – управление по линии переключения V . При моделировании использовались следующие значения параметров объекта управления: $k = 0,7$; $T_1 = 760$ с; $T_2 = 1300$ с; $T_{cl} = 100$ °С; $G_{co} = 15$ м³/ч.

На рис. 6 приведены графики при стабилизации на уровне 80 °С. Использование переключения по линии H позволяет достигнуть конечного состояния с меньшим энергопотреблением, по линии V – за меньшее время.

В результате моделирования установлено следующее.

Закон управления с коррекцией по T_o целесообразно использовать при значительных рассогласованиях ϵ задания с регулируемой переменной, например, при смене режимов теплоснабжения с дневного на ночной или – наоборот. При этом обеспечивается лучшее качество регулирования.

ПИ-закон управления целесообразно использовать при незначительных рассогласованиях ϵ задания с регулируемой величиной, например, в режиме погодной коррекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ливчак, В.И. За оптимальное сочетание автоматизации регулирования подачи и учета тепла [Текст] / В.И. Ливчак // Инженеры по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике (АВОК). –1998. –№ 4. –С. 36–38.
2. Потапенко, А.Н. Вопросы эффективности и особенности развития АСДУ распределенными энергосистемами зданий образовательного назначения [Текст] / А.Н. Потапенко, А.В. Белоусов, Е.А. Потапенко // Энергоэффективность: Опыт, проблемы, решения. –2003. –Вып. 3. –С. 58–67.
3. Электронные регуляторы и электрические средства управления: Каталог. RC.08.E1.50. [Текст]. –М.: ООО Данфосс, 2007.
4. Сергеев, С.Ф. Автоматизация систем теплоснабжения с использованием регулирующего оборудования фирмы «Данфосс» [Текст] / С.Ф. Сергеев, С.И. Смирнов, Л.Д. Зуев // Энергосбережение. –2000. –№ 3. –С. 31–32.
5. Алифанов, О.М. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: Учеб. пособие [Текст] / О.М. Алифанов, П.Н. Вабищевич, В.В. Михайлов [и др.]. –М.: Логос, 2001. –400 с.
6. Потапенко, А.Н. Автоматизированное управление процессом централизованного теплоснабжения распределенного комплекса зданий с учетом моделирования этих процессов [Текст] / А.Н. Потапенко, Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев // Изв. вузов. Проблемы энергетики. –2007. –№ 7–8. –С. 120–134.

УДК 517.958:5

А.Н. Фирсов

О СВОЙСТВАХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ «МЯГКИХ» ПОТЕНЦИАЛОВ

Поведение решений уравнения Больцмана

$$f_{t=0} = f(x, u) \quad F|_{t=0} = F_0 \quad (1)$$

при больших значениях времени рассматривается в большинстве серьезных исследований этого объекта. Фактически, еще Больцман высказывал соображения о возможности быстрой релаксации произвольной начальной функции распределения к равновесной. Такого вывода придерживаются и сейчас многие физики, хотя используемые ими доказательства весьма далеки от математического совершенства. Впервые серьезный анализ этих вопросов был проведен Карлеманом еще

в 30-х гг. XX в., а затем лишь через 30 лет продолжен уже многими исследователями. Достаточно полный обзор полученных результатов содержится в [1, 2]. В интересующем нас аспекте суть их состоит в том, что для решения $F(x, u, t)$ задачи (1) справедливо неравенство вида

$$N(F - F_M) \leq C_0 p(t), \quad (2)$$

где N – подходящая норма в пространстве функций, зависящих от скорости u и радиус-вектора x (так что $N(F)$ – функция, зависящая от времени t); C_0 – постоянная, зависящая, вообще говоря, от начального распределения $F_0(x, u)$; $F_M = F_M(|u|)$ –



максвелловское распределение; поведение функций $p(t)$ существенно зависит, с одной стороны, от класса функциональных пространств, в которых ищется решение, а, с другой, — от свойств оператора столкновений $Q(F, F)$, характеризующихся предположениями о виде потенциала межмолекулярного взаимодействия.

Для «жестких» «обрезанных по углу» потенциалов $U \sim r^{-k}$, $k > 4$ задача исследовалась очень активно; основной результат состоит в том, что функция $p(t)$ в (2) стремится к нулю при бесконечном возрастании времени t либо как степенная, либо как экспонента в зависимости от степени гладкости по координатам начального распределения, ограниченности (или нет) пространственной области и скорости убывания $F_0(x, u)$ при $|u|, |x| \rightarrow \infty$. Представленные результаты хорошо известны [1–4].

Существенно беднее набор фактов, касающихся случая «мягких» (также обрезанных по углу) потенциалов $U \sim r^{-k}$, $2 < k < 4$. Здесь имеются результаты Кэшлиша [5], при получении которых полагалось, что, во-первых, имеет место ситуация так называемого «ящика Грэда» с зеркально отражающими стенками (т. е. рассматривается класс периодических по координатам решений), а, во-вторых, начальная функция распределения достаточно гладкая и разность $F - F_M$ экспоненциально быстро (по скорости) убывает; кроме того, речь идет лишь о слабом решении уравнения (1).

Поскольку далее мы будем рассматривать ситуации, близкие к равновесным, то, как обычно, вместо функции F используем $f = F_M^{-\frac{1}{2}}(F - F_M)$. Уравнение (1) перейдет в

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} = L(f) + v(|u|)\Gamma(f, f); \quad (3)$$

$$f_{t=0} = f(x, u)$$

(обозначения общепринятые: см., например, [1, 2]).

Результат (2) в терминах функции f имеет вид:

$$N(f) \leq N_1(f_0)p(t), \quad (4)$$

где N_1 — норма, в общем случае отличная от нормы N (свойства решения f , вообще говоря, ухудшаются по сравнению со свойствами начальной функции f_0 , см. упомянутую выше работу Кэшлиша), а $p(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Характерной особенностью всех результатов, о которых шла речь, является равномерная по начальному распределению эволюция решения к равновесной функции распределения; иными словами, «долго живущие» начальные распределения отсутствуют.

Для дальнейшего исследования введем следующее определение. Назовем абсолютной степенью неравновесности задачи Коши для уравнения (3) величину

$$\mu = \limsup_{T \rightarrow \infty} \inf_{f_0} \sup_{0 \leq t \leq T} [N(f) / N(f_0)],$$

где f есть решение задачи (3), соответствующее начальному распределению f_0 .

Результат (4) означает, следовательно, что $\mu = 0$.

Переход к «мягким» потенциалам и ослабление условий, налагаемых на f_0 , принципиально меняют картину асимптотического поведения решений уравнения (3).

Теорема. В случае обрезанных по углу степенных потенциалов межмолекулярного взаимодействия вида $U \sim r^{-k}$, $2 < k < 4$, для каждого $\varepsilon > 0$ и каждого $T > 0$ существует начальное распределение $f_0 \in L_2(x, u)$, такое, что для соответствующего решения $f(x, u, t)$ задачи (3) имеет место неравенство

$$\inf_{0 \leq t \leq T} [N(f) / N(f_0)] > 1 - \varepsilon.$$

Здесь $N(f)$ означает норму f в $L_2(x, u)$.

Таким образом, $\mu = 1$ и, следовательно, существуют «долго живущие» начальные возмущения.

Ядром доказательства этой теоремы являются свойства решений соответствующей линеаризованной задачи

$$\frac{\partial f}{\partial t} = A(f); \quad f_{t=0} = f(x, u), \quad (5)$$

где $A \equiv -u \frac{\partial}{\partial x} + L$; $L = K - v$; $v = v(|u|)$.

Лемма 1. Оператор A с областью определения

$$D(A) = \left\{ f(x, u, t) \left| f, u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \in L_2(x, u) \forall t > 0 \right. \right\}$$

порождает в $L_2(x, u)$ сжимающую полугруппу линейных ограниченных операторов $\{T(t), t > 0\}$ класса C_0 (терминология соответствует принятой в [7]).

Доказательство. Оператор $A = iu \frac{\partial}{\partial x}$ самосопряжен на $D(A_1) = D(A)$ и, следовательно [6, п. X.8], оператор iA_1 порождает сжимающую полугруппу класса C_0 . Так как в условиях теоремы оператор L оказывается ограниченным, самосопряженным, диссипативным, $D(L) \supset D(A)$ и

$$\|L(\varphi)\| \leq a \|iA_1(\varphi)\| + \|L\| \|\varphi\|; \quad \|\cdot\| = \int |\cdot|^2 dx du$$

для сколь угодно малого числа a , то, согласно лемме из п. X.8 книги [6], оператор $A = iA_1 + L$

порождает сжимающую полугруппу $\{T(t)\}$ класса C_0 , т. е. уравнение (5) с $f_0 \in D(A)$ имеет единственное решение $f \in D(A)$:

$$f = T(t)f_0; \|T(t)\| \leq 1. \quad (6)$$

Лемма доказана.

Лемма 2. $0 \in \sigma(A)$ – спектр оператора A .

Доказательство. Покажем, что $\lambda = 0$ является точкой существенного спектра оператора A , т. е. существует ограниченная некомпактная последовательность $f_n \in D(A)$, удовлетворяющая условию $\lim_{n \rightarrow \infty} (A - \lambda E)f_n = 0$.

Пусть $\varepsilon_n > 0$ и $\varepsilon_n \rightarrow 0$, монотонно убывая; пусть числа $\xi_n > 0$ таковы, что $v(\xi_n) = \varepsilon_n$ (такие ξ_n существуют в силу монотонного стремления к нулю частоты столкновений $v(|u|)$ при $|u| \rightarrow \infty$ для «мягких» потенциалов; в частности $\xi_n \rightarrow 0$, монотонно возрастают). Пусть далее Ω_n – ограниченная область в R_u^3 , находящаяся целиком вне сферы радиусом ξ_n с центром в начале координат и такая, что $\int_{\Omega_n} |u|^2 du \leq 1$.

Пусть теперь $\{v_n(u)\}$ – последовательность функций, финитных областях Ω_n в R_u^3 , с носителями, лежащими в соответствующих областях Ω_n , и ортонормированная в $L_2(u)$ (ортogonalности можно добиться, например, выбирая непересекающиеся области Ω_n). Положим далее

$$\omega_n(x) = 2^{-\frac{1}{2}} (\pi n)^{-\frac{3}{4}} \exp[-|x|^2 / (2n)].$$

Отметим, что v_n слабо сходится к нулю в $L_2(u)$, а

$$\int |W_n(x)|^2 dx = 1; \int \left| \frac{\partial \omega_n}{\partial x_i} \right|^2 dx \rightarrow 0$$

Положим, $f_n = v_n(u)\omega(x)$. Очевидно, $\{f_n\}$ – ортонормированная последовательность в $L_2(x, u)$.

Оценим

$$\|A(f_n)\| \leq \left\| v_n u \frac{\partial \omega_n}{\partial x} \right\| + \|v_n \omega_n\| + \|\omega_n K(v_n)\|,$$

где $\|\cdot\|$ – норма в $L_2(x, u)$. С учетом выбора функций v_n, ω_n областей Ω_n и чисел ε_n и ξ_n , получаем $\|A(f_n)\| \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$

Лемма доказана.

Следствие 1. $\|T(t)\| = 1$

Доказательство. По теореме 16.3.1. и лемме 16.3.2 из [7] имеем $\|T(t)\| \geq \sup_{\lambda \in \sigma(A)} |\exp(t\lambda)|$.

Но, согласно, лемме 2, $0 \in \sigma(A)$ и, следовательно, $\|T(t)\| \geq 1$. С другой стороны, по лемме 1, $\|T(t)\| \leq 1$, следовательно, $\|T(t)\| = 1$.

В силу (6) для линеаризованного уравнения (5) справедливо утверждение основной теоремы. Доказательство основной теоремы для нелинейного (но близкого к равновесию) случая опирается на технику, развитую в [3, 8], и установленные выше свойства решений уравнения (5).

З а м е ч а н и е. Для пространственно однородного линеаризованного уравнения формулировка основного результата несколько видоизменится: для полугруппы $\|T(t)\| = \exp(tL)$, порождаемой ограниченным (для «мягких» потенциалов) оператором L , имеет место представление

$$T(t) = \int_{\sigma(L) \setminus \{0\}} e^{t\lambda} dE_\lambda + \sum_{j=0}^4 P_{\psi_j}, \quad (7)$$

где P_{ψ_j} – проекторы на одномерные подпространства аддитивных инвариантов ψ_j .

Обозначим первое слагаемое в правой части (7) через $T_\perp(t)$. Тогда

$$f = T_\perp(t)f_0 + \sum_{j=0}^4 a_j \psi_j.$$

Аналогично изложенному выше легко показать, что $\|T_\perp(t)\| = 1$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринберг, У. Теоремы существования в целом решения уравнения Больцмана [Текст] / У. Гринберг, Я. Полевчак, П.Ф. Цвайфель // Неравновесные явления: Уравнение Больцмана. – М.: Мир, 1986. – С. 29–58.
2. Маслова, Н.Б. Теоремы о разрешимости нелинейного уравнения Больцмана: Доп. II [Текст] / Н.Б. Маслова // К. Черчиньяни. Теория и приложения уравнения Больцмана. – М.: Наука, 1978. – С. 461–480.
3. Маслова, Н.Б. О решении «в целом» задачи Коши для нелинейного уравнения Больцмана [Текст] / Н.Б. Маслова, А.Н. Фирсов // Тр. Всесоюз. конф. по уравнениям с частными производными. – М.: Наука, 1978. – С. 376–377.
4. Фирсов, А.Н. Об одной задаче Коши для нелинейного уравнения Больцмана [Текст] / А.Н. Фирсов

// Аэродинамика разреженных газов. – Л.: ЛГУ, 1976. – С. 22–37.

5. Caffich, R.E. The Boltzmann equation with a soft potential [Текст] / R.E. Caffich // Commun. Math. phys. – 1980. – Vol. 74. – P. 71–95.
6. Рид, М. Методы современной математической физики [Текст] / М. Рид, Б. Саймон. – М.: Мир, 1978. – Т. 2.
7. Хилле, Э. Функциональный анализ и полугруппы [Текст] / Э. Хилле, Р. Филлипс. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
8. Маслова, Н.Б. Решение задачи Коши для уравнения Больцмана I. Теорема существования и единственности [Текст] / Н.Б. Маслова, А.Н. Фирсов // Вестн. ЛГУ. – 1975. – № 19. – С. 83–88.

ПРОГРАММА ОБСЛУЖИВАНИЯ КОМПЛЕКСА ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗДАНИЯ, ОПТИМАЛЬНАЯ ПО НЕСКОЛЬКИМ КРИТЕРИЯМ

Один из важнейших факторов целевого использования современного здания – обеспечение функционирования комплекса его жизнеобеспечения. В состав указанного объекта, как правило, входят системы электроснабжения, теплоснабжения, канализации, вентиляции, кондиционирования, противопожарной безопасности и др. При функционировании комплекса систем жизнеобеспечения (КСЖ) необходимо проводить обслуживание средств, входящих в его состав. Под программой обслуживания будем полагать совокупность воздействий на каждое из средств КСЖ здания, определяемую с учетом структуры комплекса и ограничений на ресурсы, предусмотренные для обслуживания. Воздействия характеризуются значениями интервалов между обслуживаниями и объемами обслуживания каждого из средств. Из-за высокой сложности и ответственности комплекса систем жизнеобеспечения качество программ обслуживания оценивается совокупностью различных по своей физической природе показателей. В ряде случаев трудно определить, какой из показателей имеет наибольшую важность по сравнению с остальными. Поэтому актуальна задача синтеза программы обслуживания средств КСЖ, оптимальной сразу по нескольким критериям. Рассмотрим возможный путь ее решения.

Будем исходить из требования, чтобы построение программы обслуживания КСЖ осуществлялось при обеспечении одновременного достижения наилучших значений нескольких показателей качества комплекса, в т. ч. и противоположных по своему физическому смыслу. Решение данной задачи в рамках статьи будем рассматривать на

примере одного технического и одного экономического показателей. Пусть технический показатель отражает фактический уровень надежности КСЖ, а экономический показатель – уровень рентабельности функционирования КСЖ. Исходя из необходимости обеспечения непрерывности предоставления услуг систем жизнеобеспечения потребителям, целесообразно первым из указанных показателей рассматривать коэффициент K_K технического использования (КТИ) КСЖ, понимаемый в смысле терминологии [1]. Вторым показателем, наиболее пригодным для данной задачи, является значение дохода C_K , получаемого на некотором интервале эксплуатации КСЖ [2]. Таким образом, при оптимизации программы обслуживания КСЖ необходимо использовать целевую функцию вида

$$W(S) = F(K_K(S), C_K(S)), \quad (1)$$

где S – искомая программа обслуживания КСЖ; $K_K(S)$ и $C_K(S)$ – КТИ и доход КСЖ, рассматриваемые как критериальные функции, зависящие от параметров обслуживания средств КСЖ.

Пусть КСЖ состоит из совокупности n взаимосвязанных средств и существует возможность графического представления G структуры средств в составе комплекса. Для обслуживания каждого из n средств комплекса используются ограниченные ресурсы различного вида (времени, стоимости и т. д.), которые в совокупности образуют множество $\Delta \beta$ допустимых вариантов обслуживания. Обслуживание средств характеризуется интервалом времени до очередного обслуживания и объемом обслуживания. Предположим, что для рассматриваемого здания имеется мно-

жество допустимых интервалов обслуживания $\tau_{TO} = \{\tau_{TO_1}, \tau_{TO_2}, \dots, \tau_{TO_K}\}$. Установим, что объем обслуживания каждого средства определяется только одним типом технологической карты, независимо от величины интервала между обслуживаниями. Между плановыми обслуживаниями каждого средства возможны его отказы и проведение аварийного ремонта (АР). Введем в рассмотрение цикл технической эксплуатации T_j рассматриваемого здания. Будем полагать, что в пределах одного цикла T_j параметры законов распределения времени безотказной работы средств и факторы, влияющие на экономические показатели, постоянны. Установим, что при обслуживании каждого средства с интервалом τ_{TO_j} его качество восстанавливается только до уровня, зафиксированного на начало цикла T_j . Оценка уровня надежности средств КСЖ осуществляется в начале нового цикла T_j при обработке результатов эксплуатации на предыдущем цикле. При проведении АР восстанавливается лишь работоспособность средства до уровня на момент отказа.

Минимальный объем исходных данных для каждого средства КСЖ, необходимых для синтеза программы обслуживания при сделанных допущениях, включает в себя следующее: удельный приход от нормальной работы $c_{НР}$; объем обслуживания, характеризуемый средней длительностью v_{TO_i} обслуживания; средняя удельная стоимость c_{TO_i} одного обслуживания ($i = 1(1)n$); удельная стоимость c_{AP_i} и длительность v_{AP_i} аварийного ремонта каждого средства ($i = 1(1)n$); текущий уровень надежности i -го средства КСЖ, характеризующийся вероятностью его безотказной работы (ВБР) $P_i(\tau)$ ($i = 1(1)n$) за время τ .

При сделанных допущениях процесс функционирования средства КСЖ является регенерирующим случайным процессом (только в пределах цикла T_j). Точками регенерации процесса являются моменты $k \cdot \tau_{TO_j}$, $k = 1, 2, \dots$, а τ_{TO_j} ($j = 1(1)K$) – период регенерации процесса функционирования средства в пределах цикла T_j , равный интервалу обслуживания. С учетом сделанных допущений, а также выводов, содержащихся в работах [3, 4], можно показать, что КТИ $K_i(\tau_{TO_j})$ i -го ($i = 1(1)n$) средства КСЖ при интервале обслуживания τ_{TO_j} ($j = 1(1)K$) может быть представлен в следующем виде:

$$K_i(\tau_{TO_j}) = \frac{\int_0^{\tau_{TO_j}} P_i(x) dx}{\int_0^{\tau_{TO_j}} P_i(x) dx + v_{AP_i} \cdot m_{отк} + v_{TO_i}}, \quad (2)$$

где $m_{отк}$ – среднее число отказов средства на интервале между обслуживаниями.

Максимальное значение $m_{отк}$ оценивается для каждого средства с помощью выражения [5]:

$$m_{отк} = \frac{1 - P(\tau_{TO_j})}{P(\tau_{TO_j})}. \quad (3)$$

Рассмотрим теперь соотношение для среднего дохода $\bar{C}_i$ от функционирования i -го ($i = 1(1)n$) средства, который может быть получен на интервале τ_{TO_j} ($j = 1(1)K$) между его обслуживаниями. Оно имеет следующий вид [2, 4]:

$$\bar{C}_i = \bar{B}_i - \bar{A}_i, \quad (4)$$

где $\bar{B}_i$ – средний приход от нормальной работы i -го ($i = 1(1)n$) средства КСЖ; $\bar{A}_i$ – средний расход от аварийных ремонтов и планового обслуживания на интервале τ_{TO_j} ($j = 1(1)K$) между обслуживаниями i -го ($i = 1(1)n$) средства.

С учетом выражения (2), средний приход $\bar{B}_i$ имеет вид:

$$\bar{B}_i = c_{НР_i} \cdot \int_0^{\tau_{TO_j}} P_i(x) dx. \quad (5)$$

Средний расход $\bar{C}_i$ вычисляется с помощью соотношения:

$$\bar{A}_i = c_{AP_i} \cdot v_{AP_i} \cdot m_{отк} + c_{TO_i} \cdot v_{TO_i}. \quad (6)$$

Таким образом, конечное выражение для $\bar{C}_i$ среднего дохода, получаемого на интервале τ_{TO_j} ($j = 1(1)K$) между обслуживаниями в пределах интервала T_j эксплуатации для i -го ($i = 1(1)n$) средства КСЖ, имеет следующий вид:

$$\bar{C}_i = c_{НР_i} \cdot \int_0^{\tau_{TO_j}} P_i(x) dx - c_{AP_i} \cdot v_{AP_i} - c_{TO_i} \cdot v_{TO_i}. \quad (7)$$

Использование показателя $P_i(\tau)$ ($i = 1(1)n$) в соотношениях (2) и (7) позволяет учитывать фактическое техническое состояние каждого средства КСЖ при обслуживании. Поэтому обслуживание средства в пределах цикла T_j является обслуживанием по состоянию, что соответствует современным взглядам на понятие прогрессивного обслуживания зданий и сооружений [4].

Рассмотрим теперь, как получить соотношения для показателей качества обслуживания



в терминах моделей (2) и (7), применительно к КСЖ в целом. Выражение для КТИ K_K комплекса систем жизнеобеспечения будем определять в соответствии с правилами представления графа G . Наиболее подходящая графическая форма представления G КСЖ при синтезе программы обслуживания – его структурная схема надежности (ССН). Поэтому в расчетах можно воспользоваться методикой, разработанной для ССН сложных объектов [6]. Экономический показатель C_K для КСЖ имеет аддитивную форму, и его вычисление не представляет труда [2, 4]. Рассмотрим теперь алгоритм синтеза программы обслуживания для КСЖ.

Введем в рассмотрение бинарные переменные δ_{ij} , которые формируются по следующему правилу: $\delta_{ij} = 1$, если i -е средство КСЖ обслуживается с интервалом τ_{TOj} , ($j = 1(1)K$), и $\delta_{ij} = 0$ во всех остальных случаях. Таким образом, матрица δ характеризует программу обслуживания КСЖ в целом. Матрицу δ будем называть *матрицей выбора программы* (МВП). Математически задача синтеза программы обслуживания с учетом критериальной функции (1) при сделанных допущениях имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} K_K(\tau_{TO}) &\rightarrow \max; \\ C_K(\tau_{TO}) &\rightarrow \max. \end{aligned} \right\} \tau_{TO} \in \Delta_\beta \quad (8)$$

Данная задача относится к классу задач дискретного линейного или нелинейного программирования, решаемых на множестве допустимых вариантов Δ_β , поскольку классический способ определения экстремумов выражений (8) в данном случае неприменим. При решении задачи (8) необходимо учесть, что используемые показатели критериев K_K и C_K имеют различный физический смысл и различный масштаб изменения. Поэтому сделаем переход от натуральных шкал показателей целевых функций (8) к одной шкале относительных значений показателей, в терминах которой K_K и C_K не имеют размерности и изменяются в одинаковых пределах. Таким требованиям удовлетворяет относительная шкала, отражающая долю максимально возможного выигрыша по исследуемой критериальной функции. Эта шкала может быть проградуирована либо в процентах, либо в относительных значениях. Сделаем следующее кодирование абсолютных значений критериев вида (8) (т. е. значений в натуральной

шкале измерения) для перехода в относительную шкалу:

$$K_{\text{отн}} = \frac{K_K - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}}; \quad (9)$$

$$C_{\text{отн}} = \frac{C_K - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad (10)$$

где K_K – вычисленное значение КТИ всего КСЖ; $K_{\min}$ – минимальное из всех возможных значений КТИ для всего КСЖ; $K_{\max}$ – максимальное из всех возможных значений КТИ для всего КСЖ; C_K – вычисленное значение дохода для всего КСЖ; $C_{\min}$ – минимальное из всех возможных значений дохода для всего КСЖ; $C_{\max}$ – максимальное из всех возможных значений дохода для всего КСЖ.

Соотношения (9) и (10) приводят к возможности сравнения значений КТИ K_K и дохода C_K при решении задачи многокритериальной оптимизации обслуживания средств КСЖ в пределах единой шкалы. Необходимо также принимать во внимание важность для исследуемого КСЖ значений каждой из целевых функций. Речь может идти, например, о соотносительности «цены» одного процента K_K с «ценой» одного процента C_K в относительной шкале. В наиболее простом случае можно установить одинаковую ценность каждой из целевых функций. В более сложных случаях следует экспертным путем учесть важность каждой из критериальных функций.

Для решения двухкритериальной задачи принятия решения вида (8) необходимо сформировать в множестве Δ_β множество недоминируемых по Парето вариантов или множество недоминируемых вариантов Δ_β^{nd} , $\Delta_\beta^{nd} \subset \Delta_\beta$. Для этого воспользуемся алгоритмическим способом решения двухкритериальной задачи на основе вычислительной схемы метода минимального отклонения от идеальной точки [7]. В данном случае «идеальной точкой» является вариант матрицы δ^* , для которой выполняются условия:

$$\left. \begin{aligned} K_{\text{ТИ}}^{\max} &= K_{\text{ТИ}}(\delta^*); \\ C_K^{\max} &= C_K(\delta^*). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Левые части соотношений (11) представляют собой результаты решения однокритериальных задач по соответствующим критериальным функциям. В качестве показателя для оценки количественного отклонения от идеальной точки удобно

Таблица 1

Исходные данные по средствам КСЖ

Номер средства	Параметры закона распределения		Стоимость работы средства	Параметры аварийного ремонта средства		Параметры обслуживания средства	
	λ	k	МО стоимости 1 ч работы средства	МО времени аварийного ремонта	МО стоимости аварийного ремонта	МО времени планового обслуживания	МО стоимости планового обслуживания
Средство 1	0,000050	3,00	20	1	10	2	2
Средство 2	0,000005	3,20	25	2	12	1	2
Средство 3	0,000500	2,50	10	5	30	1	8
Средство 4	0,000800	2,20	10	2	40	5	10
Средство 5	0,000100	1,50	6	2	120	4	20

использовать метрику Евклида. Для задачи (11) метрика Евклида имеет следующий вид:

$$\Delta F = (КТИ_K(\delta) - КТИ_K^{\max})^2 + (C_K(\delta) - C_K^{\max})^2. \quad (12)$$

Таким образом, алгоритм решения задачи двухкритериальной оптимизации (8) состоит в следующем. На первом этапе решаются однокритериальные задачи для формирования «идеальной точки» с координатами, соответствующими решению задач по показателям K_K и C_K . Результатом решения каждой из указанных задач является соответствующая МВП δ_1^* и δ_2^* . На втором этапе формируется обобщенная критериальная

функция вида (12). Для достижения условия ее минимизации решается новая однокритериальная задача выбора варианта обслуживания. Результатом решения является МВП δ_3^* . Матрица выбора варианта δ_3^* определяет значения интервалов обслуживания каждого средства КСЖ, при которых будут выполняться условия (8). Применение разработанной методики рассмотрим на расчетном примере.

Расчетный пример. Постановка задачи

Комплекс систем жизнеобеспечения здания включает в свой состав пять средств ($i=1(1)5$). При этом средство № 1 и средство № 2, средство

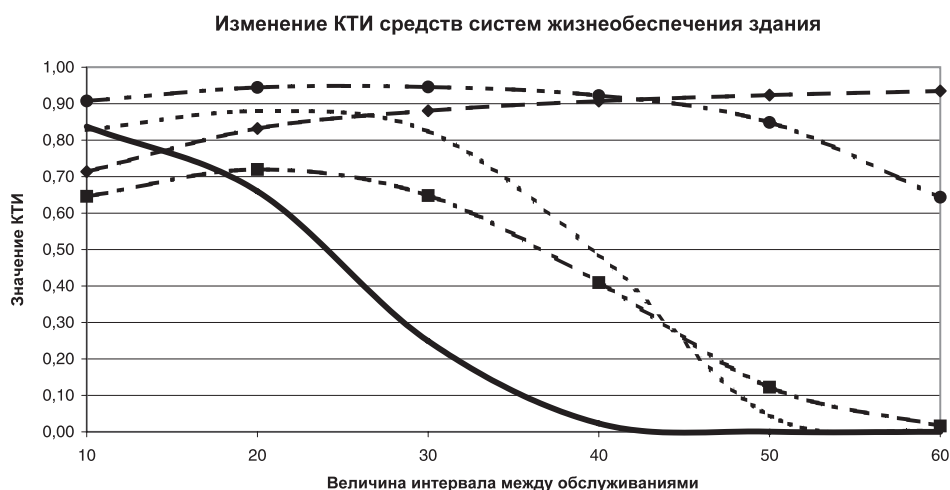


Рис. 1. Расчетные значения КТИ средств КСЖ здания
(---○---) КТИ средства 1; (—●—) КТИ средства 2; (—) КТИ средства 3;
(---■---) КТИ средства 4; (—◆—) КТИ средства 5

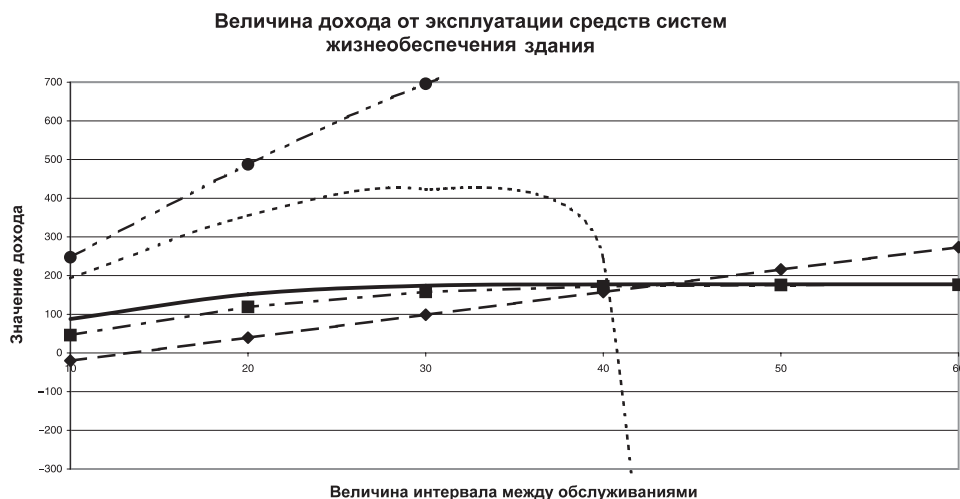


Рис. 2. Расчетные значения дохода от функционирования средств КСЖ
(---) Доход средства 1; (·····) Доход средства 2; (—) Доход средства 3;
(- - - -) Доход средства 4; (—◆—) Доход средства 5

№ 3 и средство № 4 дублируют друг друга. Время безотказной работы каждого средства имеет распределение Вейбулла с соответствующими параметрами. Исходные данные по средствам КСЖ сведены в табл. 1.

Задан также вектор $\tau_{\text{ТО}}$ возможных интервалов обслуживания КСЖ: $\tau_{\text{ТО}} = \{10, 20, 30, 40, 50, 60\}$. Условиями эксплуатации здания установлены ограничения на длительность обслуживания КСЖ при соответствующих значениях интервалов обслуживания. Вектор ограничений $v_{\text{дир}}$ имеет вид: $v_{\text{дир}} = \{1, 1, 2, 6, 8, 10\}$. Предполагается, что эксплуатация КСЖ на интервале эксплуатации T_3 является безубыточной. Необходимо синтезировать программу обслуживания, оптимальную по двум

критериям: максимального технического использования и максимального дохода от функционирования КСЖ в целом.

Решение задачи.

Расчетные значения КТИ средств, полученные по формуле (2) с учетом данных табл. 1, представлены на рис. 1.

Результаты расчетов экономической эффективности средств КСЖ с учетом данных табл. 1 приведены на рис. 2.

Для формирования единой относительной шкалы с помощью соотношений (9) и (10) получены предельные значения для КТИ комплекса: $K_{\text{max}} = 0,8866$; $K_{\text{min}} = 0,0074$. Соответствующие предельные значения показателя экономиче-

Таблица 2

Расчетные значения критериальных функций

Целевая функция	Оптимизация по критерию 1	Оптимизация по критерию 2	Оптимизация по двум критериям
	Значения целевых функций		
Относительное значение КТИ для КСЖ	0,8596	0,0088	0,8324
Абсолютное значение КТИ для КСЖ	0,7631	0,0152	0,7393
Относительное значение дохода для КСЖ (усл. ед.)	0,9986	1,0000	0,9994
Абсолютное значение дохода для КСЖ (усл. ед.)	1267,29	1938,64	1667,37

Таблица 3

Матрица оптимальной программы обслуживания

Величина интервала ТО	Номер средства комплекса жизнеобеспечения здания				
	Средство 1	Средство 2	Средство 3	Средство 4	Средство 5
10	0	0	1	0	0
20	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0
40	1	0	0	0	0
50	0	1	0	1	0
60	0	0	0	0	1

ской эффективности КСЖ имеют значения: $C_{\max} = 1938,64$ усл. ед.; $C_{\min} = -489356,17$ усл. ед.

Сравнительные результаты расчетов для всех трех последовательно решенных в соответствии с описанным алгоритмом задач в относительной и натуральных шкалах измерений двухкритериальной процедуры синтеза оптимальной программы обслуживания КСЖ приведены в табл. 2.

Оптимальная матрица δ_3^* , определяющая программу обслуживания средств КСЖ, представлена в табл. 3.

Таким образом, в статье приведено решение задачи синтеза программы обслуживания по фактическому техническому состоянию средств КСЖ зданий, оптимальной по двум критериям. В качестве исходных данных для моделирования расчетов использованы показатели, которые нетрудно получить при эксплуатации объектов строительства. Это существенно повышает прикладной характер полученных выводов. Результаты решения задачи могут применяться в структурах, выполняющих функции по организации и осуществлению технической эксплуатации зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надежность в технике. Термины и определения [Текст]/ГОСТ 27.002-89.
2. Экономика строительства [Текст]/Под ред. И.С. Степанова. –М.: Юрайт, 1997.–С. 416.
3. Зеленцов, В.А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи [Текст]/В.А. Зеленцов, А.А. Гагин. –Л.: МО, 1991.–С. 169.
4. Рогонский, В.А. Эксплуатационная надежность зданий и сооружений [Текст]/В.А. Рогонский, А.И.

Костриц, В.Ф. Шеряков [и др.]. –СПб.: ОАО Изд-во «Стройиздат СПб», 2004.– С. 272.

5. Герцбах, И.В. Модели профилактики (Теоретические основы планирования профилактических работ) [Текст]/ И.В. Герцбах. –М.: Сов. радио, 1969. –С. 216.
6. Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности [Текст]/ГОСТ Р 51901.14-2005.
7. Юдин, Д.Б. Вычислительные методы теории принятия решений [Текст] / Д.Б. Юдин. –М.: Наука, 1989. –320 с.

УДК: 004.4'244, 004.4'236

Е.В. Филичев, С.М. Устинов

РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ВЫСОКОГО УРОВНЯ АБСТРАКЦИИ

Веб-приложения занимают большую часть рынка программного обеспечения (ПО). С развитием веб-технологий функции, раньше реализуемые лишь с использованием ПО,

устанавливаемого на компьютеры клиента, становятся доступны и реализуемы с помощью веб-приложений, которые предъявляют значительно меньшие требования к оборудованию ра-



бочего места и не нуждаются в установке. Многие организации полностью отказываются от «толстых» клиентов, переходя на веб-интерфейсы, что позволяет значительно сократить расходы на сопровождение программного обеспечения и повысить эффективность работы. Задача администрирования целого парка компьютеров с установленным ПО сводится к администрированию одного веб-сервера со всеми приложениями. Естественным образом повышаются требования к самим веб-приложениям, возрастает их сложность и, как следствие, сложность их разработки. Вместе с тем, актуальность приобретает задача модификации веб-приложения, наращивания функциональных возможностей, изменения бизнес-логики для того, чтобы удовлетворять постоянно изменяющимся требованиям.

Один из наиболее эффективных способов снижения трудоемкости разработки приложений вообще и веб-приложений в частности – использование моделей высокого уровня абстракции и механизмов генерации программного кода приложения по этим моделям. Следует отметить, что данная задача является нетривиальной и до сих пор нет ее универсального решения. Существует несколько подходов для упрощения этой задачи, среди которых можно выделить использование метамоделирования как наиболее перспективный. В данной статье предлагается один из способов использования моделей высокого уровня абстракции для разработки веб-приложений.

Развитие техник моделирования

Первые попытки сократить дистанцию между моделью и кодом целевой системы были приняты еще в 1970-х гг., после формулирования П. Ченом в 1976 г. [1] подхода сущностей-отношений. Несмотря на некоторые недостатки в выразительных возможностях, подход можно признать успешным, т. к. результатом его появления стало последующее создание инструментальных систем, способных генерировать программный код по моделям, среди которых можно отметить RISE, ErWin, DeZign и др. Подход сущностей-отношений показал, что при использовании достаточно формализованной модели задача генерации программного кода по ней является выполнимой.

Затем последовала техника IDEF1x, обобщившая опыт, полученный при разработке таких техник моделирования, как IDEF1, сущностей-

отношений, реляционного подхода Э. Кодда, модели Объектов-Ролей Д. Найсена [2]. В IDEF1X была введена поддержка моделирования логических типов данных с использованием классификационной структуры или конструкции обобщения/специализации, отношения категоризации, представляющих собой взаимно исключающие подмножества общей сущности, а также понятие ключа. Благодаря всему этому, IDEF1X на момент появления являлась самой передовой техникой для определения логического дизайна баз данных и приложений и физического дизайна реализации базы данных, кроме того, она получила поддержку в различных программных продуктах (ER/Studio, ERwin и т. д.). Поддержка выражалась в возможности генерировать скрипты DDL для создания базы данных по диаграммам IDEF1X. Если бы уровень абстракции модели был выше, то, возможно, такого успеха техника IDEF1X не сумела бы достичь.

Следующим важным этапом развития моделирования можно считать создание группы объектного моделирования OMG и разработку универсального языка моделирования UML. UML объединил в себе идеи, использованные при разработке техник OOSE (Object-Oriented Software Engineering) Буча и Якобсона [3], техники Д. Рамбо [4], Шлера и Меллора [5]. Результатом сотрудничества Г. Буча из корпорации Rational Software, И. Якобсона из Objectory и Д. Рамбо из General Electric в 1997 г. стал UML 1.0, хорошо определенный, выразительный, мощный, применимый в широком спектре проблем и областей язык моделирования. Он был предложен для стандартизации группе Объектного Моделирования (OMG) в ответ на ее запрос о едином стандартном языке моделирования. Вскоре был очерчен круг семантических задач для формализации новой спецификации UML с целью его интеграции с другими решениями для стандартизации.

В актуальный стандарт UML версии 2.3 помимо базовых диаграмм входят важнейшие механизмы расширения, такие, как стереотипы и ограничения. В рамках механизма ограничений создан целый язык, язык объектных ограничений (OCL) [6], а стереотипы расширяют базовый словарь UML, позволяя определять новые элементы, наследованные от существующих, и, таким образом, создавать метамодель для нового языка – подмножества UML, который помог бы разрабатывать более специфичные модели. Механизмы

расширения позволяют приспособливать UML под нужды конкретных проектов, а также дают самому языку возможность адаптироваться в новую программную технологию. Вместе эти возможности выводят объектно-ориентированное моделирование на новый уровень, тем самым, еще больше сокращая дистанцию между моделью и готовым программным кодом прикладной системы.

Еще одним подходом, внесшим существенный вклад в решение задачи получения полного кода по модели, стал предложенный Ю.-П. Толваненом и С. Келли в 2000 г. подход разработки приложений, основанный на доменно-специфичном моделировании. К 2008 г. этот подход сформировался в законченном виде и подробно описан в работе [7]. В этом подходе предлагается понизить уровень абстракции до уровня конкретной прикладной области, что существенно снижает затраты на реализацию генератора кода целевого приложения за счет оперирования менее общими по сравнению с разработкой, управляемой моделью, понятиями.

Существующие подходы к разработке ПО на основе моделей

Таким образом, к настоящему времени существует несколько проработанных вариантов использования моделей как основных артефактов разработки, т. е. подразумевается, что, разработав модель или набор моделей, мы можем получить код готовой прикладной системы автоматически. Схематически это представлено на рис. 1.

Как видно из рисунка, никаких «ручных» действий над кодом системы проводить нет необходимости, более того, ручные действия сводят на нет все преимущества подобных подходов.

Для разработки ПО главным становится правильное определение модели. Остальное – задача программного обработчика или набора обработчиков. Различие в подходах заключается в том, как именно необходимо разрабатывать этот на-

бор моделей, и какими характеристиками модели должны обладать.

Среди множества характеристик моделей можно выделить две основных: язык моделирования и уровень абстракции.

На сегодняшний день группой объектного моделирования OMG в качестве наиболее перспективного подхода выбран подход, основанный на архитектуре, управляемой моделью: MDA (Model Driven Architecture). В данном подходе предлагается строить несколько уровней моделей для того, чтобы повысить итоговый уровень абстракции. Вторым по распространенности является подход Келли и Толванена [7] DSM (Domain Specific Modeling), предлагающий для повышения уровня абстракции сужать область применения языка моделирования, делая его специфичным для конкретной прикладной области. Рассмотрим оба эти подхода более подробно.

Подход MDA. В подходе MDA предлагаемая схема разработки принимает вид, показанный на рис. 2.

На рисунке представлены отношения между моделями в MDA. Первичной моделью является модель PIM (Platform independent model), не зависящая от платформы. По модели PIM с помощью некоторых механизмов и характеристик платформы автоматически создаются специфичные модели PSM (Platform specific model), которые имеют жесткую привязку к конкретной платформе. В качестве языков для описания моделей предлагается использовать UML и его профили, также указывается возможность использования языка OCL для повышения детализации моделей и обеспечения возможности осуществить автоматизированный переход, по крайней мере, в теории.

Применительно к веб-технологиям модель PIM оперирует такими понятиями, как экранное представление, статические компоненты экранного представления, динамические компоненты экранного представления, пользовательский ввод и т. д. [8]. Основываясь на информации из PIM, необходимо описать правила построения веб-приложений под конкретную платформу. Если это платформа ASP.NET, то понятия, которыми будет оперировать PSM, это ASP.NET страница, ASP.NET элемент управления и т. д. Для поддержки функциональности на минимальном уровне потребуется описать большое количество вариантов преобразований, что сводит преимущества MDA на нет. Проанализировав подход MDA, можно

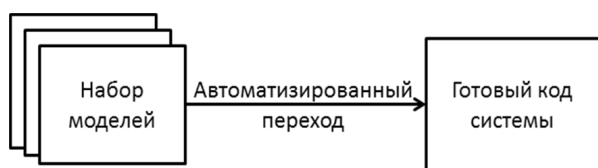


Рис. 1. Модели как основной артефакт разработки

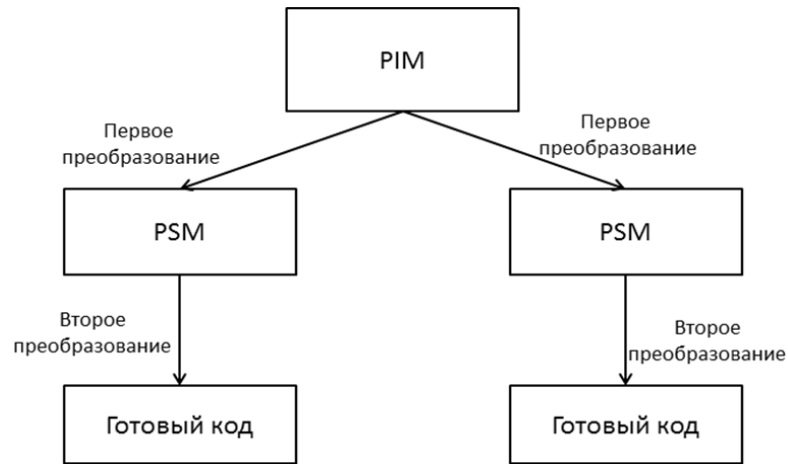


Рис. 2. Процесс разработки MDA

сделать вывод о том, что использование моделей слишком высокого уровня абстракции в качестве первичного артефакта разработки позволяет, при соблюдении условий четкой формализации языка моделирования, получить теоретически обоснованную технологию разработки ПО, однако, применительно к веб-приложениям такой подход не является целесообразным ввиду крайне высокой трудоемкости реализации механизмов перехода между моделями и готовым кодом системы.

Подход DSM. Подход DSM опирается на похожие предпосылки, однако в нем для повышения уровня абстракции предлагается использовать специальные языки для каждой конкретной прикладной области. Сужение области применения позволяет плотнее увязать язык моделирования с реальными проблемами и снижает сложность на-

писания генератора кода, решающего задачу получения полного кода ПО по модели.

На рис. 3 представлена схема структуры DSM проекта и те ее части, которые видимы разработчикам. Данная схема показывает, что с точки зрения разработчика ПО процесс упрощается, по сравнению с MDA. Из двух уровней моделей и двух автоматизированных переходов, платформенно-независимого и платформенно-зависимого, остается лишь один, платформенно-зависимый. Подобное сокращение уровней значительно снижает затраты на разработку модулей генерации конечного кода. Структура генератора, в свою очередь, обычно скрыта от аналитиков, и ее можно сравнить с компилятором. Продолжая аналогию, преобразование моделей в исполняемый код однозначное и исключает модификацию

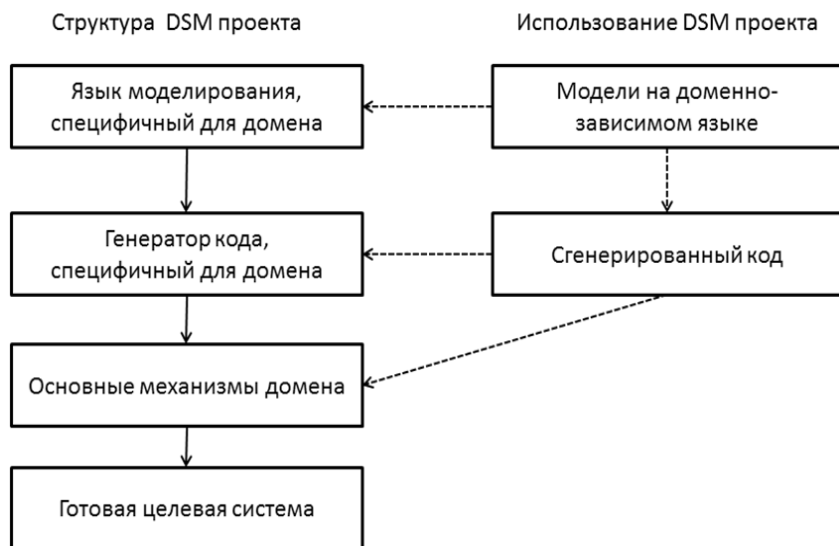


Рис. 3. Архитектура DSM проекта

этого кода. Эта полнота является ключевым фактором и других успешных подвижек в области языков программирования. Платформа и целевое окружение могут быть доступны как в виде кода, так и в форме интерфейсов, поддерживающих интеграцию с генератором. При необходимости, сгенерированный код может также объединяться с кодом, написанным вручную. В качестве языка моделирования конкретной прикладной области также может выступать профиль UML. Особенность подхода, заключающаяся в значительном сужении прикладной области, существенно ограничивает возможности языка моделирования. Для разработки веб-приложения в смежной области потребуются заново разрабатывать соответствующий UML профиль и генератор кода.

Формулирование требований к методике разработки веб-приложений

Таким образом, и у подхода MDA, и у подхода DSM есть серьезные недостатки, снижающие эффективность их использования при разработке веб-приложений. В данной статье предлагается методика разработки веб-приложений, учитывающая опыт разработанных техник моделирования. В качестве требований к методике выбраны:

- 1) высокий уровень абстракции, позволяющий избежать написания кода приложения вручную;
- 2) гибкость и функциональность, не ограниченная конкретной прикладной областью;
- 3) эффективность разработки веб-приложений.

Для удовлетворения этим требованиям методика основана на следующих положениях.

Процесс разработки должен иметь многоуровневую модель. На среднем уровне располагается платформа разработки, на верхнем уровне находятся модели высокого уровня абстракции.

В качестве платформы необходимо использовать технологию разработки определенного типа приложений в целом, т. к. это позволит избежать узкой направленности готового решения.

Количество уровней разработки необходимо выбирать исходя из соображений минимизации трудозатрат на разработку программной поддержки процесса и реализацию переходов между уровнями.

Переходы между уровнями должны выполняться в автоматическом режиме. Введение ручного анализа кода и его модификации негативно сказывается на эффективности конечного решения. Подобный подход допустимо использовать

для разработки не только веб-приложений, но и приложений вообще. Далее эти положения будут рассмотрены более подробно.

Определение оптимального количества уровней моделирования

Как уже было отмечено, эффективнее всего организовывать многоуровневый процесс разработки. Обобщая опыт подходов MDA и DSM, на нижнем уровне необходимо располагать исполняемый код готового приложения, в то время как на верхнем уровне должны находиться модели высокого уровня абстракции. Для того чтобы снять ограничения узкой направленности подхода, в качестве промежуточной платформы необходимо выбирать непосредственно технологию разработки приложений, т. е. инструментальную систему, включающую в себя языковую поддержку и поддержку некоторой платформы. В данной статье рассматриваются веб-приложения, поэтому платформой разработки выступает технология ASP.NET. Промежуточный уровень является необходимым условием применения данного подхода на практике, т. к. в его отсутствие задача реализации перехода от моделей к готовому коду, минуя поддержку платформы, крайне трудоемка, и на сегодняшний день не существует инструментальных систем – примеров ее успешного решения. При необходимости, промежуточный уровень можно разделять на подуровни, с целью дальнейшего упрощения переходов от моделей к готовому приложению. Однако для веб-приложений и технологии ASP.NET это разделение не является целесообразным, т. к. трудоемкость реализации переходов в случае нескольких промежуточных уровней превышает трудоемкость реализации переходов для одного промежуточного уровня. Таким образом, эффективнее всего использовать трехуровневую схему разработки, которая схематично представлена на рис. 4.

В качестве моделей высокого уровня абстракции выступают модели веб-приложения, созданные с помощью языка моделирования высокого уровня, специфичного для платформы, но независимого от прикладной области. С помощью автоматического преобразования по такой модели создаются модели, специфичные для платформенного генератора и оперирующие понятиями, реализованными в коде на языке высокого уровня. Следующее автоматическое преобразование позволяет получить готовый исполняемый код веб-приложения ASP.NET.

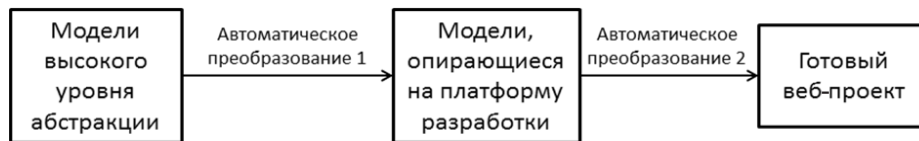


Рис. 4. Схема комбинированного подхода разработки веб-приложений

Описание платформы разработки

Платформа разработки, наряду с автоматизированными переходами, является ключевой частью предлагаемой методики. Она должна сочетать в себе интеграцию с технологией разработки, в нашем случае, ASP.NET, позволять описывать приложения с помощью программных моделей на языке программирования высокого уровня, такого, как C#, а также допускать возможность создания этих программных моделей с помощью некоторых внешних инструментов. Всем этим требованиям удовлетворяет инструментальная система генерации сайтов ASP.NET, разработанная в рамках сотрудничества ООО «Деловые Консультации» и ООО «Брэйн Системс». Разработанная платформа является многоуровневой, и содержит в себе несколько модулей и наборов объектов, реализующих соответствующие функциональные возможности. Еще одним преимуществом данной платформы является поддержка корпоративного ядра «СКАУТ», разработанного ООО «Деловые Консультации» и позволяющего описывать бизнес-логику приложений в привязке к базе данных. Наборы объектов платформы можно разделить на следующие группы.

Набор объектов, обеспечивающий базовые пользовательские функции ввода-вывода, опирающиеся на стандартные компоненты технологии ASP.NET.

Набор объектов уровня бизнес-логики; эти объекты непосредственно привязаны к ядру «СКАУТ» и реализуют его функции по созданию объектов и операциям с ними.

Сложные объекты, сочетающие в себе функции уровня бизнес-логики и функции отображения информации, удовлетворяющие требованиям заказчика. В этот набор объектов входят специальные управляющие элементы, стандартные компоненты отображения информации ASP.NET, а также другие объекты для выполнения функций, не укладывающихся в стандартные возможности компонентов ASP.NET.

Все эти объекты располагаются на соответствующих уровнях программной модели. Про-

граммная модель основана на языке высокого уровня и состоит из классов C#.

Помимо перечисленных выше объектов в платформу входят:

модуль генерации кода;

набор шаблонов для генерации кода;

модули, отвечающие за хранение информации и получение ее из выбранного хранилища (поддерживается несколько вариантов хранения созданных объектов).

Данную платформу предлагается использовать как прикладную область – домен в терминах подхода DSM. Это позволяет одновременно повысить уровень абстракции с веб-приложения под конкретную прикладную область до веб-приложения ASP.NET, сохранив невысокие расходы на разработку модулей генерации кода.

Интеграция с технологией разработки ASP.NET заключается в том, что по программной модели веб-приложения в терминах платформы строится готовое веб-приложение ASP.NET, со страницами aspx, библиотеками, содержащими реализацию бизнес-функций и связи с базой данных, а также с функциями ядра «СКАУТ», которые позволяют более гибко реализовывать бизнес-логику веб-приложения.

Платформа опирается на технологии Microsoft.NET, поэтому ее программная модель допускает создание объектов с помощью скриптов Windows PowerShell, что и было использовано при реализации перехода от моделей высокого уровня абстракции к программной модели в терминах платформы.

Моделей верхнего уровня и реализация автоматических преобразований

Данный подход предлагается применять в среде разработки MS Visual Studio 2010 Ultimate, поэтому естественным выглядит решение использовать функциональные возможности моделирования, предоставляемые пакетом дополнения Visualization and Modeling Feature Pack. Это позволяет получить поддержку языка моделирования высокого уровня, такого, как UML, вместе с мощным механизмом его расширения в

виде профилей, а также доступ на программном уровне к разработанным моделям, что помогает анализировать эти модели и создает основу для реализации переходов в платформенные модели. Для разработки моделей верхнего уровня используются возможности метамоделирования, предоставляемые Microsoft Visualization & Modeling SDK, в частности, включающие в себя механизмы стереотипов UML.

Для автоматического преобразования 1 предлагается использовать шаблоны t4 для генерации текста. Таким образом, сначала в терминах разработанного профиля UML создаются модели высокого уровня абстракции, не привязанные к конкретной прикладной области, но содержащие связь с платформой разработки. Создание моделей осуществляется в рамках проекта моделирования в Microsoft Visual Studio 2010. Созданные в этом проекте диаграммы затем анализируются в рамках другого проекта **Visual Studio**, включающего в себя поддержку шаблонов генерации текста t4 templates и ссылку на библиотеку Microsoft.VisualStudio.ArchitectureTools.Extensibility.dll. Реализация преобразования 1 осуществляется с помощью названных выше шаблонов путем анализа разработанных в проекте моделирования диаграмм и написания на их основе скриптов PowerShell, содержащих необходимые команды для воспроизведения модели веб-приложения в программной модели платформы генерации сайтов. Функциональность получения по моделям платформы готового кода проекта реализована в механизмах платформы. Таким образом, предлагаемая методика позволяет разрабатывать веб-проекты для любой прикладной области, используя в качестве первичного артефакта разработки модели высокого уровня абстракции. С помощью реализованных автоматических преобразований возможно получение полного кода веб-приложения по таким моделям.

Предложенную в данной статье методику можно формализовать как последовательность

следующих этапов.

1. Определение функциональных требований к веб-приложению.

2. Определение необходимых уровней расположения бизнес-логики приложения. Некоторые бизнес-функции удобнее реализовывать серверными компонентами ASP.NET, для других эффективнее использовать механизмы, предоставляемые базой данных.

3. В случае, если существующих компонентов платформы не хватает для реализации требуемых бизнес-функций, разработка новых компонентов, реализующих требуемые функции.

4. Доработка профиля UML, включение в него появившихся на третьем этапе компонентов.

5. Построение наглядных моделей веб-приложения в профиле UML, согласование с заказчиком.

6. Автоматизированные переходы от построенных моделей в готовый к публикации на сервере код веб-приложения.

Предполагая определенные затраты на внедрение методики, данный подход позволяет значительно сократить затраты на разработку веб-приложений в дальнейшем. Чем больше приложений реализовано, тем более богатыми возможностями обладает платформа, и тем меньше средств понадобится на разработку последующих приложений.

Следует отметить, что предложенный подход был опробован и показал хорошие практические результаты в следующих программных продуктах: «Скаут–Заявки для Сбербанка»; «Скаут–Навигатор»; «Телемикс».

Для выполнения поставленных в ТЗ задач по каждому из этих проектов разработаны спецификации необходимых пользовательских элементов управления, произведена разработка и добавление этих элементов в библиотеки платформы, описаны необходимые классы для языка моделирования и механизмы переходов от моделей, содержащих новые элементы, в готовый серверный код.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chen, P.** The Entity-Relationship Approach to Logical Data Base Design [Текст] / P. Chen. –Wellesley, MA: Q.E.D. Information Sciences, Inc. –1977.
2. **Nijssen, G.M.** Current Issues in Conceptual Schema Concepts [Текст] / G.M. Nijssen (ed.) // Proc. 1977 IFIP Working Conf. on Modelling in Data Base Manage-

ment Systems, Nice, France. –Amsterdam: North-Holland Publishing, 1977. –P. 31–66.

3. **Jacobson, I.** Object Oriented Software Engineering: A Use Case Driven Approach [Текст]/ I. Jacobson; Revised ed. –Addison-Wesley Professional, 1992.

4. **Rumbaugh, J.** Object-Oriented Modeling and De-



sign. [Текст] / J. Rumbaugh. –N.J.:–Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.

5. **Shlaer, S.** Object-Oriented Systems Analysis: Modeling The Real World in Data [Текст] / S. Shlaer, S.J. Mellor. –N.J.:Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1988.

6. **Warmer, J.** Object Constraint Language, The Getting Your Models Ready for MDA [Текст] / J. Warmer,

A. Kleppe; 2 ed. –Addison Wesley, 2003. –240 с.

7. **Kelly, S.** Domain Specific Modeling. Enabling Full Code Generation [Текст] / S. Kelly, J-P. Tolvanen. –Wiley, 2008. –427 с.

8. **Conallen, J.** Building Web Applications with UML [Текст] / J. Conallen; 2 ed. –Addison Wesley, 2002. – 496 с.

УДК 004.651.4

А.М. Бородин, С.В. Поршнева

АНАЛИТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИНДЕКСОВ В OLAP-СИСТЕМАХ

В работах [1, 2] показано, что выполнение агрегирующих запросов по наборам аналитических данных в OLAP-системах при использовании пространственных индексов оказывается весьма эффективным, в первую очередь, с точки зрения скорости выполнения запросов. Помимо этого оказалось, что выбранный подход позволяет при изменении набора данных ограничиться только частичным перестроением индекса. В то же время оценки эффективности выполнения агрегирующих запросов по аналитическим данным, приведенные в [1, 2], были получены экспериментально, поэтому зависят от конкретных наборов аналитических данных. В этой ситуации для обоснования возможности экстраполяции данных оценок на аналитические данные OLAP-систем произвольной структуры разработка аналитических методов оценки эффективности пространственных индексов является актуальной.

В статье изложено решение задачи создания аналитических способов оценки эффективности метода индексирования данных, разработанного в [1, 2], в т. ч. R*-дерева, Ra*-дерева и KDB-дерева.

Способ оценки ожидаемой эффективности R-дерева

R-дерево предназначено для индексирования набора пространственных объектов. При этом основной характеристикой объекта является многомерный параллелепипед (параллелотоп) минимально возможного объема, описанный вокруг объекта, ребра которого параллельны осям

координат (minimum bounding rectangle – MBR)*. MBR-параллелотоп описывается заданием координат его вершин.

Здесь и далее мы считаем, что исходный OLAP-куб отображен на единичный OLAP-куб с помощью преобразования

$$\tilde{x}_k^{(i)} = \frac{x_k^{(i)} - x_{\min}^{(i)}}{x_{\max}^{(i)} - x_{\min}^{(i)}},$$

где i – номер измерения куба; k – номер отсчета в i -м измерении; $x_{\min}^{(i)}$ – минимальное значение координат i -го вектора (измерения); $x_{\max}^{(i)}$ – максимальное значение координат i -го вектора (измерения). Использование единичного OLAP-куба, как очевидно, снимает проблему отличий в единицах измерения величин, расположенных в соответствующих измерениях исходного OLAP-куба.

Для получения аналитической оценки эффективности R-дерева докажем несколько промежуточных утверждений.

Назовем отрезок $s = [s_0, s_1]$ равномерно распределенным, если $s_0, s_1 \in [0, 1]$, $s_0 \leq s_1$, $s_1 = s_0 + |s|$ и s_0 – случайное число с равномерным законом распределения на интервале $[0, 1 - |s|]$.

Лемма 1. Вероятность p пересечения отрезков $s = [s_0, s_1]$ и $q = [q_0, q_1]$, таких, что $|s|, |q|$ – заданные числа, s и q – равномерно распределенные отрезки, и $|q| + |s| \leq 1$. Тогда p вычисляется по формуле:

* Отметим, что аббревиатура MBR в ряде статей используется также и для обозначения набора MBR-параллелотопов.

$$p(|q|, |s|) = \frac{|s| + |q| - |q||s| - |s|^2 - |q|^2}{(1 - |q|)(1 - |s|)}. \quad (1)$$

Доказательство. Рассмотрим рис. 1, на котором изображено множество всех допустимых значений (s_0, q_0) , при которых искомые отрезки q , s имеют общие точки (многоугольник A).

Из рисунка видно, что площадь многоугольника A можно вычислить по формуле

$$A = |s| + |q| - |q||s| - |s|^2 - |q|^2,$$

площадь прямоугольника B , соответствующая множеству всех возможных значений (s_0, q_0) , можно вычислить по формуле

$$B = (1 - |q|)(1 - |s|).$$

Стоит отметить, что приведенное построение верно, только если $|q| + |s| < 1$. Иначе $p = 1$, т. к. такие отрезки гарантированно пересекаются.

Тогда вероятность p пересечения отрезков можно вычислить как

$$p(|q|, |s|) = \frac{A}{B} = \frac{|s| + |q| - |q||s| - |s|^2 - |q|^2}{(1 - |q|)(1 - |s|)}.$$

Отметим, что ранее, в [3, 4], соответственно, были предложены упрощенные аналоги (1):

$$p(|q|, |s|) = |q| + |s|, \quad (2)$$

$$p(|q|, |s|) = \frac{|s| + |q|}{(1 - |q|)(1 - |s|)}. \quad (3)$$

Однако тесты, проведенные на модельных данных, показали, что в отличие от результатов вычислений по формуле (1), оценки вероятности p , вычисляемые по формуле (2), и, соответствен-

но, сложность запроса оказываются заниженными по сравнению с их реальными значениями. В случае использования (3), наоборот, вычисленная оценка сложности агрегирующего запроса была стабильно завышенной.

Лемма 2. Дано множество взаимно непересекающихся отрезков $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, где $s_j = [s_{0,j}, s_{1,j}]$, S_j – равномерно распределенный отрезок, $j = 1, 2, \dots, n$, средняя длина которых равняется $\tilde{s}$. Пусть $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ – множество, составленное из непересекающихся отрезков, таких, что каждый отрезок u_i включает в среднем f отрезков из множества S (u_i является выпуклой оболочкой нескольких s_j). При этом $n = N/f$, а N – достаточно велико, чтобы можно было не учитывать, что интервалов между отрезками на 1 больше чем N (если не кратно f , $f = \text{int}(N/f) + 1$, здесь int – функция, возвращающая значение целой части числа). Тогда средняя длина отрезков, принадлежащих множеству U , $\tilde{u}$ равна

$$\tilde{u} = \frac{f-1}{N} + \tilde{s}.$$

Доказательство. Пусть $\bar{s}$ – средний интервал между отрезками из S

$$\bar{s} = \frac{1}{N} - \tilde{s}.$$

Пусть $\bar{u}$ – средний интервал между сгруппированными отрезками. При группировке по f отрезков останется не занятым один из f интервалов

$$\bar{u} = \bar{s} = \frac{1}{N} - \tilde{s}.$$

Тогда

$$\tilde{u} = \frac{f}{N} - \bar{u} = \frac{f-1}{N} + \tilde{s}.$$

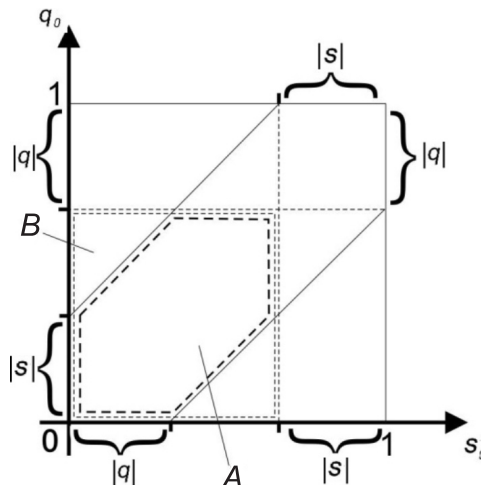


Рис. 1. К доказательству леммы 1



Справедливость леммы 2 была также подтверждена результатами компьютерного моделирования.

Полученный результат можно обобщить для случая группировки D -мерного OLAP-куба между уровнями R^* -дерева с фактором ветвления F . Действительно, принимая во внимание, что при построении дерева стремятся минимизировать пересечения между узлами на одном уровне, т. е. выполняемая группировка совпадает с требованиями группировки по каждому измерению, для дальнейших оценок можно полагать, что $f \sim \sqrt[D]{F}$.

Следует также отметить, что алгоритмы R^* -дерева и VAM-split дополнительно уменьшают объема группирующих параллелотопов при помощи группировки параллелотопов с одинаковыми длинами ребер. Это, в свою очередь, обеспечивает уменьшение средней длины незанятого пространства по каждому измерению также в $\sqrt[D]{F}$ раз на каждом этапе группировки.

Для дальнейшего анализа определим функцию средней длины ребра параллелотопа по определенному измерению

$$W(0, |s|) = |s|,$$

$$W(x+1, |s|) = \frac{\sqrt[D]{F} - 1}{\sqrt[D]{N(x)}} + W(x, |s|),$$

где x – номер уровня группировки; s – средняя длина ребра узла по рассматриваемому измерению $N(x) = \frac{N}{F^x}$.

Количество уровней в индексе h (высоты дерева) зависит от фактора ветвления F и общего количества индексируемых данных:

$$h = 1 + [\log_F N],$$

где $[\]$ – операция взятия целой части числа.

Теорема 1. Количество узлов R^* -дерева, затронутых запросом q , может быть вычислено по следующей формуле:

$$DA = 1 + \sum_{x=1}^{[\log_F N]} \frac{N}{F^x} \prod_{j=1}^D p(W(x, |s_j|), |q_j|). \quad (4)$$

Доказательство. Для того чтобы окно запроса и параллелотоп узла дерева пересекались, они должны пересекаться по каждому из D измерений, поэтому вероятность пересечения узла S с длинами ребер $s_1, s_2, \dots, s_D$ с элементами множества $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_D\}$ (окном запроса) можно вычислить следующим образом:

$$p(S, Q) = \prod_{j=1}^D p(|s_j|, |q_j|). \quad (5)$$

Так как при расчете агрегирующего запроса Q на каждом уровне x необходимо рассмотреть L узлов дерева

$$L = \frac{N}{F^x} \prod_{j=1}^D p(W(x, |s_j|), |q_j|),$$

то для h уровней общее количество рассмотренных узлов

$$DA = \sum_{x=1}^{1+[\log_F N]} \frac{N}{F^x} \prod_{j=1}^D p(W(x, |s_j|), |q_j|). \quad (6)$$

Отметим, что в (6) не учтен нулевой уровень – уровень данных, поскольку минимальная единица группировки – страница памяти, и именно количество обращений к страницам памяти является целевым показателем эффективности. В то же время детальное рассмотрение индекса корневого уровня позволяет сделать вывод о том, что корневой узел всегда один и его придется рассмотреть в любом случае. Следовательно, необходимо добавить к левой части (6) единицу. Таким образом, получаем искомое равенство (4).

Требуется отметить, что фактор ветвления дерева F может не быть постоянной величиной, но некоторой функцией от номера уровня x . Наиболее часто встречающейся причиной возникновения зависимости фактора ветвления дерева от номера уровня x является отличие размера записи во внутреннем узле дерева от размера записи в узле данных. Другая причина обусловлена использованием внутривстраничного индексирования. В этом случае для предсказания количества обращений к страницам памяти оказывается достаточным заменить F на $F(x)$ и считать, что высота дерева равна минимальному целому h , такому, что $\prod_{x=1}^h F(x) \geq N$.

Способ оценки ожидаемой эффективности Ra^* -дерева

Ra^* -дерево представляет собой R^* -дерево, каждый узел которого содержит кэшированное агрегатное значение атрибута, на котором вычисляется агрегатная функция [5].

Для построения модели эффективности Ra^* -дерева нам потребуются приведенные ниже лемма 3 и теорема 2.

Лемма 3. Вероятность Inc того, что отрезок $q = [q_0, q_1]$ полностью включает отрезок $s = [s_0, s_1]$, где $|s|, |q|$ – заданные числа, $s, q \in [0, 1]$, s_0 – случайное число с равномерным законом рас-

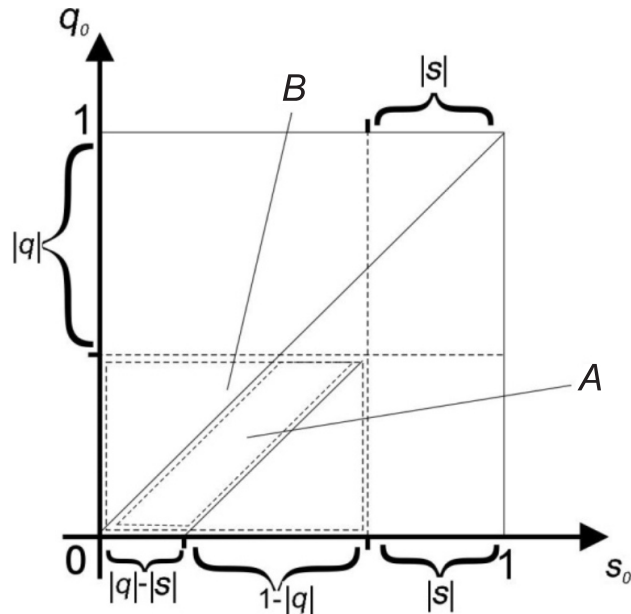


Рис. 2. К доказательству леммы 3

пределения на интервале $[0, 1-|s|]$, q_0 – случайное число с равномерным законом распределения на интервале $[0, 1-|q|]$, вычисляется по формуле:

$$Inc(|q|, |s|) = \begin{cases} \frac{|q|-|s|}{1-|s|}, & \text{если } |q| \geq |s|, \\ 0, & \text{если } |q| < |s|. \end{cases} \quad (7)$$

Доказательство. Аналогично доказательству леммы 1. Рассмотрим рис. 2, на котором представлено множество допустимых значений s_0, q_0 , при которых искомые отрезки q, s попадают в $[0, 1]$ (четыреугольник A), и множество всех возможных значений s_0, q_0 , (прямоугольник B).

Из рисунка видно, что площадь четырехугольника A , соответствующего множеству всех допустимых значений (s_0, q_0) , можно вычислить по формуле

$$A = (1-|q|)(|q|-|s|).$$

Площадь прямоугольника B , соответствующего множеству всех возможных значений (s_0, q_0) , можно вычислить по формуле

$$B = (1-|s|)(1-|q|).$$

В случае, если $|q| < |s|$, фигура A не существует, т. к. не существует точек, в которых выполняется условие леммы.

Тогда искомую вероятность полного включения отрезком $q = [q_0, q_1]$ отрезка $s = [s_0, s_1]$ можно вычислить как отношение площадей четырехугольника A и прямоугольника B :

$$I(|q|, |s|) = \frac{|q|-|s|}{1-|s|}.$$

Теорема 2. Количество узлов Ra^* -дерева, затронутых запросом q , может быть вычислено по следующей формуле:

$$DA^* = 1 + N \sum_{x=1}^{h-1} \frac{1}{F(x)^x} \left(\prod_{j=1}^D p(W(x, |s_j|), |q_j|) - \prod_{j=1}^D Inc(W(x, |s_j|), |q_j|) \right). \quad (8)$$

Доказательство. Используя лемму 3, можно получить оценку количества страниц на каждом уровне Ra^* -дерева, которые полностью попадают в запрос, поэтому при выполнении запроса их анализ не потребуется:

$$E_{RA} = \frac{N}{F(x)^x} \prod_{j=1}^D Inc(W(x, |s_j|), |q_j|). \quad (9)$$

Из (9) видно, что вероятность включения параллелографа в область параллелографа запроса равна произведению соответствующих вероятностей по каждому измерению параллелографа запроса. Вероятное количество полностью включенных в запрос элементов на уровне x находится умножением вероятности включения на количество элементов. При этом чтение всего дочернего поддерева не требуется. Однако необходимо помнить, что всё дочернее поддерево будет учтено в E_{RA} других уровней. Таким образом, получаем искомое равенство.

Оценка ожидаемой эффективности KDB-дерева

Для предсказания эффективности KDB-дерева можно выбрать модель, отличающуюся от описанной выше модели, используя следующую функцию средней длины ребра параллелопада по определенному измерению:

$$W_{KDB}(x) = \frac{1}{\prod_{j=1}^x \sqrt[D]{F(x)}}.$$

Физический смысл этого выражения состоит в том, что KDB-узлы KDB-дерева на каждом уровне индексирования заполняют все индексированное пространство.

Теорема 3. Количество узлов KDB-дерева, затронутых запросом q , может быть вычислено по следующей формуле:

$$T = N \prod_{j=1}^D p(W(0, |s_j|), |q_j|), \quad (10)$$

$$\frac{DA^*}{T} = \frac{1 + N \sum_{x=1}^h \frac{1}{F(x)^x} (\prod_{j=1}^D p(W(x, |s_j|), |q_j|) - \prod_{j=1}^D Inc(W(x, |s_j|), |q_j|))}{N \prod_{j=1}^D I(W(0, |s_j|), |q_j|)}. \quad (11)$$

Из (11) видно, что DA^* имеет сложность $O(N \cdot \log N)$. Логарифм в данном случае появляется вследствие сложения границ от 1 до h . Линейная зависимость DA^* от N обусловлена линейной зависимостью T , вычисляемой в соответствии с (9), от N . Таким образом, можно говорить о том, что соотношение $\frac{DA^*}{T} \sim \log N$. Иными словами, сложность эффективности расчета запроса с фиксированным размером результирующей выборки при использовании пространственных индексов с ростом N растет логарифмически.

Уточнение модели эффективности. Предложенная модель эффективности R-дерева опирается на предположение о средней длине ребра параллелопада W , вычисление которой базируется на лемме 2, в которой в неявном виде предполагается, что в каждой из рассматриваемых групп имеется достаточное количество группируемых элементов. В одномерном случае это означает, что $N(x)/F(x) \geq 4$.

В многомерном случае это требование можно записать в виде:

$$\sqrt[D]{N(x)} / \sqrt[D]{F(x)} \geq 4. \quad (12)$$

$$DA_{KDB} = 1 + N \sum_{x=1}^{h-1} \frac{N}{F(x)^x} \prod_{j=1}^D p(W_{KDB}(x), |q_j|).$$

Доказательство аналогично доказательству теоремы 1.

Анализ полученных моделей на примере R*-дерева. Расчет различных агрегирующих запросов требует различных вычислительных затрат, которые описанные выше модели позволяют оценить, однако для анализа эффективности индекса целесообразно ввести новый показатель. В качестве такового логично использовать отношение количества узлов R*-дерева, затронутых запросом q , вычисляемое в соответствии с (8), к ожидаемому количеству элементов, участвующих в расчете результирующего агрегатного значения:

Из (12) видно, что при достаточно больших значениях D ($\sim 10-15$) данное условие труднодостижимо, как следствие, результат оценки W может быть далек от своего фактического значения. Высказанное предположение было подтверждено при анализе тестовых данных, подробно описанных ниже, результаты которого показали, что большинство оцениваемых средних значений W близки к фактическим, в то же время в ряде случаев были получены оценки, идентифицированные, как существенные отклонения. Однако устранение данной проблемы не вызывает трудностей. Для этого достаточно вести статистику средней длины ребра параллелопада не только на уровне данных, но и на каждом уровне внутренних узлов параллелопада. Динамическое поддержание актуальности накопленных значений $W(x, |s|)$ с технической точки зрения является тривиальной задачей. Действительно, объем данных для поддержания такой статистики относительно невелик: при хранении значения средней длины параллелопада в 64-битном формате double, количества параллелопадов в 32-битном integer, для 8-мерного индекса высотой в 8 уровней требуется $8 \cdot 8 \cdot 8 + 8 \cdot 4 = 544$ байта.

Экспериментальная оценка точности предложенной модели эффективности

Тестирование модели производительности, разработанной в рамках настоящей работы производилось на данных налоговых поступлений базы САПФИР [2], представляющей собой OLAP-систему, реализующую модель данных «звездного» соединения.

Данные были классифицированы по восьми измерениям (Муниципальное образование; Классификация доходов бюджета; Вид статей налоговой отчетности; Экономическая классификация; Элемент дохода; Программа доходов; Дата; Общероссийский классификатор видов экономической деятельности), общий объем данных составлял 1,96 млн записей. По составленному индексу данных рассчитывались запросы со случайными границами агрегации и агрегирующей функцией расчета количества записей. При этом был использован следующий выбор случайных границ запроса. Иерархия каждого измерения разворачивалась в множество элементов без учета иерархических связей. Так, например, множество значений классификатора «Дата» одновременно содержало элементы, соответствующие дням, месяцам и годам. Далее каждому элементу был присвоен соответствующий вес: вес листовых элементов иерархии был равен единице, а вес нелистовых элементов – количеству его дочерних элементов. Из этого множества случайным образом выбирался один элемент, при этом вероятность его выбора была пропорциональна его весу. Данная операция производилась для каждого измерения данных.

Таким образом, сформировали границу рассчитываемого случайного запроса. Далее проводилась проверка, в ходе которой при нахождении пересечения сформированного запроса по данному измерению с выбранным интервалом $[x_{\min}^{(i)}, x_{\max}^{(i)}]$, он отбрасывался как несущественный. Описанная методика предсказания определяла сложность данного запроса как одно обращение к узлу графа индекса, поскольку реальный расчет этого запроса требовал чтения только корневого узла графа индекса. Например, если в данных по четырем измерениям использовалась только половина диапазона, то в 93 % случаев мы имели абсолютно точное соответствие предсказанного и реального значений. Однако это идеально точные предсказания нерелевантного случая, и интереса они не представляют.

Запросы, признанные значимыми, далее передавались для расчета в индекс данных. При этом для каждого расчета запроса подсчитывалось количество узлов, рассмотренных при выполнении запроса.

Далее рассчитывался целевой показатель E – отношение предсказанной сложности выполнения запроса к фактической:

$$E = \frac{DA_{\text{предсказанное}}}{DA_{\text{фактическое}}},$$

представляющий собой некоторую совокупность, состоящую из 1000 случайных чисел, со средним значением $\bar{E} = 1,027$ и среднеквадратическим отклонением 0,520. Гистограмма распределения случайной последовательности E представлена на рис. 3.

Анализ распределения изучаемой случайной последовательности позволил выдвинуть гипотезу о возможности ее описания гамма-распределением [6] с параметрами $k = 5,39$ и $\theta = 0,2$. Проверка данной гипотезы в соответствии с критерием согласия Пирсона [6] подтвердила ее истинность (экспериментальное значение $\chi^2 = 20,13$ оказалось меньше соответствующего критического значения $\chi_{\text{кр}}^2 = 22,71$, вычисленного для 22 интервалов, двух степеней свободы распределения и уровня статистической значимости 0,25). При этом математическое ожидание гамма-распределения с указанными параметрами ($\bar{E}_{\text{ТЕОР}} = 1,08$) оказалось несколько выше приведенной ранее оценки среднего значения анализируемой совокупности случайных чисел, в то время как СКО гамма-распределения с указанными параметрами, напротив, меньше соответствующей характеристики анализируемой совокупности случайных чисел (0,46 и 0,52 соответственно).

Таким образом, средняя точность предсказания в соответствии с описанной выше моделью составила 37 %. В сравнении с 20-процентной точностью, получаемой при использовании модели, описанной в [3], полученный результат следует признать удовлетворительным, тем более, принимая во внимание, что в [3] методика тестировалась на двумерных данных и использовались карты плотности данных. Применение карт плотности данных в нашем случае, напротив, не представлялось возможным ввиду высокой размерности данных. Напомним, что объем карты плотностей растет экспоненциально быстро при увеличении

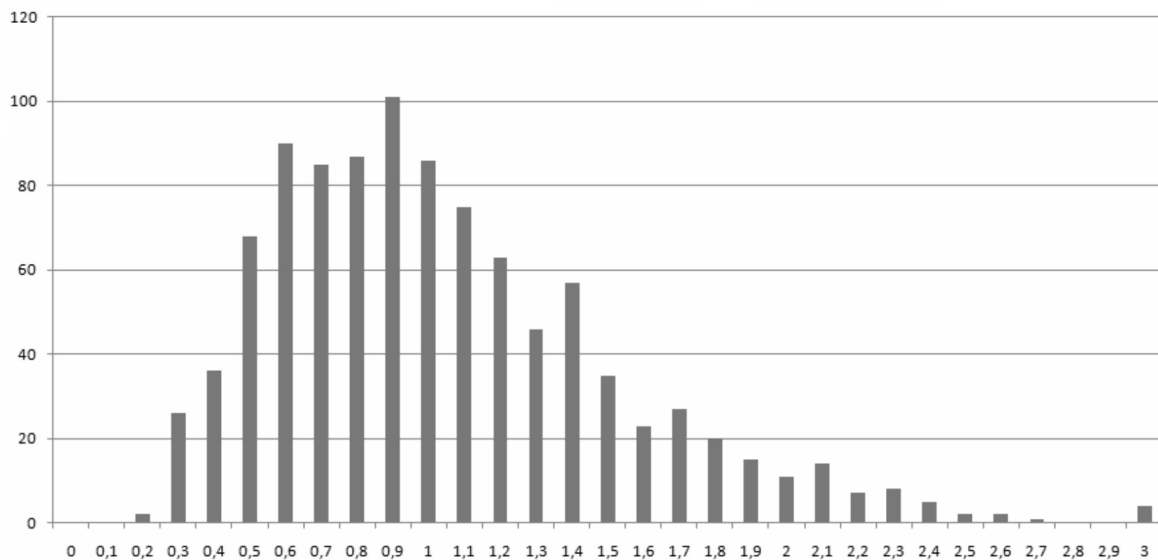


Рис. 3. Частоты распределения E

количества измерений и степени детализации. Поэтому в большинстве практических случаев OLAP-систем для того, чтобы карта плотностей была эффективной, требуется использовать карты плотностей, размер которых может превышать общий объем данных на несколько порядков. В то же время точность предсказания, равная 37 %, не создает ощутимой разницы для работы оптимизатора запросов.

Полученное значение $\bar{E} = 1,027$ свидетельствует о том, что созданная модель является пессимистической, однако, общий принцип, заложенный в ее основу, равно как и в основу остальных моделей, описанных в статье, верен. Следовательно, данные модели могут быть использованы для качественного сравнения производительности различных методов построения индексов в OLAP-системах.

В результате исследований эффективности методики использования пространственных индексов для выполнения аналитических запросов можно сформулировать следующие выводы.

Разработана методика предсказания эффективности R*-дерева, Ra*-дерева и KDB-дерева.

Результаты проведенного тестирования разработанной модели эффективности R*-дерева показали, что среднеквадратичная ошибка предсказания составляет 52 %, т. е. методика предсказания сложности аналитического запроса позволяет верно определить ее порядок.

Для расчета предполагаемой сложности выполнения запроса требуется сравнительно небольшой объем статистических данных.

Точность модели потенциально может быть повышена за счет использования карт плотности данных, однако, в случае высоких размерностей эти карты будут занимать очень большой объем памяти, в то время как большей точности оптимизатору запросов не требуется.

Математическое ожидание отношения предсказанной сложности выполнения запроса к фактической сложности запроса составляет $\bar{E} = 1,027$, что свидетельствует о правильности развиваемых подходов.

Ожидаемая сложность выполнения аналитического запроса измеряется в количестве узлов древовидного индекса, рассмотрение которых потребуется при выполнении агрегирующего запроса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородин, А.М. Использование пространственных индексов для обработки аналитических запросов и агрегирования многомерных данных в ИАС [Текст] / А.М. Бородин, С.В. Поршнев, М.А. Сидоров // Изв.

Томск. политех. ун-та. —2008. —№ 5. —С. 64–86.

2. Бородин, А.М. Сравнительный анализ возможностей и скорости обработки многомерных данных программными средствами бизнес-аналитики на осно-

ве индексирующих структур основной памяти [Текст] / А.М. Бородин, С.В. Поршнев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 1. –С. 99–102.

3. **Theodoridis, Y.A** model for the prediction of R-tree performance [Текст] / Yannis Theodoridis, Timos Sellis // ACMSIGACT-SIGMOD-SIGART symp. on Principle soft database systems, 04.06.1996. –С.161–171

4. **Бородин, А.М.** Методы оценки эффективности R-tree индекса агрегирующих запросов в OLAP-

системах [Текст] / А.М. Бородин, М.А. Сидоров, С.В. Поршнев // Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. СВЯЗЬ – ПРОМ, 17.03.2009. –Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2009. –Т. 2. –С. 59–66.

5. **Beckmann, N.** The R*-tree: An Efficient and Robust Access Method for Points and Rectangles [Текст] / N. Beckmann, H.-P. Kriegel, R. Schneider [et al.] // Praktische Informatik. –Universitaet Bremen, 1991. –С. 322–331.

6. **Кендалл, М.** Статистические выводы и связи [Текст] / М. Кендалл, А. Стьюарт ; Пер. Л.И. Гальчук, А.Т. Терёхин. –М.: Наука, 1973. –900 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Один из главных факторов успеха деятельности предприятия в условиях рынка – непрерывное обновление товаров и технологии производства, иными словами – создание, разработка, освоение производства новой продукции.

Традиционно процессы освоения новой продукции, иначе называемые *процессами обновления*, моделируются с помощью систем сетевого планирования и управления. Однако большинство процессов освоения сложной продукции существенно зависит от случайных факторов. Эффективность методов сетевого планирования и управления резко снижается при возрастании влияния случайных факторов на параметры разработки. Недостатки планирования процессов создания новой продукции и управления ими обуславливают чрезмерную длительность сроков освоения новых видов изделий, снижают эффективность и подвергают опасности морального старения продукцию еще на стадии ее освоения.

Применение сетевого моделирования при разработке и освоении сложных изделий позволит не только выявить особенности в технологии изделия, но и определить резервы времени в сокращении цикла производства и выхода на рынок. Основу системы моделирования составляют сетевые модели с возвратами.

Впервые сведения о графах с возвратами изложены в трудах К. Бержа (1960–1962 гг.) [4]. Широкое применение этих технологий в России осуществлялось под руководством доктора экономических наук, профессора Н.Б. Мироносца, внесшего значительный вклад в применение графов с возвратами к моделированию производственных систем в рамках исследований Института экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения РАН [6, 7].

Графы с возвратами

Рассмотрим основные определения графов с возвратами [2, 4, 6].

Множество дуг U графа $G(I, U)$ содержит детерминированные дуги $(i, j) \in U_1$ и дуги возврата $(k, l) \in U_2$, каждой из которых соответствует параметр P_{kl} – вероятность возврата, т. е. $\{(k, l), 0 < P_{kl} < 1\} \in U_2$. Отметим, что $U = U_1 \cup U_2$ и $U_1 \cap U_2 = \emptyset$ [6]. Каждой дуге возврата $(k, l) \in U_2$ ставится в соответствие подграф G_{kl} , который можно выделить двумя способами:

$$G_{kl} = \Gamma_l \cap \Gamma_k^{-1}, \quad (1)$$

$$G_{kl} = \Gamma_p \quad (2)$$

где Γ_l – транзитивное замыкание вершины l ; Γ_k^{-1} – обратное транзитивное замыкание вершины k [3].

Дуги графа описываются числами [3, 7]: T_{ij} – продолжительность дуги (i, j) , $i < j$; P_{ij} – вероятность возврата по дуге (i, j) , $i > j$; α_u – коэффициент изменения (как правило, уменьшения) продолжительности дуги u при доработке, $0 \leq \alpha_u \leq 1$.

Вероятности P_{ij} и коэффициенты α_u определяются с помощью экспертизы по методу индивидуальных экспертных оценок типа интервью.

Далее рассматриваются несколько типов событий с различными логическими возможностями. Для отображения альтернативных ситуаций на графе предлагается восемь типов вершин, причем альтернативы описываются вероятностями их реализации как независимыми, так и с учетом предшествующих решений [7]. Для ориентированного конечного графа $G(I, U)$ без контуров предполагается, что множество вершин I неоднородно. Часть вершин на входе и выходе реали-

Типы логически связанных событий

Тип события	Логическое отношение на входе	Логическое отношение на выходе
1	И ($\wedge$)	И ($\wedge$)
2	И ($\wedge$)	ИЛИ ($\vee$), $\sum P_u = 1, u \in U_x^-$
3	И ($\wedge$)	ИЛИ ($\vee$), $0 < P_u \leq 1, u \in U_x^-$
4	ИЛИ ($\vee$)	И ($\wedge$)
5	ИЛИ ($\vee$)	ИЛИ ($\vee$), $\sum P_u = 1, u \in U_x^-$
6	ИЛИ ($\vee$)	ИЛИ ($\vee$), $0 < P_u \leq 1, u \in U_x^-$
7	ИЛИ ($\vee$)	ИЛИ ($\vee$), $0 < P_u^v \leq 1, u \in U_x^-, v \in U_x^+$
8	ИЛИ ($\vee$)	ИЛИ ($\vee$), $\sum P_u^v = 1, u \in U_x^-, v \in U_x^+$

зует логическую операцию $\wedge$, предполагающую обязательное начало и окончание каждой работы (дуги) графа. Остальные вершины могут реализовать на входе и выходе логическую операцию $\vee$ в неисключающем и исключающем смысле. Неисключающее $\vee$ на выходе предполагает, что возможен возврат сразу в несколько событий или допускается выполнение нескольких работ из всего множества U_x^- . Неисключающее $\vee$ на входе означает, что событие свершается только в том случае, если из всех входящих в него работ получен результат хотя бы одной. Для исключающего $\vee$ на выходе событие считается свершенным, если возврат осуществляется только в одну вершину графа. Ситуации на входах и выходах событий отражены в таблице.

Алгоритмы имитационного моделирования на основе графов с возвратами

Имитационное моделирование позволяет исследовать поведение различных систем с учетом влияния случайных факторов. В модели с возвратами таким фактором является повторное выполнение определенного этапа работ, которое отражается в модели как случайное событие.

Для моделирования случайного события A , вероятность которого равна P_c , достаточно сформировать одно случайное число ξ , равномерно распределенное на интервале $[0,1]$. При попадании ξ в интервал $[0, P_c]$ считают, что событие A наступило, в противном случае – не наступило:

$$A = \begin{cases} 1, & \text{если } \xi \in [0, P_c], \\ 0, & \text{если } \xi \in [P_c, 1]. \end{cases} \quad (3)$$

В модели с возвратами число случайных событий определяется количеством возвратов.

Центральной процедурой алгоритмов расчета временных параметров графа является моделирование событий, исходы которых описываются вероятностями повторного выполнения определенных этапов работ [1, 7]. Пусть из вершины возможен возврат в предшествующие события $l_1, \dots, l_S$ и P_{rl_q} есть вероятность реализации дуги возврата (rl_q). В подмножестве дуг возврата, исходящих из одной вершины, возможны три случая:

- 1) возврат возможен сразу в несколько событий (вершина возврата типа «ИЛИ»);
- 2) возврат возможен лишь в одну вершину (вершина возврата типа «И»);
- 3) возвраты осуществляются последовательно.

В первом случае на параметры P_{rl_q} наложено одно ограничение: $P_{rl_q} < 1, q = 1, 2, \dots, S$ – и процедура розыгрыша возвратов осуществляется следующим образом. Вершине r ставится в соответствие последовательность равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$ случайных величин $\xi_1^r, \xi_2^r, \dots, \xi_S^r$, которые сравниваются с параметрами $P_{rl_1}, P_{rl_2}, \dots, P_{rl_S}$. При выполнении условия $\xi_q^r \leq P_{rl_q}$, $q = 1, 2, \dots, S$ происходит возврат в вершину l_q .

Во втором случае возвраты являются взаимоисключающими, и поэтому должно выполняться условие $\sum_{q=1}^S P_{rl_q} < 1$. Процедура моделирования взаимоисключающих возвратов заключается в следующем. Генерируется равномерно распределенное случайное число $\xi \in [0,1]$ и определяется q -й интервал из следующего условия:

$$\min_q (P_{rl_q} - \xi), \quad \xi \leq P_{rl_q}. \quad (4)$$

В третьем случае каждой дуге (r, l_q) ставится в соответствие равномерно распределенная на отрезке $[0, 1]$ случайная величина ξ_{r,l_q} . Если выполняется условие $\xi_{r,l_q} \leq P_{r,l_q}$, то реализуется возврат по дуге (r, l_q) . Величина T_i – раннее время наступления события i , – определяется по процедуре Форда [8], которая применяется поочередно для всех вершин графа. Если очередная вершина r является вершиной возврата, то после определения T_r производится розыгрыш дуг возврата по описанным правилам.

Пусть в результате имитационного эксперимента проведено N испытаний и получена следующая выборка $T_n^1, T_n^2, \dots, T_n^N$ случайной величины T_n – длительности процесса разработки (продолжительность критического пути рассматриваемого графа).

Определим выборочное среднее $\bar{M}(T_n)$ и выборочную дисперсию $\bar{\sigma}^2(T_n)$ по следующим формулам:

$$\bar{M}(T_n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_n^i; \quad (5)$$

$$\bar{\sigma}^2(T_n) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_n^i - \bar{M}(T_n))^2. \quad (6)$$

На основе полученной выборки строится гистограмма относительных частот, с помощью которой определяется частота попадания длины критического пути T_n в заданный интервал времени.

Кроме того, можно построить эмпирическую функцию распределения $F(T_n)$, значения которой позволяют прогнозировать выполнение работ к сроку T^* с вероятностью $F(T^*)$. Также можно оценить вероятность выполнения всех работ графа G при условии, что затраты времени на его реализацию не превысят директивной величины T^* .

В предположении нормального закона распределения можно построить доверительный интервал, который с заданной вероятностью покрывает исследуемый параметр, в данном случае продолжительность критического пути рассматриваемого графа, т. е. время производственного цикла изделия (или расхода ресурса в заданном объеме). Для рассматриваемой задачи:

$$P(|T_n - \bar{M}(T_n)| \leq \bar{\sigma}(T_n) \cdot u_{1-\alpha/2}) = 1 - \alpha, \quad (7)$$

или

$$P(\bar{M}(T_n) - u_{1-\alpha/2} \cdot \bar{\sigma}(T_n) \leq T_n \leq \bar{M}(T_n) + \bar{\sigma}(T_n) \cdot u_{1-\alpha/2}) = 1 - \alpha, \quad (8)$$

$$+ u_{1-\alpha/2} \cdot \bar{\sigma}(T_n)) = 1 - \alpha,$$

где T_n – длительность критического пути рассматриваемого графа или время освоения новой продукции; $\bar{M}(T_n)$ – выборочное среднее или математическое ожидание случайной величины T_n ; $\bar{\sigma}(T_n)$ – стандартное отклонение случайной величины T_n ; $u_{1-\alpha/2}$ – квантиль стандартного нормального распределения, который указывает, какая доля стандартного отклонения должна быть учтена, чтобы доверительный интервал покрыл исследуемый параметр с вероятностью $1 - \alpha$.

Сетевое моделирование хода выполнения работ по освоению новых изделий

Основной формой проявления случайных факторов в подготовке производства новых изделий являются конструкторские изменения. Изменения в отдельных элементах изделия, возникающие непосредственно в ходе его освоения, например, в результате согласования отдельных компонент, приводят к изменению всех или некоторых операций технологического процесса или к доработке заданного технологического процесса, т. е. к переделке работ. Поэтому при разработке исходного сетевого графика производства нового изделия повторение этапов и отдельных работ априорно задается в виде некоторых функций возвратов в определенных точках процессов. Имея такой график, можно выполнять моделирование и решать перечисленные ниже задачи.

Задача 1. Определение вероятности завершения работ к назначенному сроку. Известно, что $F_{N(m, \sigma^2)}(T^*) = \Phi\left(\frac{T^* - m}{\sigma}\right) = P(T_n < T^*) = \alpha$, $\Phi(u_\alpha) = \alpha$, где $\Phi()$ – функция стандартного нормального закона распределения, u_α – квантиль этого распределения уровня α .

Зная m, σ, T^* , находим величину $\frac{T^* - m}{\sigma}$, и по соответствующей таблице стандартного нормального распределения находим вероятность α .

Задача 2. Определение срока, за который с назначенной вероятностью будут завершены все работы.

Пусть T_n – случайная величина, подчиняющаяся нормальному закону распределения, продолжительность выполнения комплекса работ по созданию новой продукции; $m = \bar{M}(T_n)$ – математическое ожидание T_n ; $\sigma = \bar{\sigma}(T_n)$ – стандартное отклонение T_n ; T^* – заданный срок; α – заданная вероятность.

Имеем обратную задачу к задаче 1: в таблице стандартного нормального распределения по вероятности α находим соответствующий квантиль u_α : по формуле $\frac{T^* - m}{\sigma} = u_\alpha$ находим $T^* = m + u_\alpha \cdot \sigma$.

Задача 3. Определение стоимостных параметров графов с возвратами: определение суммарных затрат S на выполнение работ, описываемых сетевой моделью, с учетом возвратов на доработку. В этом случае

$$S = S_{OB} + S_{DOR}, \quad (9)$$

где S_{OB} – затраты на выполнение проекта без учета доработок; S_{DOR} – затраты на выполнение доработок

$$S_{OB} = \sum_{(i,j) \in U_1} S_{ij}, \quad (10)$$

где S_{ij} – затраты на выполнение работы (i, j) ; U_1 – множество дуг вида (i, j) , на которых заданы суммарные затраты S_{ij} .

Процедура моделирования используется для оценки величины S_{DOR} .

Пусть в l -м испытании реализуется дуга возврата (b, l) , это означает повторное выполнение работ подграфа G_{bl} , и, значит, затраты увеличиваются на величину Δ :

$$\Delta = \sum_{(i,j) \in G_{bl}} \alpha_{ij} \cdot S_{ij}, \quad (11)$$

где G_{bl} – подграф для повторного выполнения работ; α_{ij} – коэффициент изменения стоимости доработки дуги (i, j) .

Затраты по доработке с учетом проведения l -й реализации алгоритма вычисляются по формуле:

$$S_{DOR}^l = \sum_{(i,j) \in U_2} \sum_{(i,j) \in G_{bl}} \alpha_{ij} \cdot S_{ij}, \quad (12)$$

где S_{DOR}^l – затраты по доработке в l -й реализации алгоритма; U_2 – подмножество реализованных в l -м испытании дуг возврата.

Пусть проведено N испытаний и получено N значений $S: S_1, S_2, \dots, S_N$. На основании этих значений может быть построена эмпирическая функция распределения $F(S)$.

Отметим, что затраты по возвратам на доработку могут приниматься равными нулю. В общем случае дуга возврата (b, l) может порождать целый комплекс работ, не принадлежащих основному графу. Это легко учитывается в рассмотренных алгоритмах.

Вычислительный эксперимент проводится с использованием разработанного программного средства [3]. На рис. 1 показан пример сетевой модели создания сложного изделия. Информация о графе, представленном на рис. 1, вводится пользователем в виде списка дуг. Программа позволяет находить все перечисленные выше характеристики сетевой модели. Полученные данные могут быть представлены для пользователя в виде та-

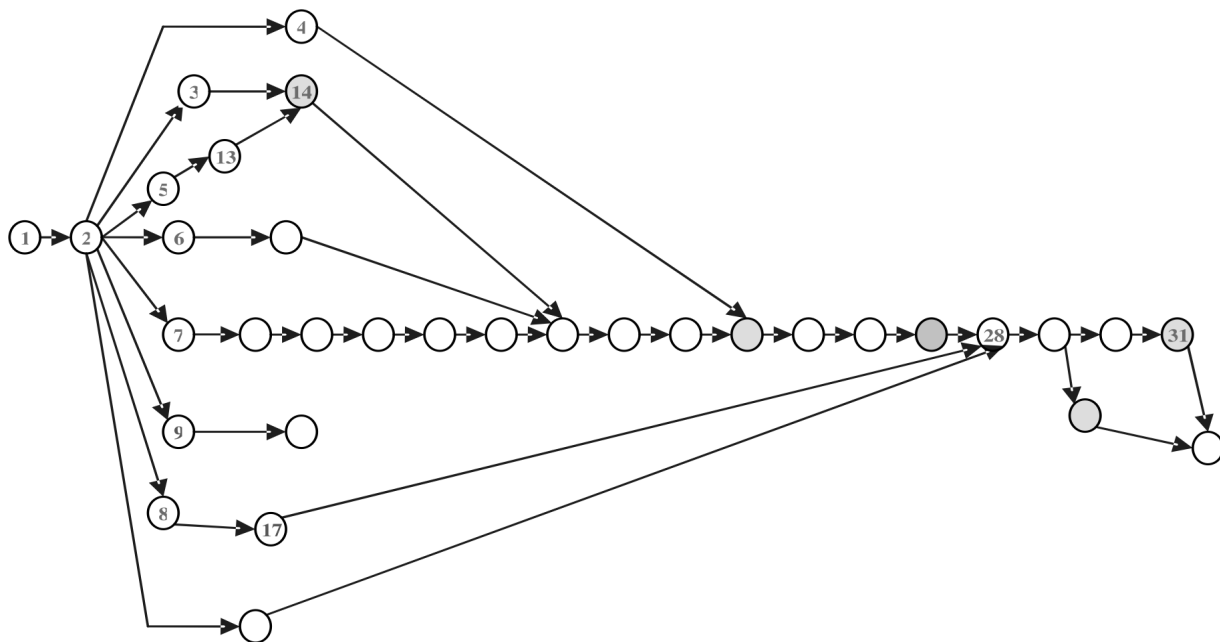


Рис. 1. Пример сетевого графика разработки сложного изделия

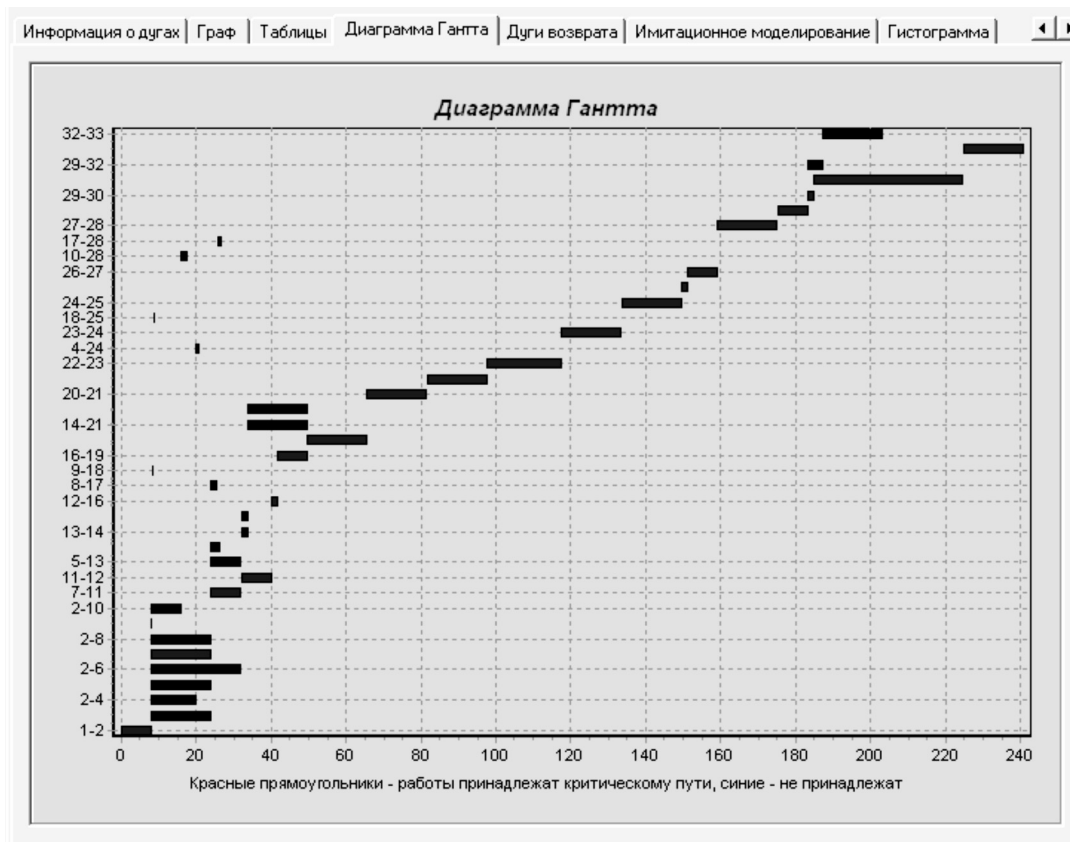


Рис. 2. Диаграмма Гантта проекта создания сложного изделия

блиц. Кроме того, может быть построен график Гантта, как показано на рис. 2.

Информация о дугах возврата вводится с экрана в виде таблицы. Данные эксперимента обрабатываются и представляются в виде численных оценок математического ожидания, дисперсии, среднего квадратического отклонения, а также минимального и максимального значений параметров. Может быть построена гистограмма относительных частот (рис. 3).

По результатам модельного эксперимента выдается следующая информация:

- 1) перечень дуг, увеличивающих продолжительность критического пути заданного графа разработки сложного изделия;
- 2) перечень дуг с типом возврата «И», увеличивающих продолжительность критического пути;
- 3) перечень дуг с типом возврата «ИЛИ», увеличивающих продолжительность критического пути;
- 4) эмпирическая функция распределения $F(T_n)$ для случайной величины T_n — продолжи-

тельность критического пути рассматриваемого графа;

5) ответ о совпадении эмпирической функции распределения с нормальным распределением;

6) интервальная оценка стоимости выполнения всего комплекса работ по производству изделия.

Кроме того, вычисляются оценки следующих параметров:

- оценка длительности проекта при заданной вероятности завершения всех работ этого проекта;
- оценка вероятности завершения всех работ проекта при условии, что затраты времени на его реализацию составят заданную величину.

Применение технологии сетевого моделирования позволяет экспериментально исследовать процессы разработки сложных изделий:

рассчитать временные параметры графов с возвратами для произвольного объекта с учетом изменений как внешней среды, так и внутренних факторов, возникающих при освоении новой продукции;

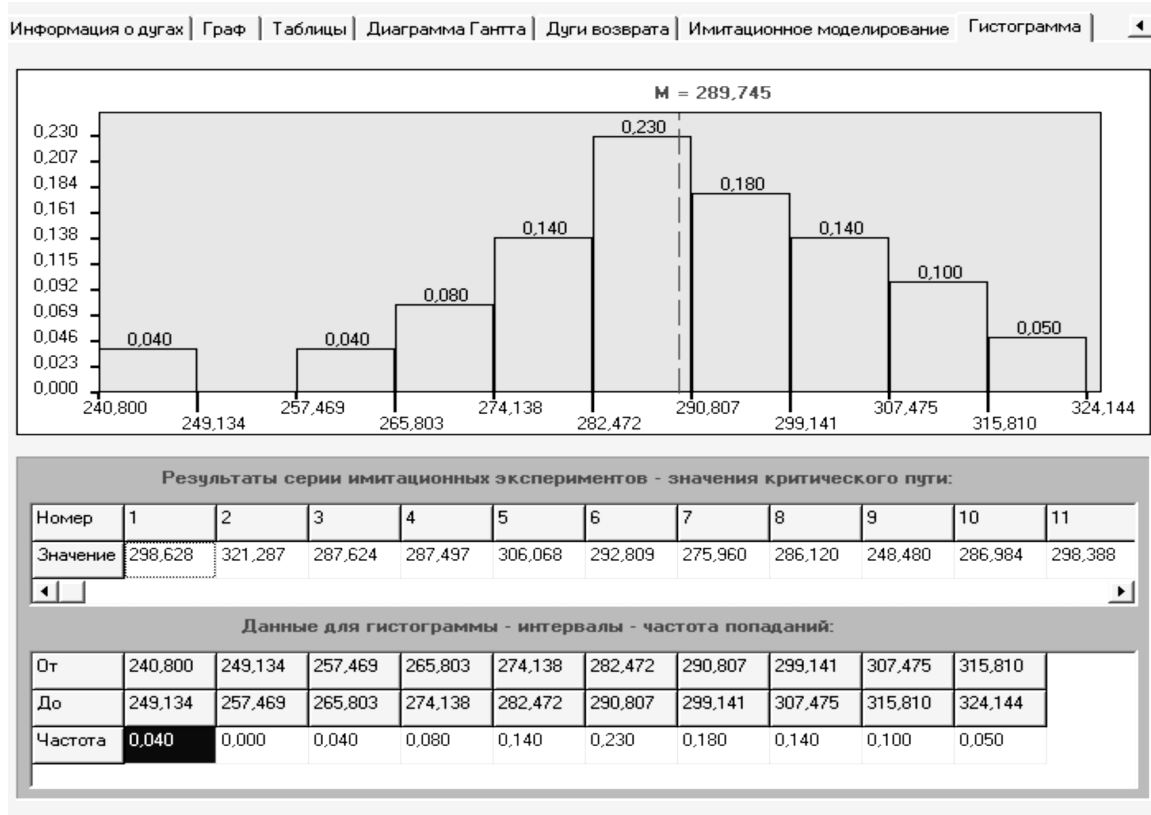


Рис. 3. Гистограмма относительных частот

выявить возвраты и соответствующие факторы, наиболее сильно влияющие на удлинение сроков освоения новой продукции;

получить различные формы графического представления проекта;

осуществить многовариантные расчеты, т. е. рассмотреть большое число альтернатив при производстве новой продукции;

обеспечить возможность выявления резервов времени по ходу освоения новых изделий;

моделировать затраты на освоение нового изделия с учетом изменения сроков выполнения производственного цикла, а также с учетом изменения стоимости ресурсов.

Дальнейшее применение изложенных моделей и алгоритмов осуществляется в рамках системы моделей-эталонов [9]. Разработка универсальных сетевых моделей-эталонов предметной области позволит сократить затраты на разработку соответствующего программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабкова, Е.В.** Модельные эксперименты на графах с возвратами в АРМ руководителя службы механообрабатывающего производства [Текст] / Е.В. Бабкова // Принятие решений в условиях неопределенности: Межвуз. науч. сб. –Уфа: УГАТУ, 1996. –С. 99–106.
2. **Бабкова, Е.В.** Технология моделирования на графах с возвратами [Текст] / Е.В. Бабкова // Принятие решений в условиях неопределенности: Межвуз. науч. сб. –Уфа: УГАТУ, 2000. –С. 192–202.
3. **Бабкова, Е.В.** Система расчета параметров графа с различными типами возвратов [Текст] / Е.В. Бабкова, О.М. Верхотурова // Свид. об офиц. регистр. программы для ЭВМ № 2006613035 от 31.08.2006.
4. **Берж, К.** Теория графов и ее применения [Текст] / К. Берж. –М.: Иностранная лит-ра, 1962. –320 с.
5. **Маркова, В.Д.** Стратегический менеджмент [Текст] / В.Д. Маркова, С.А. Кузнецова. –Новосибирск: Наука, 2002. –320 с.
6. **Мироносецкий, Н.Б.** Анализ сложных систем, описываемых стохастическими графами [Текст] / Н.Б. Мироносецкий // Моделирование производственных процессов. –Новосибирск: ИЭ и ОПП СО АН СССР, 1977. –С. 24–29.
7. **Мироносецкий, Н.Б.** Моделирование процессов создания и выпуска новой продукции [Текст] / Н.Б. Мироносецкий. –Новосибирск: Наука, 1976. –166 с.



8. **Форд, Л.** Потоки в сетях [Текст] / Л. Форд, Д. Фалкерсон. – М.: Мир, 1966. – 277 с.

9. **Юсупова, Н.И.** Управление распределением

ресурсов в сложных системах на основе моделей-эталонов [Текст] / Н.И. Юсупова, Е.В. Бабкова // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т.13. – № 2(35). – С. 33–38.

УДК 681.3.06

Макарова Е.А.

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Актуальность проблемы проведения исследований в области прогнозирования и стратегического планирования развития национальной экономики связана с особенностями современных условий мирового экономического развития, характеризующихся высокой степенью динамизма, нелинейностью протекающих процессов, а также наличием ресурсных ограничений [1]. Одно из направлений исследований в решении этой проблемы – разработка модельных комплексов и программных инструментариев, предназначенных для поддержки принятия решений на макроэкономическом уровне и основанных на интеллектуальных технологиях и имитационном моделировании [1–5].

С целью обеспечения поддержки процедур анализа процессов управления макроэкономической системой (МЭС) ведется разработка системы имитационного моделирования и интеллектуального управления (СИМИУ) воспроизводственным процессом МЭС в неравновесных рыночных условиях [6–8]. В составе СИМИУ выделены три взаимосвязанных компонента: система имитационного моделирования, система аналитической поддержки и система интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении воспроизводственным процессом МЭС.

В статье рассмотрены вопросы построения третьего компонента, связанные с разработкой метода формирования интеллектуальных алгоритмов управления МЭС, которые представлены правилами классификации макроэкономических ситуаций и принятия решений, полученными на основе имитационного моделирования, нейросетевых технологий и инженерии знаний [5, 7].

Цель управления воспроизводственным процессом МЭС как сложным динамическим объектом управления (ДОУ) – обеспечение плановых темпов выпуска ВВП $\dot{Y}^0$ и расхода ресурсов всеми секторами при условии соблюдения требуемых воспроизводственных пропорций, уровней инфляции и безработицы. В работе описаны общие пропорции воспроизводства, которые определяются соотношением долей потребления, накопления и госрасходов в ВВП, рассчитанном по расходам [9]. Исследованы два типа количественных соотношений: потребительски-ориентированный (большая доля потребления в темпе выпуска ВВП – до 60–70 %) и инвестиционно-ориентированный (значительная доля инвестиций в темпе выпуска ВВП – до 40 %).

С позиций управления взаимодействие динамических моделей воспроизводственного процесса МЭС и интеллектуальных алгоритмов классификации и принятия решений реализуется в виде трехуровневой структуры системы управления. *Первый уровень управления* содержит контуры управления расходами ресурсов секторов экономики, построенные на основе принципа обратной связи.

Второй уровень управления включает контуры управления, построенные на основе принципа адаптации и предназначенные для корректировки плановых темпов расхода ресурсов секторами МЭС на основе информации о состоянии макроэкономических рынков и объемах накопленных запасов [7]. Формирование вектора управляющих воздействий $U_{ri}(t)$ для i -го сектора МЭС (реального сектора; сектора домохозяйств и секторов

финансовых или государственных учреждений) основано на информации об объемах накопленных запасов $St_i(t)$ с учетом неприкосновенной части $\delta_i(t)$ и заданного интервала времени Δt_i^0 , на который планируется запас. Управление предполагает корректировку плановых темпов расхода ресурсов $\dot{R}_i^0(t)$, необходимых для выполнения основных функциональных процессов i -м сектором. Особенность управления на этом уровне состоит в том, что выполняется либо пропорциональное уменьшение плановых темпов расходов ресурсов сектора, либо последующее за уменьшением увеличение их в пределах первоначального плана. Правила, по которым происходит корректировка темпов расхода ресурсов для каждого i -го сектора, являются динамическими, работают в режиме модельного времени и представлены в виде системы продукций:

R1: ЕСЛИ $\dot{R}_i^0(t) \geq (St_i(t) - \delta_i(t)) / \Delta t_i^0$,

ТО $\dot{R}_{cor\ i}^0(t) = (St_i(t) - \delta_i(t)) / \Delta t_i^0$ И

$$k_{ci}(t) = \dot{R}_{cor\ i}^0(t) / \dot{R}_i^0(t);$$

R2: ЕСЛИ $\dot{R}_i^0(t) < (St_i(t) - \delta_i(t)) / \Delta t_i^0$,

ТО $\dot{R}_{cor\ i}^0(t) = \dot{R}_i^0(t)$ И $k_{ci}(t) = 1$.

В правилах выполняется расчет скорректированного планового темпа расхода ресурсов $\dot{R}_{cor\ i}^0(t)$ и коэффициента k_{ci} , значение которого требуется для замыкания контура управления i -м сектором в структурной схеме модели. Правила представлены в процедурной форме и реализованы на языке *MATLAB* в виде *m*-файлов, встроенных в имитационную модель МЭС [5, 7]. Алгоритмы управления нижнего уровня работают в автоматическом режиме и обеспечивают гибкую корректировку плановых темпов расхода ресурсов в пределах заранее рассчитанного плана. Перерасчет самих планов должен выполняться на основе анализа большого количества данных о состоянии МЭС. Эти решения, а также решения, связанные с мерами государственного регулирования экономики, принимаются на верхнем (третьем) уровне управления.

Третий уровень управления построен на основе принципа ситуационного управления, включает блок анализа макроэкономических ситуаций и блок поддержки принятия решений (ПР). Блок анализа ситуаций предназначен для решения задачи многопараметрического анализа макро-

экономических ситуаций на динамически неравновесных режимах функционирования МЭС с помощью нейросетевых технологий на базе нейронных сетей (НС) Кохонена.

Предлагается решение следующей цепочки задач с использованием НС Кохонена: кластеризации динамически неравновесных ситуаций $\{Sit_{neq\ i}\}$ и динамически равновесных ситуаций $\{Sit_{eq\ i}\}$ в многомерном пространстве управляемых координат МЭС; формирования правил классификации динамически неравновесных и динамически равновесных ситуаций на основании визуального анализа самоорганизующихся карт (СОК) и анализа статистических данных по построенным кластерам; формирования областей кластеров: очень благоприятных, плановых, умеренно неблагоприятных, очень неблагоприятных (зон риска); выявления причин возникновения неблагоприятных ситуаций; формирования сценариев развития ситуаций. Особенность решения этих задач состоит в «подключении» НС Кохонена в процессе проведения имитационного эксперимента в такие моменты времени, которые являются важными с позиций анализа и принятия решений, в распознавании текущей ситуации на основе обученных НС Кохонена и визуализации текущей ситуации на СОК для поддержки ЛПР при выполнении им аналитических функций.

Блок поддержки принятия решений выполняет функции формирования множеств рекомендуемых решений для каждого построенного кластера макроэкономических ситуаций.

Сформированы множества управляющих $U(t)$, управляемых $Y(t)$ координат и внешних воздействий $F(t)$ для описания МЭС как ДООУ. Множество управляющих координат представлено кортежем векторов, относящихся к мерам фискальной и монетарной политик.

Разработан метод формирования интеллектуальных алгоритмов классификации ситуаций и принятия решений для верхнего уровня управления МЭС, который включает следующие этапы (рис. 1).

На этапе 1 составляется план проведения экспериментов. На этапе 2 определяется множество моментов времени $T = \{t_{j1}\}$, $j_1 = 1, l$, в которые производится сохранение значений элементов векторов управляемых координат $Y(t)$ из рабочей области среды *MATLAB*. Из элементов этих векторов предварительно формируется множество

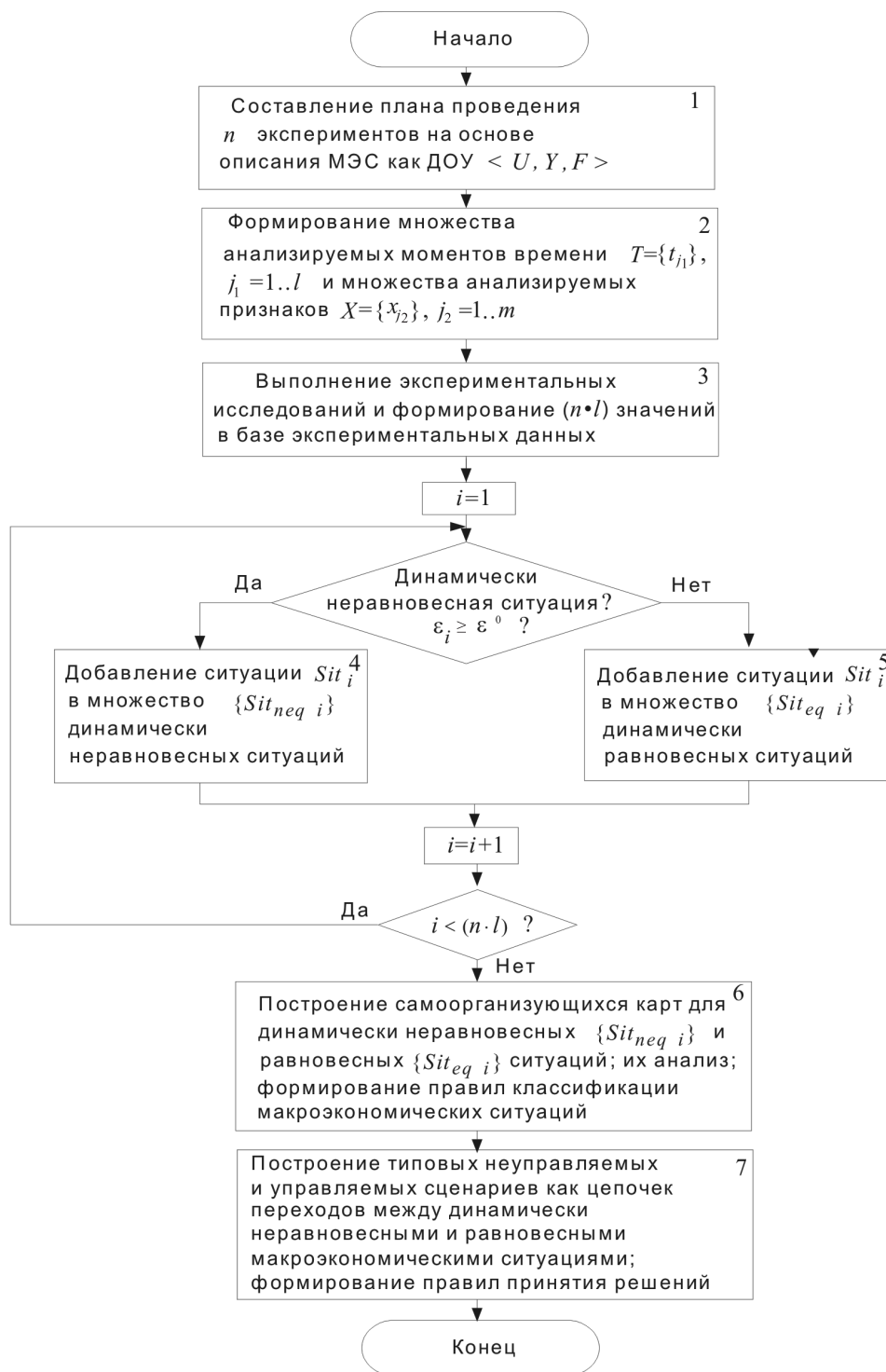


Рис. 1. Этапы формирования правил классификации ситуации и принятия решений по управлению МЭС

$X = \{x_{j_2}\}$, $j_2 = \overline{1, m}$ признаков, участвующих в нейросетевом анализе. С позиций анализа динамики МЭС в составе множества X выделены три группы признаков: во-первых, темпы формиро-

вания расходов ресурсов (финансовые потоки); во-вторых, это объемы финансовых ресурсов (запасы); и, в-третьих, это времена наступления особых событий (например, времена T_i^+ и T_i^- начала

значительного роста и значительного снижения запасов i -го сектора).

На *этапе 3* ведется заполнение базы экспериментальных данных (БЭД) при проведении экспериментальных исследований с имитационной моделью МЭС. Для каждого эксперимента хранятся следующие данные о состоянии МЭС в l контрольных моментах времени: элементы кортежа векторов управляемых координат $Y(t)$; дополнительная информация в виде элементов векторов возмущающих воздействий $F(t)$, а также элементы вектора $Y^0(t)$ плановых значений управляемых координат. Несмотря на то, что дополнительная информация не используется при обучении НС, она необходима на последующих этапах при определении причин возникновения неблагоприятных ситуаций в динамике для формирования правил принятия решений. Выполняются n экспериментов, в каждом из которых определены l моментов времени для записи информации о состоянии МЭС. В БЭД заносится $(n \cdot l)$ записей, среди которых находятся динамически равновесные и неравновесные ситуации.

Следующие *этапы 4 и 5*, выполняемые многократно в цикле, предназначены для формирования множеств $\{Sit_{neq\ i}\}$ динамически неравновесных и $\{Sit_{eq\ i}\}$ динамически равновесных ситуаций. Фильтрация производится по условию превышения рассогласования $\varepsilon_i(t)$ между совокупным спросом Ad и совокупным предложением As заданного предела $\varepsilon_i^0(t)$ для каждой i -й ситуации (записи БЭД).

Этап 6 предназначен для построения самоорганизующихся карт для динамически неравновесных ситуаций $\{Sit_{neq\ i}\}$ и динамически равновесных ситуаций $\{Sit_{eq\ i}\}$, а также для проведения их анализа. Данный этап нуждается в детализации, т. к. именно здесь и происходит формирование продукционных правил классификации ситуаций.

На *этапе 6.1* происходит формирование множеств X_{neq} признаков для динамически неравновесных и X_{eq} для динамически равновесных ситуаций. Производится уточнение этих множеств признаков путем исключения признаков, не обладающих дискриминантной силой, при этом используются методы многомерного статистического анализа [10]. Задается предполагаемое количество будущих кластеров динамически неравновесных n_{neq} и динамически равновесных n_{eq} ситуаций.

На *этапе 6.2* производится построение СОК для динамически неравновесных ситуаций. Для этого выполняется обучение НС Кохонена и осуществляется визуализация СОК. Отметим, что количество карт равно количеству признаков. Далее производится предварительный анализ построенных кластеров; при этом анализируется цветовая гамма изменения признаков на картах. Анализ выполняется с двумя целями. Во-первых, это выявление признаков, которые должны принимать участие в формировании правил классификации, и, во-вторых, это уточнение количества кластеров, поэтому возможен возврат на этап 6.1.

На *этапе 6.3* производится формирование продукционных правил классификации для построенных кластеров динамически неравновесных ситуаций. *Этапы 6.4, 6.5 и 6.6* повторяют описанную выше последовательность шагов, но при этом формируются классы динамически равновесных ситуаций с учетом типов воспроизводственных пропорций.

На *этапе 7* сначала формируется множество возможных переходов вида $N_{eq\ i} \rightarrow N_{eq\ j}$ от одного динамически равновесного состояния $N_{eq\ i}$ к другому динамически равновесному состоянию $N_{eq\ j}$, где N – номер кластера. При формировании типовых переходов необходимо учитывать типы воспроизводственных пропорций и возможность перехода от одной ситуации с одним типом воспроизводственных пропорций к ситуации с другими пропорциями с учетом возможных изменений темпа выпуска ВВП. Например, переход от худшей ситуации с потребительски-ориентированной пропорцией к лучшей того же типа возможен только через кластер с инвестиционно-ориентированным типом пропорции.

Затем исследуются неравновесные режимы при неуправляемом поведении МЭС в возмущенной среде, определяются возможные причины нарушения динамически равновесного состояния $N_{eq\ i}$, которые вызывают определенные типы (классы) динамически неравновесных ситуаций $\{N_{neq\ k}^F\}$. Развитие динамически неравновесных ситуаций во времени при отсутствии управлений неизбежно приводит к новой динамически равновесной ситуации $N_{eq\ j}$, которая является более благоприятной, чем $N_{eq\ i}$. Формируются множества переходов вида $N_{eq\ i} \rightarrow \{N_{neq\ k}^F\} \rightarrow N_{eq\ j}$ между динамически равновесными и неравновесными ситуациями, возникшими под воздействием возмущений $F(t)$.

И, наконец, применяются управляющие воздействия $U(t)$, которые приводят к появлению новых динамически неравновесных ситуаций $\{N_{neq\ m}^U\}$. В результате формируются цепочки переходов $N_{eq\ j} \rightarrow \{N_{neq\ m}^U\} \rightarrow N_{eq\ l}$, где $N_{eq\ l}$ является более благоприятной макроэкономической ситуацией по сравнению с ситуацией $N_{eq\ j}$, улучшенной в результате управления.

Из перечисленных типовых переходов формируются типовые сценарии неуправляемых и управляемых процессов функционирования МЭС в виде цепочек переходов между кластерами динамически равновесных и неравновесных ситуаций. Сценарий представляет собой интегральную траекторию движения системы во времени, которая позволяет ЛПР получить обобщенную оценку тенденций в поведении системы. Это особенно важно, поскольку анализировать большое количество графиков изменения координат производственного процесса МЭС во времени не представляется возможным. Отметим, что возможны как последовательные, так и параллельные пути перехода из одной динамически равновесной ситуации в другую через несколько динамически неравновесных ситуаций (рис. 2).

Несмотря на то, что в реальности один динамически неравновесный режим сменяет другой, целесообразно исследовать сначала типовые (базовые) сценарии, когда чередуются динамически равновесные и неравновесные режимы. Другие, более сложные типы сценариев, могут быть исследованы тогда, когда уже изучены базовые сценарии.

На основе анализа построенных сценариев формируются правила ПР по ликвидации возникших неблагоприятных ситуаций. Для этого предлагается проводить анализ дополнительной информации о состоянии процесса, т. е. признаков, которые не участвовали в обучении НС. Цель такого анализа заключается в поиске причин возникновения неблагоприятных ситуаций по каждому кластеру. Для этого используется, как правило, статистика по кластеру. В качестве дополнительной информации о функционировании секторов МЭС рассматривается статистическая информация по элементам векторов возмущающих воздействий $F_i(t)$ для каждого i -го сектора и управляющих воздействий. Выявление причин отклонения текущей ситуации от желаемой позволяет сформировать множество решений, которые направлены на ликвидацию причин и представ-

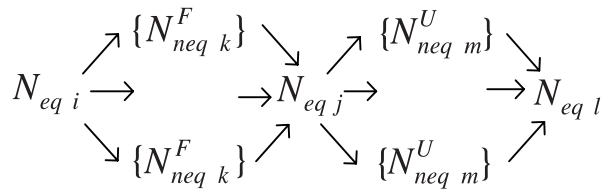


Рис. 2. Вид сценария как цепочки переходов между динамически равновесными и динамически неравновесными ситуациями

лены с помощью продукционных правил в виде указаний качественных изменений управляющих координат.

Проведены экспериментальные исследования функционирования МЭС в условиях действий возмущений, сформирована БЭД, построены две НС Кохонена – для динамически равновесных и неравновесных ситуаций. В качестве примера приведен анализ нескольких кластеров для СОК динамически неравновесных и для СОК динамически равновесных ситуаций, построены сценарии неуправляемого и управляемого поведения МЭС, сформированы правила классификации и ПР, на основе которых реализована экспертная система в среде *Resolver* [4].

Для анализа классов динамически неравновесных ситуаций производственного процесса МЭС сформирован вектор X_{neq} входных признаков для НС, включающий темпы формирования сальдо финансовых потоков секторов $\{Fl_i\}$, $i = 1, 4$, объемы запасов секторов $\{St_i\}$, $i = 1, 4$, а также темпы формирования инвестиций $\dot{I}$, оплаты труда $\dot{R}l$, потребления $\dot{C}$, сбережения $\dot{S}$, государственных закупок $\dot{G}$, совокупного спроса $\dot{Ad}$ и предложения $\dot{As}$. Построены девять кластеров ($n_{neq} = 9$) неравновесных ситуаций.

Кластер 1_{neq} является плановым и включает в себя неравновесные ситуации, близкие к области планового состояния, но с незначительными отклонениями по сальдо потоков $\dot{Fl}_i$. Решения не требуются.

Кластеры 7_{neq} и 4_{neq} соответствуют неравновесным состояниям МЭС, связанным с нарушением баланса темпов притоков и оттоков для основного контура «производство-потребление» ($\dot{R}l - \dot{C}$).

Кластер 7_{neq} включает ситуации, характеризующиеся снижением фактического темпа $\dot{C}$ потребления, накоплением запасов у населения «в чулке», снижением доходов предприятий реального сектора. Остальные два контура, форми-

рующие утечки в виде сбережений для сектора 3 финансовых учреждений и налогов для сектора 4 государственных учреждений, функционируют по-прежнему [7]. Анализ всех карт признаков и статистики по кластерам позволил найти причину нарушения баланса, которая заключается в изменении потребительских ожиданий, что отражается в модели снижением автономного потребления $\dot{C}_a^0$. Если своевременно принять решение, то потери выпуска ВВП будут не такими значительными. Рекомендуемое множество решений – $U_{\dot{C}}^{IF}(\dot{R}l - \dot{C})$, направленных на стимулирование потребления $\dot{C}$. Обозначения множества решений предполагают, что в скобках указан контур, на который оказывается воздействие; нижний индекс указывает изменяемый фактор; верхний индекс соответствует значению изменяемого фактора (M – поддержание планового режима, IF – небольшое увеличение, I – увеличение, IM – значительное увеличение, DF – небольшое уменьшение, D – уменьшение, DM – значительное уменьшение).

Кластер 4_{neq} включает ситуации ажиотажного спроса, которые приводят к росту доходов и запасов предприятий реального сектора и снижению запасов домохозяйств. Другие два контура модели пока сильно не реагируют. Рекомендуемое множество правил принятия решений – $U_{\dot{Y}}^{IF}(\dot{R}l - \dot{C})$, направленных на стимулирование производства $\dot{Y}$.

Кластер 6_{neq} включает динамически неравновесные ситуации, соответствующие снижению оплаты труда $\dot{R}l$ и вызванные либо задержками в оплате труда, либо низкой долей оплаты труда в ВВП. Такие ситуации приводят к кратковременному превышению доходов реального сектора над его расходами, т. е. к росту его запасов. При этом начинает страдать население, снижаются его запасы. Пока в такой ситуации отреагировал только основной контур «производство–потребление», даже потребление еще не снизилось. Но наличие такого типа неравновесной ситуации уже свидетельствует о необходимости своевременного принятия решений, пока не затронуто поведение других секторов МЭС. Рекомендуемое множество решений – $U_{\dot{R}l}^{IF}(\dot{R}l - \dot{C})$, направленных на повышение доходов населения с целью увеличения потребления.

Кластер 5_{neq} свидетельствует о нарушениях в контуре «инвестиции–сбережения» $\dot{S} - \dot{I}$, связанных с возникшим снижением сбережений,

сигнализирует о необходимости срочного принятия решений до возникновения кризисной ситуации при возможном распространении влияния возмущения на основной контур «производство–потребление», что может вызвать снижение выпуска ВВП и последующую рецессию МЭС в целом. Рекомендуемые решения – $U_{\dot{I}}^{IF}(\dot{S} - \dot{I})$, направленные на улучшение инвестиционного климата и стимулирование сбережений.

Для анализа классов динамически равновесных ситуаций разработана вторая НС Кохонена. Определено количество кластеров $n_{eq} = 7$ динамически равновесных ситуаций на основе предположения о том, что исследуются два типа воспроизводственных пропорций на разных уровнях темпа выпуска ВВП. Ниже представлена краткая характеристика кластеров.

Кластер 2_{eq}^{C0} (рис. 3) включает ситуации, характеризующиеся потребительски-ориентированной воспроизводственной пропорцией. В нем находятся ситуации, соответствующие темпам выпуска ВВП, близким к плановому. *Кластер 0_{eq}^{G0}* относится к этому же типу кластеров, но с немного большим участием государства (госзакупки $\dot{G}$). *Кластер 6_{eq}^{C*}* относится к ситуациям с потребительски-ориентированным типом пропорций, но только с более низким уровнем темпа выпуска ВВП $\dot{Y}$. Символ «*» свидетельствует об умеренном ухудшении ситуации. *Кластер 1_{eq}^{I0}* относится к кластерам ситуаций с инвестиционно-ориентированным типом пропорций при условии, что темп выпуска ВВП близок к плановому. *Кластер 4_{eq}^{I*}* также включает ситуации с инвестиционно-ориентированным типом пропорций, но в умеренно неблагоприятных условиях снижения темпа выпуска ВВП. *Кластер 5_{eq}^{**}* включает ситуации со значительным снижением темпа выпуска ВВП $\dot{Y}$, которые являются очень неблагоприятными. Тип воспроизводственной пропорции в этом случае не важен. *Кластер 3_{eq}^{C0}* объединяет ситуации более благоприятные, чем плановые, с потребительски-ориентированным типом пропорции.

Примеры возможных траекторий движения МЭС в виде цепочки кластеров равновесных ситуаций $N_{eq\ i} \rightarrow N_{eq\ j}$ представлены на рис. 3, где переходы от благоприятных ситуаций к неблагоприятным под влиянием возмущений изображены сплошной линией; а переходы от менее благоприятных ситуаций к более благоприятным в результате применения управляющих воздействий пред-

ставлены штриховой линией. При составлении этих траекторий соблюдается правило: переход от неблагоприятной ситуации с потребительски-ориентированной пропорцией к благоприятной того же типа возможен только через кластер 1_{eq}^{i0} с инвестиционно-ориентированным типом пропорции. По этой причине переход к ситуациям кластера 3_{eq}^{c0} возможен только через кластер 1_{eq}^{i0} . На основе построенных траекторий движения МЭС на множестве равновесных ситуаций строятся траектории неуправляемого и управляемого движения МЭС на множестве неравновесных ситуаций в виде цепочек переходов между динамически равновесными и динамически неравновесными ситуациями.

Пример траектории неуправляемого поведения МЭС под воздействием возмущений $F(t)$ с переходами типа $N_{eq i} \rightarrow \{N_{neq k}^F\} \rightarrow N_{eq j}$ от кластера плановых ситуаций 2_{eq}^{c0} к кластеру очень неблагоприятных ситуаций 5_{eq}^{**} представлен на рис. 4. Пример траектории управляемого поведения МЭС в виде цепочки переходов типа $N_{eq j} \rightarrow \{N_{neq m}^U\} \rightarrow N_{eq l}$ от кластера очень неблагоприятных ситуаций 5_{eq}^{**} к плановым ситуациям кластера 2_{eq}^{c0} представлен на рис. 5.

Все этапы предложенного метода формирования правил классификации ситуаций и ПР выполняются с использованием приложений *Simulink* среды *MATLAB*, платформы *Deductor*, среды *Resolver*, а также с помощью разработанной программы нейросетевого анализа динамики поведения сложных систем [5, 7, 8].

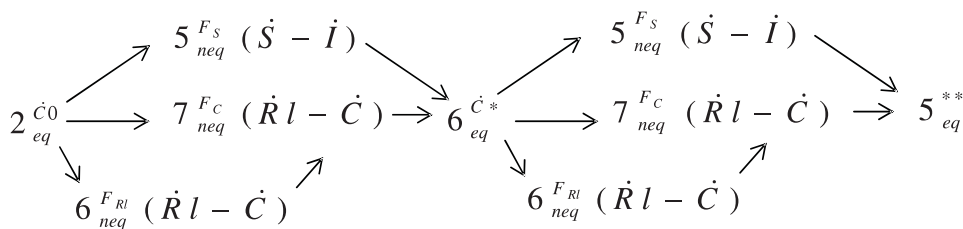


Рис. 4. Пример траектории неуправляемого движения МЭС в виде цепочки кластеров

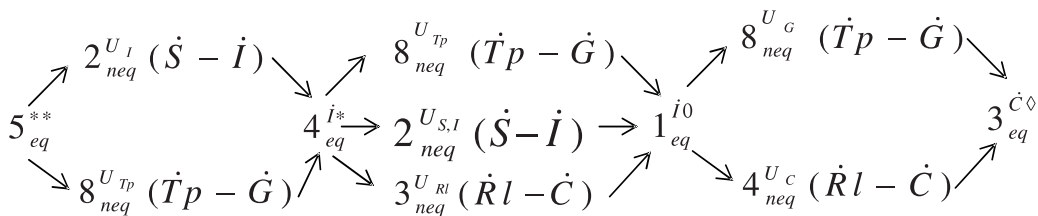


Рис. 5. Пример траектории управляемого движения МЭС в виде цепочки кластеров

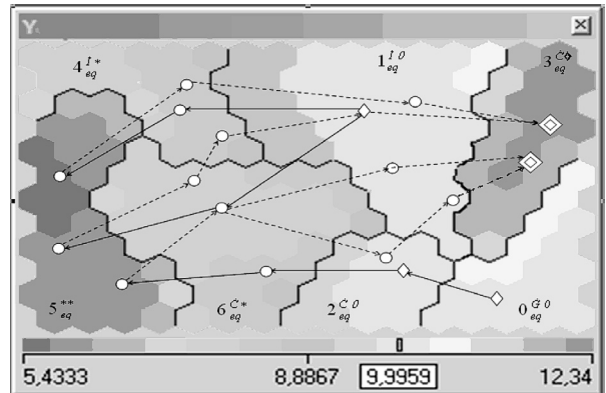


Рис. 3. Примеры траекторий движения МЭС на самоорганизующихся картах
(-----) – управляемые сценарии;
(—) – неуправляемые сценарии

Таким образом, разработанный метод формирования интеллектуальных алгоритмов управления воспроизводственным процессом МЭС предполагает, во-первых, последовательное проведение многопараметрического анализа классов динамически равновесных и неравновесных ситуаций на основе нейронных сетей Кохонена и формирование правил классификации ситуаций; и, во-вторых, формирование правил принятия решений и сценариев неуправляемого и управляемого поведения МЭС в виде цепочек переходов во времени между кластерами динамически равновесных и динамически неравновесных ситуаций с указанием возмущающих и управляющих воздействий. Разработанная СИМИУ воспроизводственным процессом МЭС позволяет выпол-

нять процедуры имитационного моделирования и поддержки принятия решений при проигрывании различных сценариев управления МЭС, обе-

спечивая взаимодействие во времени нейронных сетей, экспертной системы и имитационных моделей воспроизводственного процесса МЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз и моделирование кризисов и мировой динамики [Текст]/Отв. ред. А.А. Акаев, А.В. Коротаев, Г.Г. Малинецкий. –М.: Изд-во ЛКИ, 2010. –352 с.
2. Волкова, В.Н. Теория систем и системный анализ: Учебник для вузов [Текст]/В.Н.Волкова, А.А.Денисов. –М.: ЮРАЙТ, 2010. –679 с.
3. Макаров, В.Л. Применение вычислимых моделей в государственном управлении [Текст]/В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, С.С. Сулакшин. –М.: Научный эксперт, 2007. –304 с.
4. Петров, А.А. Математические модели экономики России [Текст]/А.А. Петров, И.Г. Поспелов//Вестник РАН. –2009. –Т. 79 –№ 6. –С. 492–506.
5. Гаврилова, Т.А. Интеллектуальные технологии в менеджменте: инструменты и системы: Учеб. пособие [Текст]/Т.А. Гаврилова, Д.И. Муромцев. –СПб.: Изд-во «Высшая школа менеджмента», 2008. –2-е изд. –488 с.
6. Макарова, Е.А. Программный комплекс для формирования базы экспериментальных данных по

результатам имитационного моделирования [Текст] / Е.А.Макарова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2009. –№ 6. –С.85–88.

7. Ильясов, Б.Г. Нейросетевые технологии в управлении динамикой инвестиционных процессов [Текст] / Б.Г. Ильясов, Е.А. Макарова // Вестник компьютерных и информационных технологий. –2008. –№ 8. –С. 16–26.

8. Ильясов, Б.Г. Интеллектуальная информационная система поддержки процедур управления воспроизводственным процессом [Текст] / Б.Г. Ильясов, Е.А. Макарова, А.Н. Павлова // Программные продукты и системы. –2010. –№ 1. –С. 88–90.

9. Курс экономической теории: Учебник [Текст] / Под общ. ред. д.э.н., проф. А.В. Сидоровича. –М.: Дело и сервис, 2008. –1040 с.

10. Кохонен, Т. Самоорганизующиеся карты [Текст] / Т.Кохонен; пер. англ. –М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. –3-е изд. –655 с.

УДК 681.2.084

В.А. Сушников

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОЙ АСИММЕТРИИ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ РАМОЧНОГО ТИПА

В современных сило- и весоизмерительных системах высокой точности (с погрешностью измерения в диапазоне 0,01÷0,1 %) используются преимущественно тензодатчики силы. В таких датчиках сила тяжести, пропорциональная измеряемой массе m , воздействует на упругий элемент (УЭ). Восприятие деформации упругого элемента осуществляется с помощью нескольких тензорезисторов, включенных в мостовую измерительную цепь. Изменение сопротивлений тензорезисторов R_i , где i – номер тензорезистора, вызванное деформациями УЭ в точках их установки, преобразуется мостовой цепью в электрическое напряжение, пропорционально измеряемой массе m . Мостовая схема позволяет существенно увеличить чувствительность датчика и снизить его

систематические погрешности, вызванные влиянием температуры, нелинейностью уравнения преобразования упругого элемента и тензорезисторов [1], технологическими допусками при изготовлении УЭ и установке тензорезисторов [2], внецентренным расположением массы на грузоприемной платформе [3] и т. д.

Однако следует отметить, что упомянутые выше свойства мостовой цепи могут быть реализованы в полной мере лишь при условии достаточно строгой симметрии каналов преобразования $R_i(m)$. Необходимое условие решения этой задачи – установка тензорезисторов в зонах УЭ, испытывающих при нагружении датчика равные по модулю, но разные по знаку деформации растяжения–сжатия, направленные вдоль основ-

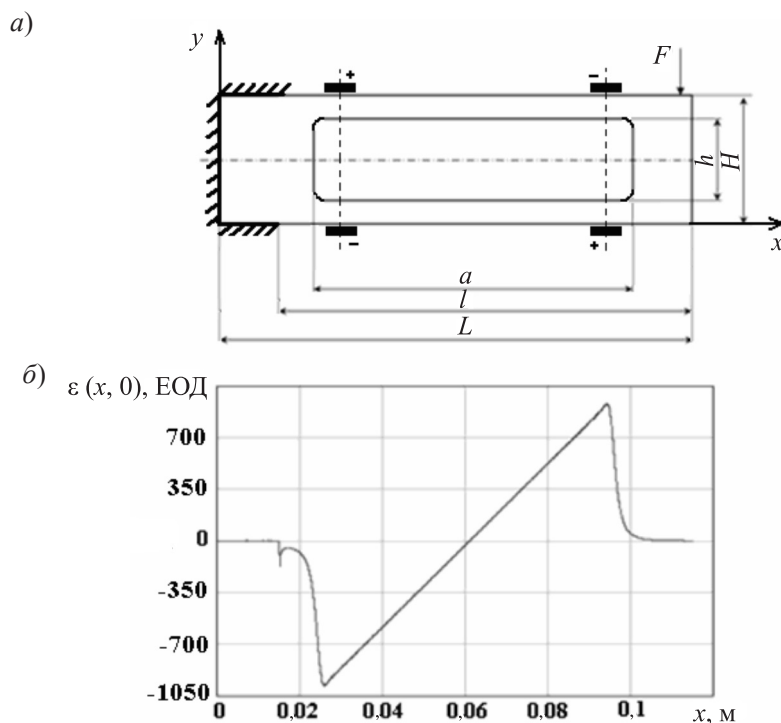


Рис. 1. Расчетная схема (а) и распределение продольной деформации по нижнему основанию рамочного упругого элемента (б)

ной оси чувствительности тензорезистора.

Ниже приведены результаты моделирования степени асимметрии механических продольных деформаций в зонах установки тензорезисторов для наиболее распространенной конструкции УЭ типа двойная консольная балка. На рис. 1 а показана расчетная схема рамочного упругого элемента, где h и a – ширина и длина выемки; L и H – длина и толщина балки; l – длина балки от места заделки; F – измеряемая сила.

Задача о распределении продольной деформации на нижней ($\varepsilon(x, 0)$) и верхней ($\varepsilon(x, H)$) кромке двойной консольной балки относится к классу статически неопределимых задач. Аналитическое решение задачи с использованием метода фиктивных сил [4] легко получить лишь для частного случая, когда поворот поперечного сечения нагруженного конца балки отсутствует. Поэтому задача решалась путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов [5] в системе ANSYS [6]. Моделирование выполнялось при условии, что левый конец УЭ (рис. 1 а) жестко закрепляется по контуру, обозначенной на рис.1 жирной линией. Свободный конец УЭ нагружается сосредоточенной силой F . Густота равномерной сетки, непосредственно влияющая

на точность решения в тех или иных частях расчетной области, составляла 500 тыс. узлов.

На рис. 1 б изображен пример распределения деформации по нижнему основанию рамы ($\varepsilon(x, 0)$) для случая: $F = 120 \text{ Н}$; $E = 0,7 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ (модуль Юнга для сплава ВТ-6); $a = 70 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $b = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (толщина УЭ); $h = 36 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $H = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $L = 1,15 \cdot 10^{-1} \text{ м}$; $l = 10^{-1} \text{ м}$. Значения относительной деформации на рис. 1 б приведены в ЕОД (1 ЕОД = 10^{-6}). Аналогичный характер имеет распределение продольной деформации на верхней кромке упругого элемента ($\varepsilon(x, H)$).

Из рис. 1 б следует, что распределение продольной деформации имеет явно выраженный неоднородный характер с двумя экстремумами в точках $x_1 = 25 \text{ мм}$ и $x_2 = 95 \text{ мм}$. В этих точках УЭ испытывает деформацию сжатия $\varepsilon_1 = \varepsilon(x_1, 0) = -990 \text{ ЕОД}$ и растяжения $\varepsilon_2 = \varepsilon(x_2, 0) = 932 \text{ ЕОД}$. В точках с этими же координатами на верхней кромке УЭ имеет место деформация растяжения $\varepsilon_3 = \varepsilon(x_1, H) = 990 \text{ ЕОД}$ и сжатия $\varepsilon_4 = \varepsilon(x_2, H) = -932 \text{ ЕОД}$. Асимметрия модулей пиковых значений деформаций составляет

$$\gamma = 1 - \frac{|\varepsilon_2|}{|\varepsilon_1|} \cdot 100 \% = 5,9 \%$$

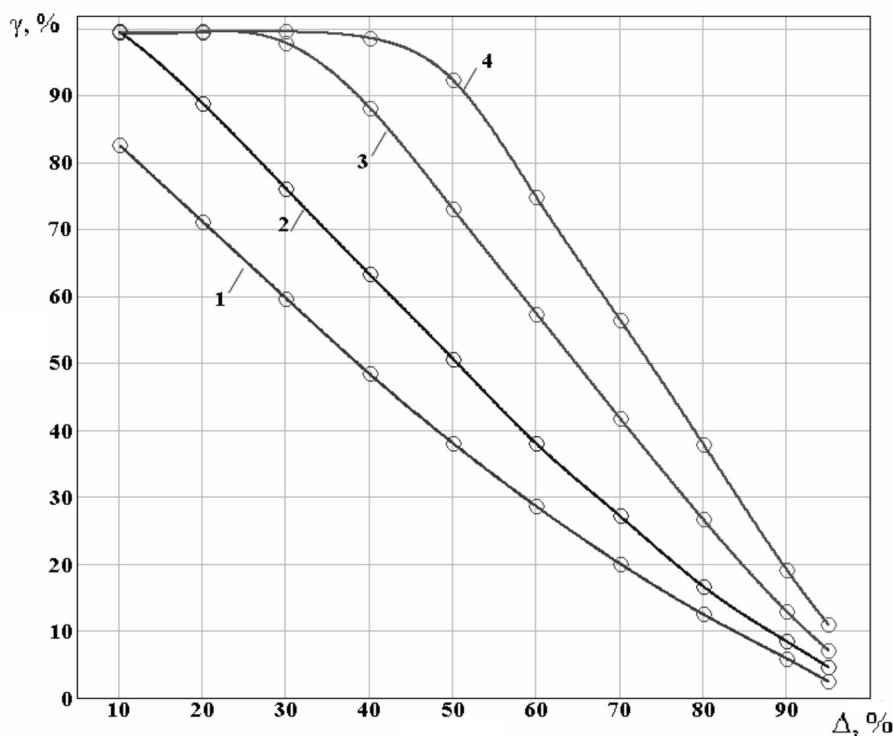


Рис. 2. Зависимость степени асимметрии модулей пиковых значений деформации от конструктивных параметров Δ и A :
1 – $A = 70\%$; 2 – $A = 50\%$; 3 – $A = 30\%$; 4 – $A = 20\%$

Рамочный УЭ можно считать близким к линейной системе, поэтому приведенное значение асимметрии сохраняется во всем рабочем диапазоне нагрузок.

На рис. 2 изображено семейство кривых, характеризующих зависимость асимметрии модулей пиковых значений деформации от конструктивных параметров рамочных конструкций УЭ (см. рис. 1 а). В качестве конструктивных параметров были использованы относительная толщина выемки Δ и относительная длина выемки A , определяемые выражениями:

$$\Delta = \frac{h}{H} \cdot 100\% ;$$

$$A = \frac{a}{l} \cdot 100\% .$$

Одним и тем же значениям параметров Δ и A могут соответствовать УЭ на разные пределы измерения. Например, значениям $A = 70\%$ и $\Delta = 90\%$ могут соответствовать упругие элементы из нержавеющей стали с размерами $b = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 9 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 10 \cdot 10^{-3}$ м; $a = 35 \cdot 10^{-3}$ м; $l = 50 \cdot 10^{-3}$ м или с размерами $b = 30 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 45 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 50 \cdot 10^{-3}$ м; $a = 84 \cdot 10^{-3}$ м;

$l = 120 \cdot 10^{-3}$ м. В первом случае пиковые значения деформации на уровне 1000 ЕОД достигаются при $F = 25$ Н, во втором случае – при $F = 360$ Н.

Значения параметра Δ , при которых производилось численное моделирование, показаны на рис. 2 кружками. Обработка результатов численного моделирования распределения продольной деформации проводилась при помощи компьютерной программы MathCAD [7] по формуле:

$$\gamma(\Delta, a) = 1 - \left| \frac{\varepsilon_2(\Delta, A)}{\varepsilon_1(\Delta, A)} \right| \cdot 100\% .$$

Для построения кривых 1–4 рис. 2, а также кривых 1–3 рис. 3, применялась кубическая сплайн-интерполяция.

При малых значениях конструктивных параметров ($\Delta, A \rightarrow 0$) рамочный УЭ вырождается в простую консольную балку постоянного поперечного сечения, на свободном конце которой деформации отсутствуют. В этом случае $\gamma(\Delta, A) \rightarrow 100\%$, что наглядно демонстрируют кривые 3 и 4. Наоборот, по мере увеличения параметров Δ и A вплоть до 100% рамочная конструкция становится подобной идеальному упругому «параллелограмму», в котором при нагружении

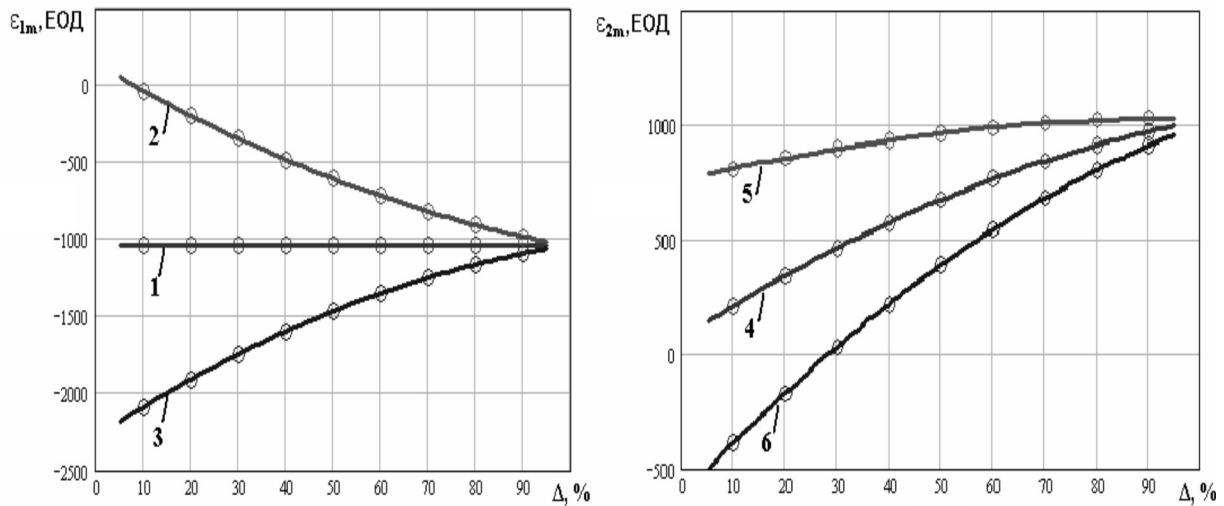


Рис. 3. Зависимость абсолютных значений пиков деформаций ε_1 и ε_2 от параметра Δ

отсутствует поворот поперечного сечения нагружаемого конца, а $\gamma(\Delta, A) \rightarrow 0$. Рис. 2 иллюстрирует сказанное тенденцией приближения кривых 1–4 к нижнему левому углу координатной сетки. Таким образом, для достижения высоких метрологических показателей тензодатчиков силы рамочного типа необходимо всемерно увеличивать значения конструктивных параметров A и Δ .

При проектировании весовых ячеек также необходимо учитывать воздействие значительных паразитных моментов сил, возникающих из-за внецентренного расположения массы на грузоприемной платформе:

$$M_x = F \cdot l_x,$$

$$M_y = F \cdot l_y,$$

где F – номинальное значение нагрузки, а l_x, l_y – координаты (проекция) точки расположения центра измеряемой массы относительно центра платформы (на рис. 1 а грузоприемная платформа для простоты не показана) по осям x и y соответственно. В рамках плоской задачи, сформулированной на рис. 1, возможно рассмотрение влияния продольного паразитного момента M_x . Действие момента приводит к смещению кривых распределений деформаций по длине УЭ и существенному увеличению степени асимметрии пиковых значений деформаций.

Количественная оценка этого влияния представлена на рис. 3. На этом рисунке изображены результаты численного моделирования зависимости пиковых значений деформации от

конструктивного параметра Δ при значениях $l = 10^{-1}$ м и $A = 70$ %. Моделирование проводилось с учетом теории подобия напряженно-деформированных состояний [8], поэтому пиковые значения деформации ε_1 без воздействия паразитных моментов сил не изменяются и равняются 1030 ЕОД.

Кривые 2, 5 соответствуют воздействию положительного момента, кривые 3, 6 – отрицательного паразитного момента. Там же для сравнения приведена зависимость значения пиковых деформаций от параметра Δ при отсутствии паразитных моментов – кривые 1, 4. Эти кривые характеризуют зависимость степени асимметрии пиковых деформаций ε_1 и ε_2 от параметра Δ .

Из рисунка видно, что паразитные моменты существенно изменяют пиковые деформации. Для рамочной конструкции УЭ с малым значением параметра Δ такие изменения достигают ± 1000 ЕОД, в зависимости от знака момента. Естественно, что подавление таких больших смещений пиковых деформаций весьма проблематично. По мере увеличения параметра Δ рамочный УЭ обретает все меньшую чувствительность к продольному изгибающему моменту, так что кривые 1–3 и 5–7 асимптотически приближаются к номинальному значению деформации $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1030$ ЕОД.

В статье описаны трудности, которые необходимо преодолеть при создании тензорезистивного датчика силы высокой точности, что позволит грамотно подойти к выбору технологии изготовления таких датчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Осадчий, Е.П.** Проектирование датчиков для измерения механических величин [Текст] / Е.П. Осадчий [и др.]; под общ. ред. Е.П. Осадчего. –М.: Машиностроение, 1979. –480 с.
2. **Шнейдерман, А.Л.** Систематические погрешности упругого элемента однокомпонентных динамометров [Текст] / А.Л. Шнейдерман // Приборы и системы управления. –1971. –№ 10. –С. 35-37.
3. **Аш, Ж.** Датчики измерительных систем [Текст] / Ж.Аш [и др.]; пер. с фр. под ред. А.С. Обухова. –М.: Мир, 1992. –В 2-х кн. –480 с.
4. **Тимошенко, С. П.** Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер; под ред. Г.С. Шапиро; пер. с англ. М. И. Рейтмана. –М.: Наука, 1975. –575 с.
5. **Стренг, Г.** Теория метода конечных элементов [Текст] / Г. Стренг, Дж. Фикс; пер. с англ. –М.: Мир, 1977. –349 с.
6. **Чигарев, А.В.** ANSYS для инженеров: Справ. пособие [Текст] / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. –М.: Машиностроение, 2004. –511 с.
7. **Кириянов, Д.В.** Mathcad 12: Самоучитель [Текст] / Д.В. Кириянов. –СПб: БХВ-Петербург, 2004. –559 с.
8. **Тетельбаум, И.М.** Модели прямой аналогии [Текст] / И.М. Тетельбаум, Я.И. Тетельбаум. –М.: Наука, 1979. –383 с.

УДК 681.5.01

А.Ю. Васильев

РЕДУКЦИЯ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСОВ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ

Теория редукции служит для получения математических моделей динамических систем, отличающихся от исходных моделей более низким порядком, но при этом сохраняющих качественные характеристики и демонстрирующих отклонение количественных характеристик на допустимо малую величину [1]. Одной из ключевых методик теории редукции является уравновешенное сокращение по сингулярным числам Ганкеля, основанное на фундаментальных характеристиках системы, получаемых из грамианов управляемости и наблюдаемости. Данная методика прекрасно себя зарекомендовала в отношении систем с одним входом и выходом (в некоторых источниках они называются «SISO-системами»), обеспечивая такие преимущества, как гарантированная устойчивость редуцированной системы и априорная оценка погрешности по норме Ганкеля (максимальному сингулярному числу системы) [3]. В то же время для систем с многими входами и выходами (ММО-системы) применение основного алгоритма уравновешенного сокращения приводит к существенным расхождениям некоторых процессов уже при понижении порядка на единицу, делая таким образом невозможной адекватную процедуру редукции. Для борьбы с этой пробле-

мой предлагается методика весов входных и выходных сигналов.

В статье рассматривается собственная линейная стационарная динамическая система

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t),$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t),$$

где для каждого $t \in \mathbb{R}$ $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ – векторы входов состояний и выходов, соответственно. Передаточная функция системы имеет следующий вид:

$$G(s) = D + C(sI - A)^{-1}B = \frac{M(s)}{N(s)},$$

причем степень числителя меньше или равна степени знаменателя.

По умолчанию для оценки сигналов и векторов в статье использована евклидова норма (2-норма). В противном случае тип нормы будет специально уточнен.

В качестве многомерной модели, на примере которой будут обсуждаться процедуры редукции, использована модель объединенной энергосистемы, рассматриваемая более подробно в [2].

Математическая модель, описывающая данную систему, имеет 33-й порядок (т. е. 33 пере-

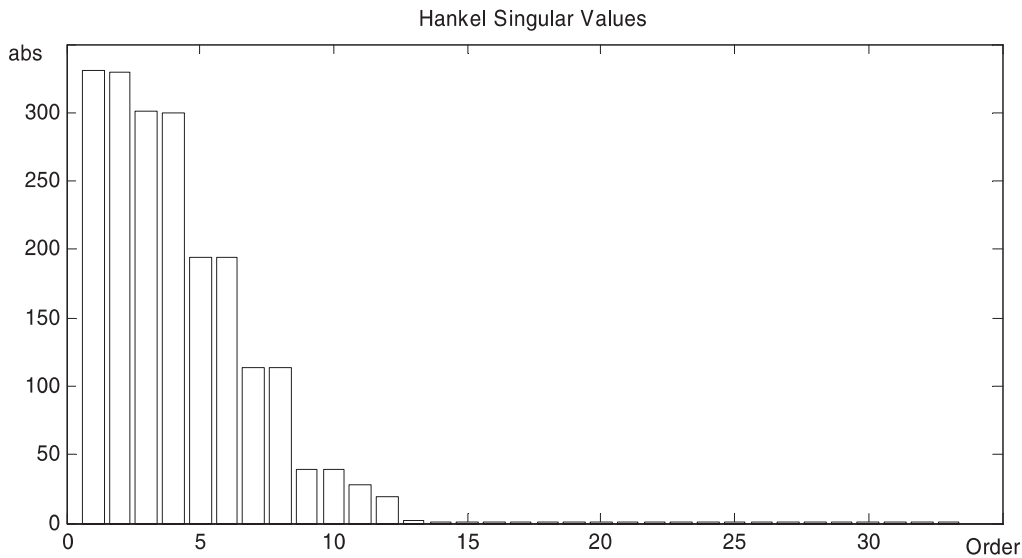


Рис. 1. Гистограмма сингулярных чисел Ганкеля для рассматриваемой системы

менных состояния), 12 входов и 6 выходов. В качестве входных сигналов рассматриваются управляющие и возмущающие воздействия, поданные на каждый узел; выходными сигналами являются собственная частота четвертого узла и перетоки активной мощности между узлами.

Поскольку не представляется возможным отобразить в данной статье переходные функции всех связей между входами и выходами системы, графически рассматривается переходный процесс одной конкретной связи: управляющего воздействия на первом узле, влияющего на переток мощности между первым и четвертым узлом.

Методика уравновешенного сокращения по сингулярным числам Ганкеля применяется к устойчивым, управляемым и наблюдаемым системам. Впрочем, если система не удовлетворяет данным критериям, возможна ее предварительная обработка, которая позволит впоследствии осуществить процедуру редукции по всем правилам. Ниже приводится алгоритм данного метода, позволяющий редуцировать систему по сингулярным числам Ганкеля в общем случае.

Алгоритм 1. Обобщенный алгоритм уравновешенного сокращения по сингулярным числам Ганкеля [4]:

1. Решение уравнения $AP + PA^T = -BB^T$ относительно P .
2. Решение уравнения $A^T Q + QA = -C^T C$ относительно Q .
3. Вычисление компонент разложения Холецкого $P = L_p L_p^T$, $Q = L_q L_q^T$.

4. Вычисление разложения по сингулярным числам произведения компонент $U \Sigma V^T = L_q^T L_p$, где матрица Σ – положительная диагональная, матрицы U , V имеют ортонормированные столбцы.

5. Вычисление уравнивающих преобразований $T = L_p V \Sigma^{-1/2}$, $T^{-1} = \Sigma^{-1/2} U^T L^T$.

6. Создание уравновешенной реализации $\hat{A} = T^{-1} A T$, $\hat{B} = T^{-1} B$, $\hat{C} = C T$.

7. Определение порядка сокращенной модели и соответствующее разделение $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$.

8. Усечение $\hat{A} = \hat{A}_{11}, \hat{B} = \hat{B}_1, \hat{C} = \hat{C}_1$, создающее редуцированную модель в пространстве состояний.

Один из привлекательных аспектов методов уравновешенного сокращения – это доступность вычисления границ ошибки. Если обозначить i -е число на диагонали матрицы Σ как σ_i , а сами числа σ_i расположить по порядку $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_N$, то ошибка передаточной функции сокращенной модели q -го порядка будет ограничена:

$$\|H(s) - \hat{H}_q(s)\|_{\infty} \leq 2 \sum_{k=q+1}^N \sigma_k.$$

Гистограмма сингулярных чисел Ганкеля (рис. 1) для заданной системы определяет порядок редукции как тринадцатый, поскольку только первые тринадцать состояний являются существенными с точки зрения внутреннего энергетического поведения системы. H_{∞} -норма исходной передаточной функции составляет 660,09, в то время как удвоенная сумма отбрасываемых двадцати сингулярных чисел равна 2,26. В отно-

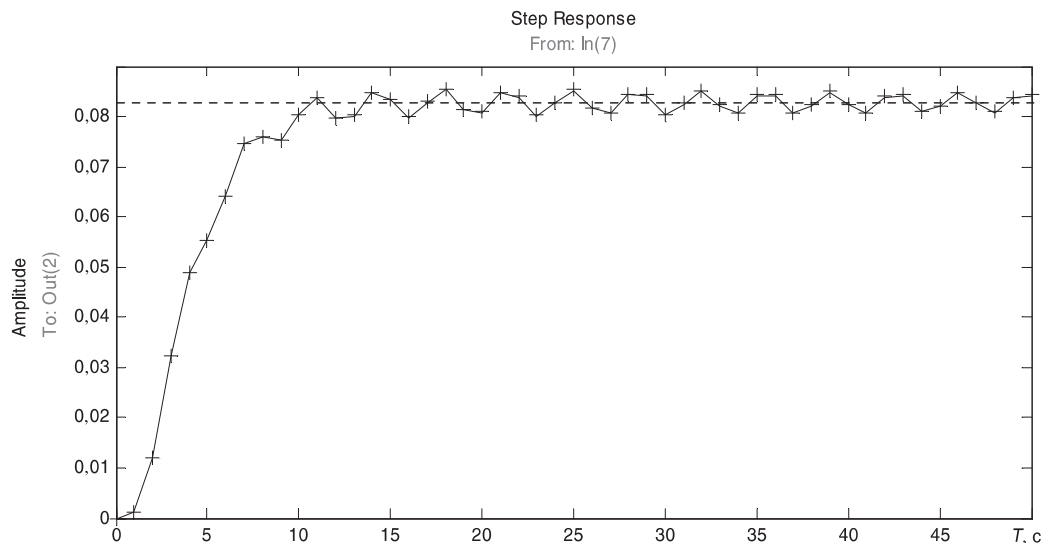


Рис. 2. Переходные процессы исходной (—) и редуцированной (+++) систем при условии одного входа и выхода*

сительном представлении доля отбрасываемых сингулярных чисел Ганкеля составляет 0,06 % от общей суммы. Именно такой будет разница по H_∞ -норме между исходной и редуцированной системами.

Для демонстрации различий в результатах методики уравновешенного сокращения одномерных и многомерных систем и существенного ухудшения результатов во втором случае, необходимо для начала привести вариант редукции одномерной системы. Рассмотрим вариант заявленной выше системы, в котором оставлены только один вход и один выход. Для данной одномерной модели построим переходный процесс (реакцию на единичное ступенчатое воздействие) как исходной модели 33-го порядка, так и редуцированной до 13-го (рис. 2).

Теперь с исходным переходным процессом будет сравниваться переходный процесс многомерной редуцированной системы. Входной и выходной сигналы, определяющие связь, остаются теми же, равно как и матрица A , а также соответствующие столбец B и строка C как компоненты одномерной системы в многомерной. Но добавление остальных столбцов и строк приводит к перераспределению влияния сигналов и иной уравновешенной реализации. Особенно это заметно на

управляющих сигналах (вторая половина столбцов матрицы B), которые особенно сильно подавляются в общем алгоритме получения уравновешенной реализации возмущающими сигналами (первая половина). В результате, успешно реализованный для одномерной системы алгоритм приводит к неудовлетворительным результатам (рис. 3).

Объяснение таким существенным расхождением в данном случае можно искать в соединении двух разных типов входных сигналов в одной системе. Нормы столбцов первой половины матрицы B , относящихся к возмущающим сигналам, превосходят нормы столбцов второй половины в среднем в 10^4 раз. Подобное расхождение на порядки элементов системы и приводит к сбоям в алгоритме уравновешенной реализации.

Для решения данной проблемы предлагается использовать в качестве подготовительной процедуры распределение весов на столбцы матриц B и C . В данной статье рассматривается вопрос только для матрицы B , связанной с входными сигналами.

Первый способ распределения весов рассматривает всю систему в целом, т. е. все связи между входами и выходами. Задача этого способа – усреднить влияние входных сигналов на систему, тем самым, сделав их равно влияющими на процесс редукции. Для некоторых входов это приведет к ухудшению, пусть и незначительному, соответствия переходных процессов исходной и редуцированной систем. В то же время уровень

* На рис. 2 переходный процесс изображен крестами, поскольку графики настолько сливаются, что пунктир или штрих-пунктир был бы просто незаметен.

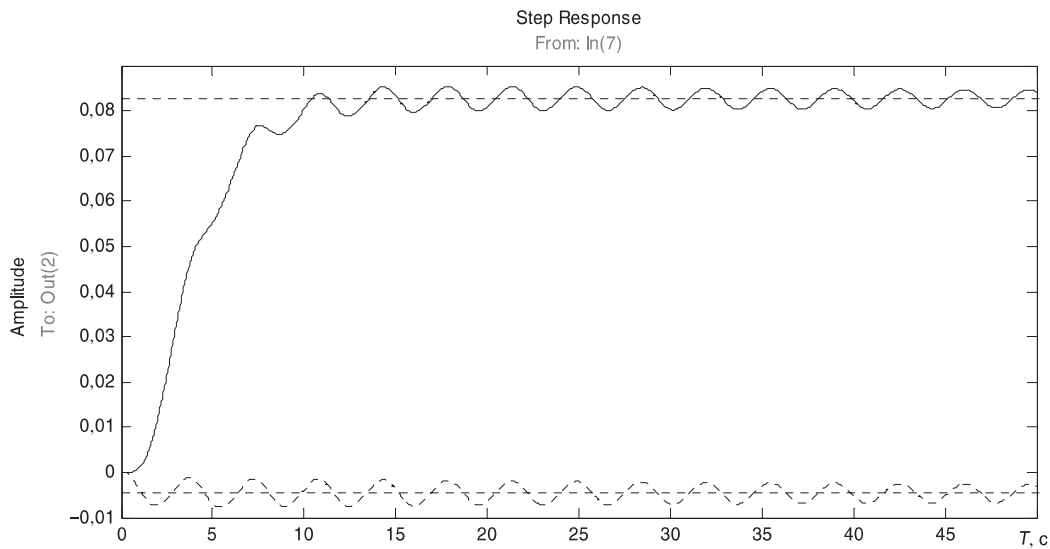


Рис. 3. Переходные процессы исходной (—) и редуцированной (-----) систем при условии нескольких входов и выходов

соответствия других процессов, например, показанного на рис. 3, перейдет в разряд удовлетворительного. Ниже представлен алгоритм 2, позволяющий реализовать методику общего распределения весов.

Алгоритм 2. Алгоритм общего распределения весов между входными сигналами системы с последующей редукцией и восстановлением процессов:

1. Расчет норм столбцов матрицы B ; получение массива чисел размером по числу входных сигналов.
2. Нахождение среднего арифметического значения массива полученных норм.
3. Нахождение массива весов как коэффициентов, позволяющих из исходного массива норм входных сигналов получить во всех случаях средние значения; таким образом, при перемножении коэффициентов на соответствующие им нормы в каждом случае получается найденное среднее значение.
4. Умножение каждого из столбцов матрицы B на соответствующий весовой коэффициент; получение матрицы B_w .
5. Построение новой динамической системы, в которой место матрицы B занимает матрица B_w (матрицы данной системы и ее редуцированного аналога будут иметь индекс w).
6. Осуществление процедуры уравновешенного сокращения (алгоритм 1) в отношении новой системы; порядок редукции сохраняется.

7. Деление каждого столбца получившейся матрицы $\hat{B}_w$ на соответствующий весовой коэффициент; получение матрицы $\hat{B}$.

8. Построение конечной редуцированной системы, матрицами которой служат $A_w, \hat{B}, \hat{C}_w, \hat{D}_w$.

Результат работы алгоритма 2 представлен на рис. 4. Приведенный выше алгоритм является достаточно грубым, но при этом результативным методом. В нем не учитывается влияние весов на остальные матрицы, которое неизбежно происходит в процессе уравновешенного сокращения. Тем не менее, представляется очевидным существенное улучшение соответствия переходных процессов.

Если имеет место значительное расхождение норм не только столбцов матрицы B , но и строк матрицы C , соответствующее распределение весов выходных сигналов производится на том же этапе, что и для входных. Аналогичные действия осуществляются при восстановлении системы.

Второй способ распределения весов служит для существенного улучшения качества редукции отдельной связи входного и выходного сигналов в рамках многомерной системы. Этот способ также будет рассмотрен только в отношении матрицы B . Конкретно, связью, для которой производится улучшение, является описанная выше связь между управляющим сигналом на первом узле и перетоком мощности между первым и четвертым узлом. Главный недостаток данного способа – ожидаемое ухудшение остальных процессов

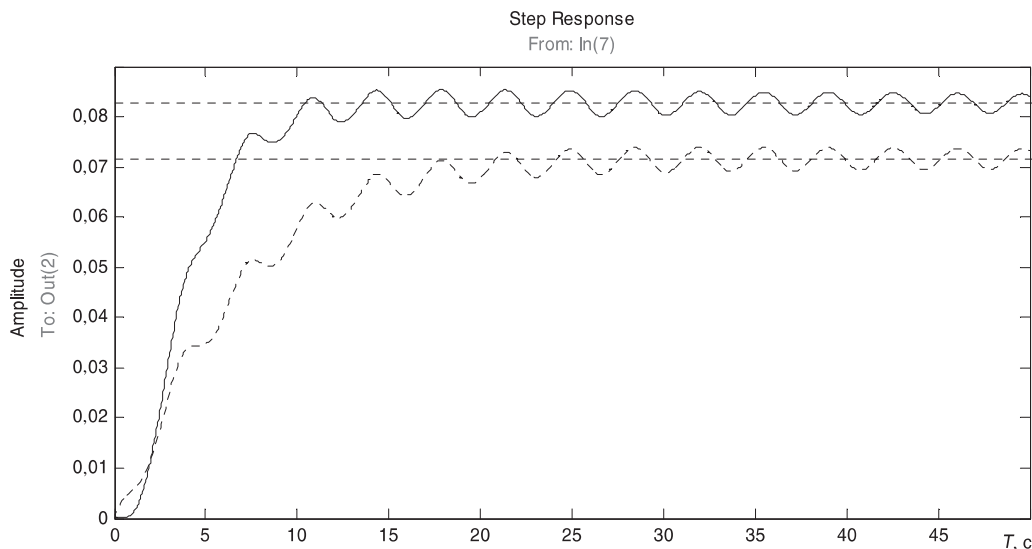


Рис. 4. Переходные процессы исходной (—) и редуцированной (- - - -) систем при условии распределения весов на все входные сигналы

многомерной системы, пусть и не приводящее к неудовлетворительным результатам. Ниже представлен алгоритм 3, позволяющий реализовать методику выделения доминантного контура в многомерной системе и редуцировать систему с учетом максимальной точности в отношении доминантного контура.

Алгоритм 3. Алгоритм выделения в многомерной системе переходного процесса при помощи весового коэффициента:

1. Задание нужного сигнала, в данном случае столбца матрицы B .
2. Умножение определенного столбца на весовой коэффициент, существенно превышающий максимальную норму столбцов матрицы B (в данном случае при максимальной норме был взят коэффициент 100 000); получение матрицы B_w .
3. Построение новой динамической системы, в которой место матрицы B занимает матрица B_w .
4. Осуществление процедуры уравновешенного сокращения (алгоритм 1) в отношении новой системы; порядок редукции сохраняется.
5. Восстановление редуцированной системы путем деления нужного столбца получившейся

матрицы $\hat{B}_w$ на соответствующий весовой коэффициент; получение матрицы $\hat{B}$.

6. Построение конечной редуцированной системы, матрицами которой служат $A_w, \hat{B}, \hat{C}_w, \hat{D}_w$.

В зависимости от величины коэффициента в алгоритме 3 происходит приближение нужного процесса редуцированной системы к исходному и приближение или отдаление остальных. Последовательной подборкой можно установить коэффициент, удовлетворяющий требованиям, предъявляемым к поведению редуцированной системы.

Результат выполнения алгоритма 3 не приводится на рисунке, поскольку визуально он не отличается от результата, продемонстрированного на рис. 2.

Подводя итоги можно сделать следующие выводы: базовый алгоритм уравновешенного сокращения по сингулярным числам Ганкеля для многомерных систем работает не всегда удовлетворительно в отношении отдельных входо-выходных связей; две представленные методики, каждая по-своему, решают данную проблему, улучшая качество редуцированной многомерной системы в целом, либо существенно повышая качество редукции отдельного интересующего контура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балберин, В.В. Понижение порядка моделей: Учеб. пособие [Текст] / В.В. Балберин, Л.А. Мироновский, А.Б. Петровский. —Л.: ЛИАП, 1989. —С. 4–9.
2. Козлов, В.Н. Управление энергетическими системами. Электромеханические процессы [Текст] / В.Н. Козлов; под. ред. Ю.С. Васильева. —СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. —С. 8–25.



3. **Glover, K.** All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems and their L_∞ -error bounds [Текст] / K. Glover // International J. of Control, 1984. – № 39 (6). – С. 1115–1193.

4. **Moore, B.C.** Principal component analysis in linear systems: controllability, observability, and model reduction [Текст] / B.C. Moore // IEEE Transactions on Automatic Control, 1981. – № 26 (1). – С. 17–32.

УДК 519.8

А.В. Титов, А.А. Харьковской, В.О. Чуканов

МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В настоящее время все больше внимания уделяется надежности программного обеспечения, особенно в системах ответственного назначения. Любое программное средство не избавлено от ошибок при программировании и часто необходимо оценить время безотказной работы или вероятность отказа. Кроме того, тестирование программного обеспечения (ПО) требует оценки времени, которое будет затрачено на него. Таким образом, возникает необходимость в разработке методов, которые позволили бы оценить параметры надежности системы.

Анализ надежности программных средств – сложная комплексная задача, требующая использования аппарата теории вероятностей и математической статистики. В системах ответственного назначения отказы являются редкими событиями [1]. Ограниченных данных бывает недостаточно для того, чтобы найти заранее неизвестный закон распределения времени между программными сбоями. Тем не менее, если вид закона распределения известен, то его параметры могут быть оценены по имеющейся информации.

Изучена система передачи данных, функционирующая на нескольких однотипных технических объектах одновременно. В качестве наблюдаемых характеристик системы выбраны время наработки на отказ и время восстановления после отказа. Под отказом понимается сбой в работе программных средств, требующий восстановления их работоспособности [2].

В качестве основных характеристик надежности рассматриваются время наработки на отказ и время восстановления после отказа. Фиксация отказов программного средства производится в жур-

нале отказов, где указывается время отказа, время восстановления и модуль, в котором был зарегистрирован отказ. После этого производится устранение найденной ошибки в ПО. Таким образом, в системе остается на одну ошибку меньше, чем было до момента отказа.

В рамках рассмотренной структуры функционирования программного обеспечения и фиксации отказов можно предложить модель надежности данной системы с учетом ее особенностей.

Модель, предложенная Желинским и Морандой, базируется на предположении о том, что время до очередного отказа распределено по экспоненциальному закону с интенсивностью отказов, пропорциональной количеству еще не выявленных ошибок. После обнаружения ошибки в ПО происходит немедленное ее устранение, и при коррекции ошибок не происходит внесения новых ошибок. В результате коррекции число оставшихся ошибок уменьшается на одну и тестирование возобновляется [3].

Данная модель позволяет получить так называемую *функцию риска* или *интенсивность отказов* $\lambda(t_i)$, которая будет зависеть от двух неизвестных: числа ошибок в ПО до начала тестирования и отладки, и коэффициента в модели Желинского–Моранды [3]. Использование такого метода расчета значительно усложняет тестирование, поскольку приходится искать решение уравнений n -го порядка для получения необходимых значений. Поэтому была разработана комплексная модель надежности изучаемого программного средства на основе моделей Желинского–Моранды и Миллса.

Использование этой модели предполагает перед началом тестирования необходимость искусственного «засорения» программы, т. е. внесения в нее некоторого количества известных ошибок. Ошибки вносятся случайным образом и фиксируются в протоколе искусственно внесенных ошибок. Предполагается, что все ошибки (как естественные, так и искусственно внесенные) имеют равную вероятность быть найденными в процессе тестирования. Стоит отметить, что в случае редких отказов искусственное «засорение» приводит к повышению вероятности отказового события и увеличению объема статистических данных.

Тестируя программу в течение некоторого времени, собирают данные об ошибках. В момент оценки надежности по протоколу искусственных ошибок все ошибки делятся на собственные и искусственные. Соотношение, вытекающее из формулы Миллса [4], выглядит следующим образом:

$$N = \frac{S \cdot l}{v}, \quad (1)$$

где N – общее количество собственных ошибок; S – общее количество внесенных ошибок; v – число найденных внесенных ошибок; l – число найденных собственных ошибок.

Тогда E_0 будет обозначать общее количество ошибок в программе до начала тестирования, то есть:

$$E_0 = N + S = \frac{S \cdot l}{v} + S. \quad (2)$$

В соответствии с моделью Джелинского–Моранды интенсивность отказов $\lambda(t_i)$ вычисляется по следующей формуле [3]:

$$\begin{aligned} \lambda(t_i) &= K_{jm} [E_0 - (i - 1)] = \\ &= K_{jm} \left[\frac{S \cdot l}{v} + S - (l + v - 1) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где E_0 – число ошибок в ПО до начала тестирования и отладки; t_i – интервал времени между $(i-1)$ -й и i -й ошибками; i – число ошибок, обнаруженных к моменту отладки t_i ; K_{jm} – коэффициент Джелинского–Моранды [3], в данной модели вычисляемый по следующей формуле:

$$K_{jm} = n \left(\sum_{i=1}^n t_i \cdot \left(\frac{S \cdot l}{v} + S + 1 \right) - \sum_{i=1}^n i \cdot t_i \right)^{-1}. \quad (4)$$

Таким образом, интенсивность отказов $\lambda(t_i) = \text{const}$ на интервале между двумя смежными моментами выявления и устранения ошибки в исследуемом программном продукте. Время t_i соответствует длительности выполнения ПО на

компьютере и не учитывает простой компьютера для анализа результатов и их корректировки [3].

Так как, согласно допущению, представленному выше, время до очередного отказа распределено по экспоненциальному закону, вероятность безотказной работы P равна:

$$\begin{aligned} P(t_i) &= \exp(-\lambda(t_i)t_i) = \\ &= \exp(-K_{jm} [E_0 - (i - 1)]t_i) = \\ &= \exp \left(K_{jm} \left[\frac{S \cdot l}{v} + S - (l + v - 1) \right] t_i \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Плотность вероятности отказов $f(t_i)$ равна:

$$\begin{aligned} f(t_i) &= \lambda(t_i) \cdot \exp(-\lambda(t_i)t_i) = \\ &= K_{jm} [E_0 - (i - 1)] \cdot \exp(-K_{jm} [E_0 - (i - 1)]t_i) = \\ &= K_{jm} \left[\frac{S \cdot l}{v} + S - (l + v - 1) \right] \times \\ &\times \exp \left(K_{jm} \left[\frac{S \cdot l}{v} + S - (l + v - 1) \right] t_i \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Среднее время наработки на отказ для интервала t_i вычисляется следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} m_{t_i} &= \frac{1}{\lambda(t_i)} = \frac{1}{K_{jm} [E_0 - (i - 1)]} = \\ &= \frac{1}{K_{jm} \left[\left(\frac{S \cdot l}{v} + S \right) - (l + v - 1) \right]}. \end{aligned} \quad (7)$$

На основании описанной выше методики были проведены вычисления, исходные данные которых представлены в таблице.

Исходные данные

№ ошибки	Время между отказами, ч
1	7,92
2	10,56
3	10,80
4	13,20
5	15,84
6	21,32
7	20,48
8	20,92
9	21,16
10	25,92
11	26,64
12	29,28
13	33,92



Графики времени до следующего отказа

Были получены следующие результаты: интенсивность отказов – $\lambda(t_{14}) = 0,0391/\text{ч}$; математическое ожидание продолжительности времени до обнаружения следующей, 14-й ошибки – $t_{14} = 30,01$ ч.

На рисунке представлены два графика зависимости времени до отказа от количества найденных (а, соответственно, и оставшихся) ошибок, на основании вычислений, приведенных выше. Скачкообразное изменение графика по результатам расчетов вызвано тем, что в этот момент находится новая внесенная ошибка и приходится пересчитывать оценку количества ошибок по методу Миллса, описанному выше. Стоит отметить, что во время вычислений значение количества собственных ошибок N постоянно менялось в зависимости от количества найденных внесенных или собственных ошибок. Поэтому в начале вычислений оценка N колебалась в интервале $10 \div 30$, в дальнейшем интервал уменьшился до $18 \div 22$, что повлияло на точность вычислений.

Необходимо заметить, что оценка значения N имеет некоторую доверительную вероятность α , вычисляемую по формуле [4]:

$$\alpha = \frac{C_S^{v-1}}{C_{S+N+1}^{N+v}} = \frac{S!(N+v)!}{(v-1)!(S+N+1)!},$$

где S – количество внесенных ошибок; v – количество найденных внесенных ошибок; N – количество собственных ошибок в программе.

Таким образом, можно оценить точность полученной оценки количества собственных ошибок в ПО, что позволяет вычислить доверительную вероятность результатов расчетов t_{cr} и λ , а также оценить вероятность того, что в программе не было ошибок в случае, если все внесенные ошибки были найдены, а собственные не были обнаружены [4].

В данной статье рассмотрен комбинированный метод оценки надежности программного обеспечения на основе методов Джелинского–Моранды и Миллса. Данный метод имеет ряд преимуществ, достигаемых простотой вычисления основных параметров надежности ПО, функции риска и времени наработки на отказ. Приведен пример вычислений для реально существующего программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хердер, Дж.Н. Построение надежных операционных систем, допускающих наличие ненадежных драйверов устройств [Текст] / Дж.Н. Хердер, Х. Бос, Э.С. Таненбаум; Пер. с англ. С. Кузнецов // A Lightweight Method for Building Reliable Operating Systems Despite Unreliable Device Drivers. Technical Report IR-CS-018. –Jan. 2006. [Электрон-

ный ресурс]. –Режим доступа: <http://www.minix3.org/doc/reliable-os.pdf>

2. Чуканов, В.О. Надежность программного обеспечения и аппаратных средств систем передачи данных атомных электростанций [Текст] / В.О. Чуканов. – М.: МИФИ, 2008. –180 с.

3. Майерс, Г. Надежность программного обеспе-

чения [Текст] / Г. Майерс. – М.: Мир, 1980. – 360 с.

4. Черкесов, Г.Н. Надежность аппаратно-

программных комплексов [Текст] / Г.Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.

УДК 621.391.6

И.Е.Никульский, А.И.Осадчий

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ IP-ТРАФИКА В КОЛЬЦЕВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ ДОСТУПА

Оптические сети доступа (ОСД), построенные на основе оригинального оборудования оптических интерфейсов комплекса аппаратно-программных средств коммутации (КАПСК) – АТСЦ-90 [1] внедрены во многих районах Российской Федерации [2] и ориентированы на передачу первичных цифровых потоков (Е1) на участке между опорно-транзитной АТС и выносными абонентскими цифровыми концентраторами (АЦК).

Построение на основе таких ОСД наложенной пакетной IP-сети передачи данных (СПД), обеспечивающей абонентам доступ к Интернет-ресурсам и предоставление других современных инфотелекоммуникационных услуг, является в настоящее время актуальной задачей.

Подходы к оценке качества обслуживания IP-ориентированных сетей специфицированы в Рекомендации МСЭ-Т Y.1541 [3], в соответствии с которой основными показателями качества обслуживания трафика мультимедиа служат: среднее время задержки передачи пакетов (кадров) или средняя задержка (IPTD); вариация (джиттер) задержки передачи пакетов (IPDV); коэффициент потерь пакетов (IPLR).

Объектом исследования данной работы является участок IP-сети, построенный на основе Ethernet-моста, обеспечивающего передачу потока кадров Ethernet по TDM-трактам Е1 кольцевой ОСД.

В основе исследуемой технологии лежит процедура LAPS (Link Access Procedure for SDH – процедура доступа к каналу SDH), подробно описанная в [4].

Постановка задачи. Пусть имеется участок кольцевой IP сети, на который воздействуют два класса абонентского трафика: VoIP и DoIP. Обслуживание кадров в сетевых устройствах реали-

зуется с двумя классами относительных приоритетов (VoIP – высший приоритет). При передаче LAPS возникают аппаратные сбои. Требуется определить IPTD и IPDV при передаче трафика VoIP и IPLR при передаче DoIP, в восходящем и нисходящем направлениях. Исходные данные типовых значений интенсивностей передаваемого трафика, интервалов обслуживания в сети, а также потоков отказов и восстановлений заданы. В сетевых устройствах используется дисциплина обслуживания кадров в порядке их поступления (FIFO).

Предположения и допущения. Предположим, что сеть однородна и находится в установившемся режиме; все источники нагрузки порождают простейшие потоки; распределения интервалов обслуживания в сетевых устройствах имеют произвольный (G) характер; процессы обслуживания всех устройств независимы друг от друга; каждый кадр, поступающий в сеть на интервале от наступления до восстановления сбоя, будет отброшен (потерян); процессы поступления кадров, возникновения отказов и их восстановлений независимы; поток отказов и их восстановлений – простейший; в фазах обслуживания, не связанных с передачей LAPS, отказов не возникает.

Аналитическая модель. На рис. 1 приведена аналитическая модель рассматриваемого участка сети в терминах теории массового обслуживания. Обслуживание трафика на рассматриваемом участке сети включает семь фаз: три фазы в восходящей ветви (фазы 1–3) и четыре фазы в нисходящем направлении (фазы 4–7). Номера фаз обозначены фигурными скобками с цифрами.

В фазе 1 кадры записываются в буфер коммутатора, в котором производится выравнивание (сглаживание) абонентского трафика восходящего направления. На СМО воздействует входной

поток с интенсивностью: $\lambda_{ijB} = \lambda_{ijV} + \lambda_{ijD}$, где λ_{ijV} – интенсивность потока VoIP j -го абонента i -го концентратора; λ_{ijD} – интенсивность потока DoIP j -го абонента i -го концентратора. Обслуживание осуществляется с двумя классами относительных приоритетов.

В фазе 2 в буфер конвертера LAPS поступает суммарный поток от всех N_i абонентов, включенных в IP-сеть i -го концентратора, с интенсивностью $\Lambda_{iB} = \sum_{j=1}^{N_i} \lambda_{ijB}$. На СМО воздействует поток отказов λ_{RiB} , возникающих в результате аппаратных сбоев i -го концентратора. Поток интервалов восстановления с интенсивностью γ_i имеет произвольное распределение (G).

В фазе 3 происходит объединение (статистическое мультиплексирование) потоков от N АЦК (от $N \cdot N_N$ абонентов), поступление потока суммарной интенсивности Λ_{B3} в выходной буфер коммутатора и передача суммарного потока к граничному устройству IP-сети со скоростью 1 Гбит/с: $\Lambda_{B3} = \sum_{i=1}^N \Lambda_{iB}$.

В фазе 4 суммарный поток нисходящей ветви с интенсивностью Λ_H поступает в буфер коммутатора, в котором производится разделение потоков, передаваемых к узлам (к АЦК). На фазу 4

воздействует входной поток с двумя классами заявок, с интенсивностью

$$\Lambda_H = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_N} (\lambda_{VHi} + \lambda_{DHi}), \quad (1)$$

где N_N – число концентраторов; λ_{VHi} – интенсивность потока заявок VoIP к i -му абоненту в нисходящем направлении; λ_{DHi} – интенсивность потока данных к i -му абоненту.

В случае идентичности интенсивностей потоков к абонентам и АЦК, (1) можно записать в упрощенном виде: $\Lambda_H = (\lambda_{VHi} + \lambda_{DHi})N \cdot N_N$.

Фаза 5. В коммутаторе производится выравнивание потоков, передаваемых к концентраторам, во избежание перегрузок LAPS мостов. Потоки обслуживаются на интервале b_{5H} . На СМО фазы 5 воздействуют потоки с интенсивностью $\lambda_{iHK} = \sum_{j=1}^N (\lambda_{VHi} + \lambda_{DHi})$.

Фаза 6. Профилированные в фазе 5 потоки поступают в буферы конвертеров LAPS и передаются в направлении концентраторов по LAPS мосту. На СМО воздействуют потоки отказов с интенсивностью λ_{RmH} , а восстановления происходят с интенсивностью γ_{mH} .

Фаза 7. Кадры извлекаются из циклов $E1$, передаются в коммутатор, где распределяются по портам N пользователей.

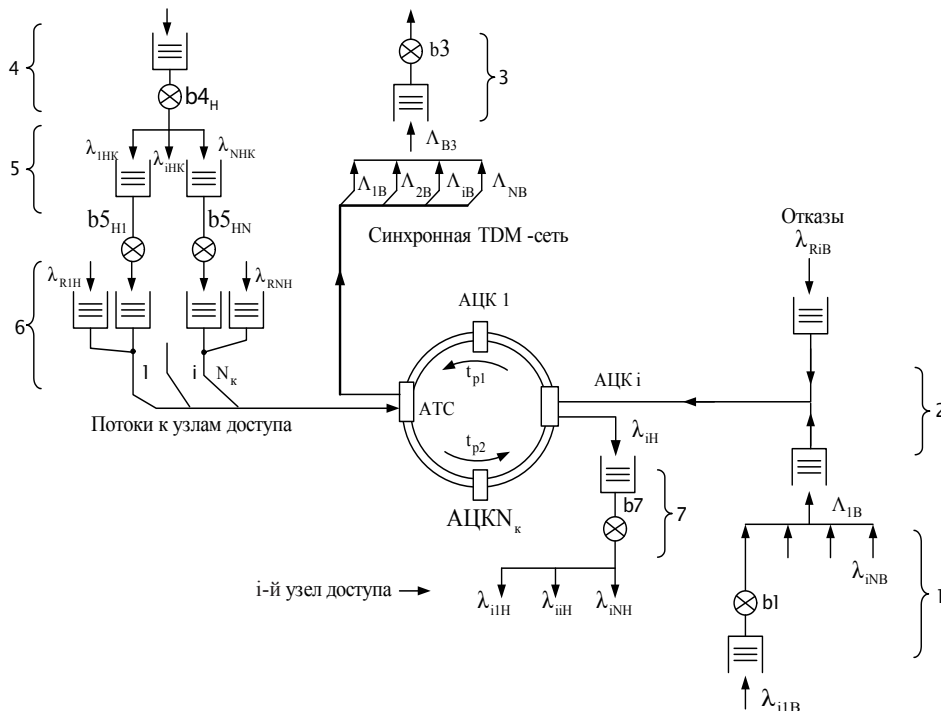


Рис. 1. Модель кольцевой оптической сети доступа

Для фаз, на которые воздействуют простейшие потоки отказов, выражение для нахождения интенсивности потока отказов λ_{Rm} в фазе m имеет вид:

$$\lambda_{Rm} = (K_{\Gamma m}^{-1} - 1)/T_{bm}, \quad (2)$$

где T_{bm} – средний интервал восстановления в фазе m ; $K_{\Gamma m}$ – коэффициент готовности оборудования в фазе m . Если интервалы восстановления распределены по закону Пуассона, то выражение (2) можно записать в виде $\lambda_{Rm} = \gamma_m (K_{\Gamma m}^{-1} - 1)$, $\gamma_m = 1/T_{bm}$, где γ_m – интенсивность потока восстановлений в фазе m ; T_{bm} – средний интервал восстановления в фазе m .

Предположение о том, что каждый кадр, поступающий в сеть на интервале от наступления сбоя до его восстановления, будет помечен как ошибочный и отброшен, порождает дополнительный источник IPLR.

Рассмотрим два случая:

1) поступающий в сеть кадр попадает в пустой буфер, сразу же отправляется на обслуживание и попадает на интервал сбоя;

2) кадр поступает в непустой буфер, а сбой возникает в любой момент времени, когда кадры уже обслуживаются.

Тогда, для случая (1), в предположении о независимости процессов поступления кадров и возникновения сбоев, можно записать выражение для определения $P_{\text{Пс1}}$ – вероятности попадания кадра, поступившего в пустой буфер, на интервал сбоя:

$$P_{\text{Пс1}} = P_{(0)} \cdot P_{\text{Сб.б}}, \quad (3)$$

где $P_{(0)}$ – вероятность попадания кадра в пустой буфер; $P_{\text{Сб.б}}$ – вероятность возникновения сбоя на интервале обслуживания.

В [5] показано, что выражение (3) можно преобразовать к виду:

$$P_{\text{Пс1}} = (1 - \rho_m)(1 - e^{-\lambda_{Rm} \bar{b}_m}), \quad (4)$$

где ρ_m – коэффициент загрузки СМО в фазе m ; $\bar{b}_i$ – среднее время обслуживания в фазе m .

Для практических расчетов [6] часто используют приближенное выражение для определения второго сомножителя в выражении (3): $(1 - e^{-\lambda_{Rm} \bar{b}_m}) \approx \lambda_{Rm} \bar{b}_m$. Для случая (2) можно записать выражение для нахождения $P_{\text{Пс2}}$ – вероятности попадания на интервал сбоя кадра, поступающего в заполненный буфер: $P_{\text{Пс2}} = \rho_m \cdot P_{\text{с}}$, где $P_{\text{с}}$ – вероятность сбоя, возникающего в

любой момент времени. Учитывая [6], что $P_{\text{с}} = K_{\Pi} = 1 - K_{\Gamma}$, где K_{Π} – коэффициент простоя, для рассматриваемой СПД можно записать выражение для определения коэффициента потерь с учетом возникновения сбоев:

$$IPLR_m \approx P_{\text{псм}} + (1 - \rho_m)\lambda_{Rm} \bar{b}_m + \rho_m(1 - \gamma_m/(\lambda_{Rm} + \gamma_m)), \quad (5)$$

где $P_{\text{псм}}$ – вероятность потерь из-за переполнения буфера в фазе m , определяется из известного выражения для определения потерь в СМО класса М/Г/1 с ограниченным объемом буфера [5].

В качестве базовой математической модели будем рассматривать СМО класса М/Г/1 с неоднородным потоком заявок и приоритетным обслуживанием [7].

Средняя задержка кадров типа k ($k = 1, 2, 3$) определяется как среднее время пребывания заявок в СМО М/Г/1 с относительными приоритетами [7]:

$$u_k = w_k + b_k, \quad (6)$$

где b_k – среднее время обработки кадров в соответствующей фазе; w_k – среднее время ожидания в очереди:

$$w_k = \frac{\sum_{i=1}^3 \lambda_i b_i^{(2)}}{2(1 - R_{k-1})(1 - R_k)}. \quad (7)$$

Среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) времени пребывания в СМО заявок типа k ($k = 1, 2, 3$) определяется так:

$$\sigma_k = \sqrt{w_k^{(2)} + 2w_k b_k + b_k^{(2)} - u_k^2}, \quad (8)$$

где $b_k^{(2)}$ и $w_k^{(2)}$ – вторые начальные моменты времени обслуживания и ожидания в очередях, соответственно

$$w_k^{(2)} = \frac{\sum_{i=1}^3 \lambda_i b_i^{(3)}}{3(1 - R_{k-1})^2(1 - R_k)} + \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i b_i^{(2)} \sum_{i=1}^3 \lambda_i b_i^{(2)}}{2(1 - R_{k-1})^2(1 - R_k)^2} + \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i b_i^{(2)} \sum_{i=1}^3 \lambda_i b_i^{(2)}}{2(1 - R_{k-1})^3(1 - R_k)}.$$

В выражениях (7)–(9) используются следующие обозначения:

$R_k = \sum_{i=1}^k \rho_i = \sum_{i=1}^k \lambda_i \bar{b}_i$ ($k = \overline{1, 3}$) – частичная суммарная загрузка, причем $R_0 = 0$; λ_i – интенсивность

потока заявок типа i ; $b_i^{(2)}$ и $b_i^{(3)}$ – соответственно, второй и третий начальные моменты времени обслуживания заявок типа $i = 1, 3$.

Значения $b_i^{(2)}$ и $b_i^{(3)}$ могут быть получены экспериментальным путем в процессе измерения реальных параметров обработки данных в маршрутизаторах или рассчитаны для заданных априори конкретных законов распределений.

Средняя сетевая задержка и ее с.к.о. вычисляются через значения характеристик соответствующих фаз обслуживания:

$$u_{N_\Phi} = \sum_{m=1}^{N_\Phi} u_m, \sigma_{N_\Phi} = \sqrt{\sum_{m=1}^{N_\Phi} \sigma_m^2}, \quad (10)$$

где N_Φ – число фаз обслуживания; u_m – средняя задержка заявки в фазе m ; σ_m – с.к.о. задержки в фазе $m = 1, N_\Phi$.

Выражения (6)–(10) получены для стационарного режима функционирования сети.

Для анализа IPDV необходимо иметь представление о законе распределения времени задержки в каждом из рассматриваемых сегментах сети. В отличие от характеристики IPTD и показателя потерь IPRL, показатель IPDV не допускает суммирования его значений на участке, состоящем из нескольких сетевых секций (фаз обслуживания) [3].

Вычисление показателя IPDV на выходе каждого сетевого сегмента (фазы обслуживания) требует информации о законе распределения задержки в каждом из рассматриваемых сегментов.

При оценке и прогнозировании показателя

IPDV [8], 0,999 – квантиль функции распределения времени задержки, требуемый для вычисления IPDV, можно приближенно определить из следующего выражения:

$$\text{IPTD}_{\text{upper}} = \bar{u}_m + c_{xm} \sigma_{um}, \quad (11)$$

где $\bar{u}_m$ – средняя задержка в фазе m обслуживания СД; σ_{um} – с.к.о. задержки в фазе m ; c_{xm} – коэффициент, связанный с типом и параметрами распределения задержки. Графическая интерпретация определения квантиля $\text{IPTD}_{\text{upper}}$ функции распределения интервала задержки $F_{(t)}$ приведена на рис. 2. Значение IPTD_{min} определяется из выражения $\text{IPTD}_{\text{min}} = u_{\text{пер min}} + u_{\text{обр min}} + t_{\text{pij}}$, где $u_{\text{пер min}}$ – минимальное время передачи кадра,

$u_{\text{пер min}} = \frac{8n_{\text{min}}}{V_{\text{max}}}$, n_{min} – минимальная длина кадра, выраженная в байтах, V_{max} – максимальная скорость передачи, t_{pij} – задержка распространения сигнала на рассматриваемом участке СД, между узлами i и j . Вычисленные значения коэффициента c_x для некоторых типов распределений и значений их параметров приведены в табл. 1.

Численное исследование разработанной модели проводилось на основе выражений для СМО М/Г/1 с неоднородным потоком заявок с двумя и тремя классами относительных приоритетов. Диапазон варьируемых параметров был выбран вблизи исходных данных, характерных для практики, приведенных в табл. 2.

При этом, при исследовании фаз, на которые воздействуют потоки отказов и восстановлений,

Таблица 1

Значения коэффициента c_x

Вид распределения	Значения параметров	Значения коэффициента вариации v_x	Значения коэффициента c_x
Экспоненциальное	–	1	5,90
Парето	$k = 10; \alpha = 2,01$	7,14	2,23
	$k = 10; \alpha = 2,1$	2,22	6,22
	$k = 10; \alpha = 2,5$	0,83	9,81
Вейбулла–Гнеденко	$a = 1; c = 0,2$	15,8	8,16
	$a = 1; c = 1$	1	5,90
	$a = 1; c = 10$	0,35	2,35
	$a = 1; c = 100$	0,11	1,4

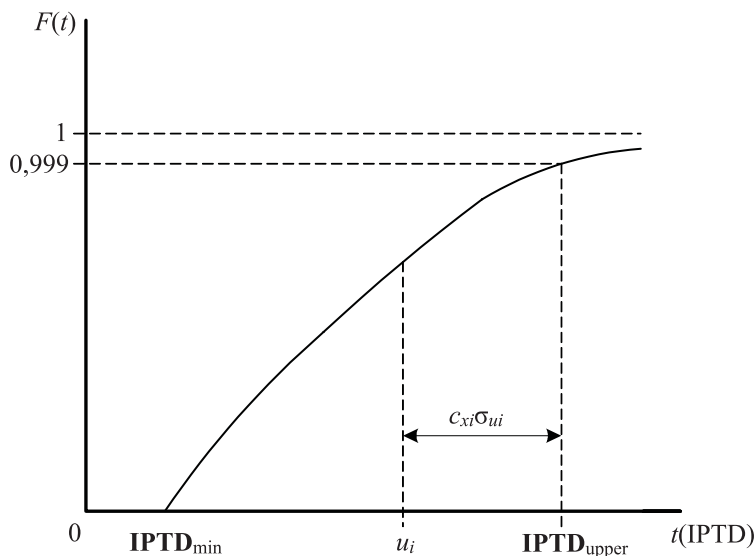


Рис. 2. Графическая интерпретация определения квантиля функции распределения интервала задержки

эти потоки интерпретировались как потоки заявок с высшим приоритетом и интервалы обслуживания заявок с высшим приоритетом соответственно.

Расчет IPTD производился с помощью приведенных выше выражений для определения средней задержки в СМО класса M/G/1 с тремя классами приоритетов в обслуживании (6), (7). С.к.о. вычислялось с помощью выражений (8), (9). IPLR определялось с помощью полученного выше выражения (5).

Результаты численных исследований разработанной модели кольцевой СД приведены на рис. 3.

Для проверки результатов аналитического моделирования разработаны имитационные модели как восходящей, так и нисходящей ветвей.

В обеих имитационных моделях производится разметка транзактов всех передаваемых видов трафика для их последующего раздельного табулирования. Потоки отказов в обеих моделях формируются генераторами, транзактам которых присваивается высший приоритет. В модели восходящей ветви фаза 3 подгружается дополнительным потоком, создаваемым специальным генератором. Этот поток имитирует суммарный поток, создаваемый $N_N - 1$ концентраторами,

Таблица 2

Исходные данные для исследования ОСД

Направление передачи	Номера фаз обслуживания	Средние интенсивности потоков, 1/мкс			Средние значения интервалов обслуживания, мкс		
		VoIP+BK	DoIP	Отказы	VoIP+BK	DoIP	Восстановления
Восходящее	1	$7 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}	-	$4,9 \cdot 10^2$	$1,76 \cdot 10^4$	-
	2	$7 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^2$	10^3	10^5
	3	$7 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	-	7,2	23,4	-
Нисходящее	4	10^{-3}		-	1		-
	5	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	-	$3,8 \cdot 10^1$	$1,2 \cdot 10^3$	
	6	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^2$	10^3	10^5
	7	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	-	7,24	23	

а генератор, подгружающий фазу 2, имитирует суммарный поток, создаваемый $N-1$ абонентами i -го концентратора, и terminates отдельно от основного потока. Программа модели восходящей ветви содержит 87 выполняемых строк, а программа нисходящей ветви – 53 строки.

На рис. 3 а приведены кривые зависимости IPTD и с.к.о. задержки в сегменте СД от интенсивности потока одного пользователя: 1 – IPTD, постоянное обслуживание, $v_b = 0$; 2 – IPTD, простейший поток обслуживания, $v_b = 1$; 3 – IPTD, гиперэкспоненциальное обслуживание, $v_b = 2$; 4 – с.к.о. задержки, постоянное обслуживание; 5 – с.к.о. задержки, гиперэкспоненциальное обслуживание, $v_b = 1,5$; 6 – с.к.о. задержки, гиперэкспоненциальное обслуживание, $v_b = 2$. Кривая 2' иллюстрирует результаты имитационного моделирования с исходными данными кривой 2.

В данном случае под гиперэкспоненциальным обслуживанием понимается поток обслуживания, в котором интервалы задаются гиперэкспонен-

циальным распределением второго порядка. Выражения для определения набора характеристик этого распределения приводятся в [10].

На рис. 3 б показаны кривые зависимости IPLR от коэффициента загрузки СМО для фазы 2 (ненадежная СД), $b_m = 1$ мс, объем буфера $K_m = 20$, $T_{Bm} = 100$ мс: 1. $K_\Gamma = 1$; 2. $\lambda_{Rm} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ мс}^{-1}$; 3. $\lambda_{Rm} = 10^{-4} \text{ мс}^{-1}$.

На рис. 3 в приведено семейство кривых зависимости IPTD в фазе 2 от интенсивности потока (ненадежная сеть) для различных значений интенсивности потока отказов:

1. DoIP, $K_{\Gamma m} = 1$;
2. VoIP, $K_{\Gamma} = 1$;
3. DoIP, $\lambda_{Rm} = 2,8 \cdot 10^{-10} \text{ мкс}^{-1}$;
4. VoIP, $\lambda_{Rm} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ мкс}^{-1}$;
5. DoIP, $\lambda_{Rm} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ мкс}^{-1}$;
6. VoIP, $\lambda_{Rm} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ мкс}^{-1}$;
7. DoIP, $\lambda_{Rm} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ мкс}^{-1}$;
8. VoIP, $\lambda_{Rm} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ мкс}^{-1}$.

На рис. 3 г показано семейство кривых за-

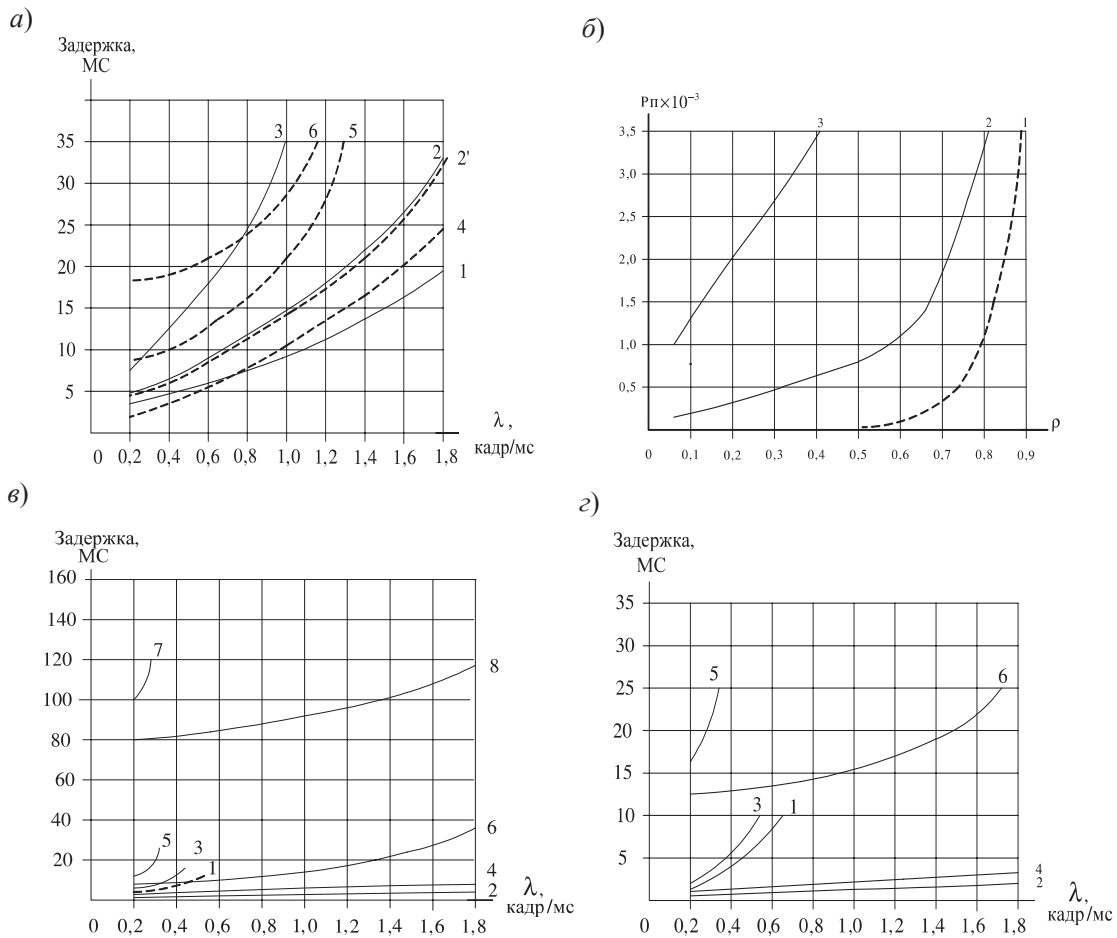


Рис. 3. Результаты численных исследований моделей СД

зависимостей средней задержки от интенсивности потока различных видов трафика в фазе 2 (ненадежная сеть), для различных средних значений интервала восстановления T_{Bm} :

1. DoIP, $K_T = 1$;
2. VoIP, $K_T = 1$;
3. DoIP, $\lambda_{Rm} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ мкс}^{-1}$, $T_{Bi} = 0,1 \text{ с}$;
4. VoIP, $T_{Bm} = 0,1 \text{ с}$;
5. DoIP, $T_{Bm} = 1 \text{ с}$;
6. VoIP, $T_{Bm} = 1 \text{ с}$.

Анализируя полученные результаты, можно заметить, что минимальное среднее значение задержки и ее с.к.о. обеспечиваются при постоянном обслуживании ($v_b = 0$), в системе M/D/1. При повышении коэффициента вариации интервала обслуживания происходит резкий рост задержки. При одних и тех же значениях интенсивности потока и средних значениях интервала обслуживания рост v_b в фазе 1, в диапазоне $0 \div 2$, приводит к росту задержки при малых нагрузках СМО в 3,1 раза, а при больших нагрузках – более чем в 10 раз. В фазах с приоритетным обслуживанием, учитывающих ненадежность оборудования, интенсивность потока сбоев оказывает наибольшее влияние на задержку трафика с низким приоритетом. Восприимчивость средней задержки к возрастанию длительности интервалов восстановления также наибольшая для заявок с низшим приоритетом, а задержки заявок с высокими классами относительных приоритетов восприимчивы к увеличению интервала восстановления в наименьшей степени. Это объясняется тем, что до возникновения сбоя успевает обслуживаться большее число заявок с высшим приоритетом, при этом заявки с низшим приоритетом дольше ожидают в очереди. При возникновении сбоя низкоприоритетные требования продолжают ожидать обслуживания до тех пор, пока сбой не восстановится, и не будут обслужены заявки с высшим приоритетом. Это же проявляется и в восприимчивости к повышению коэффициента вариации времени восстановления – задержка заявок с высшим приоритетом обслуживания значительно меньше возрастает при росте коэффициента вариации времени восстановления v_{Rm} , чем задержка заявок с низшим приоритетом.

Кроме этого, наблюдается существенный рост IPLR при росте интенсивности потока отказов λ_{Rm} . При больших значениях λ_{Rm} кривая зависимости IPLR от нагрузки СМО спрямляется, а угол ее наклона возрастает по сравнению с кривой, полу-

ченной для малых значений λ_{Rm} . Последнее объясняется тем, что при разных значениях параметра λ_{Rm} перераспределяется влияние слагаемых в выражении (5) на рост IPLR. При малых λ_{Rm} большее влияние оказывает первое слагаемое, а при больших λ_{Rm} увеличивается воздействие двух других слагаемых, что приводит к повышению крутизны и изменению характера кривой.

При возрастании интервала восстановления в диапазоне от 10 мс до 300 мс, при средних нагрузках СМО ($\rho_m = 0,5$), IPLR возрастает от $0,1 \cdot 10^{-3}$ до $2,3 \cdot 10^{-3}$, при фиксированном значении объема буфера, интервала обслуживания и интенсивности потока отказов. В то же время, при средних нагрузках, при изменении интенсивности потока отказов в диапазоне от 0 до 10^{-4} мс^{-1} , при фиксированных объеме накопителя, времени восстановления ($T_{Bm} = 0,1 \text{ с}$) и среднего значения интервала обслуживания ($b_m = 1 \text{ мс}$), IPLR возрастает более чем в 100 раз.

Анализируя полученные результаты, можно сформулировать следующие выводы и предложения.

1. Анализ характеристик качества обслуживания ненадежной СД целесообразно производить на основе аналитических и имитационных моделей СМО с неоднородным потоком заявок с тремя классами относительных приоритетов и многофазовым обслуживанием. При этом поток кратковременных отказов (аппаратурные сбои) должен интерпретироваться в виде потока заявок СМО с высшим классом приоритета, трафик VoIP – как поток заявок со средним приоритетом; трафик DoIP – как поток заявок с низшим приоритетом, а поток интервалов восстановления – как процесс обслуживания заявок с высшим приоритетом, с распределением интервалов общего вида.

2. Восприимчивость IPTD к возрастанию средних значений интервалов восстановления наибольшая для заявок с низшим приоритетом, в то время как задержка заявок с высоким классом относительных приоритетов в наименьшей степени восприимчива к росту средних значений интервала восстановления.

3. Минимальное значение IPTD обеспечивается при постоянном обслуживании, $v_b = 0$ (в системе M/D/1);

4. При одних и тех же значениях интенсивности потока и средних значениях интервала обслуживания рост коэффициента вариации времени



обслуживания v_{b1} в диапазоне от нуля до двух, приводит к росту IPTD при малых нагрузках СМО ($\rho_1 \approx 0,3$) в 3,1 раза, а при больших нагрузках ($\rho_1 \approx 0,8$) – более чем в 10 раз.

5. В фазах с приоритетным обслуживанием, учитывающих ненадежность оборудования, влияние интенсивности потока аппаратурных сбоев проявляется в наибольшей степени на IPTD трафика с низким приоритетом (DoIP), при этом

задержка высокоприоритетного трафика (VoIP) испытывает наименьшую восприимчивость к повышению интенсивности потока кратковременных отказов.

6. Результаты аналитического и имитационного моделирования расходятся незначительно (менее 12–15 %) во всем диапазоне нагрузок, что свидетельствует о работоспособности разработанных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никульский, И.Е.** Оптические интерфейсы цифровых коммутационных станций и сети доступа [Текст] / И.Е. Никульский. – М.: Техносфера, 2006. – 256 с.
2. **Никульский, И.Е.** Реконструкция сети Волгодонского района [Текст]/Г.С. Егорочкин, В.В. Макаров, И.Е. Никульский, Ю.В. Метла // Вестник связи. – 2005. – № 7. – С. 53–56.
3. МСЭ-Т, рекомендация Y.1541/ Требования к сетевым показателям качества для служб, основанных на протоколе IP [Текст]. – Женева, 2006. – 44 с.
4. ITU-T, Recommendation X.86/Y.1323 / «Ethernet over LAPS» [Текст]. – Geneva, 2001. – 28 с.
5. **Зелигер, Н.Б.** Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений: Учеб. пособие для вузов [Текст]/Н.Б. Зелигер, О.С. Чугреев, Г.Г. Яновский. – М.: Радио и связь, 1984. – 176 с.
6. **Голинкевич, Т.А.** Прикладная теория надежности: Учеб. пособие для вузов [Текст]/Т.А. Голинкевич. – М.: Высш. шк., 1985. – 137 с.
7. **Никульский, И.Е.** Моделирование ядра мультисервисной сети с относительной приоритизацией неоднородного трафика [Текст]/Т.И. Алиев, И.Е. Никульский, В.О. Пятаев // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – Вып. 04 (62). – С. 88–96.
8. **Соколов, Н.А.** Качество обслуживания трафика речи в сети NGN [Текст]/Н.А. Соколов//Connect! Мир связи. – 2006. – № 7. – С. 13–15.
9. **Бражник, А.Н.** Имитационное моделирование: возможности GPSS World [Текст]/А.Н. Бражник. – СПб.: Реноме, 2006. – 439 с.
10. **Вадзинский Р.Н.** Справочник по вероятностным распределениям [Текст]/Р.Н. Вадзинский. – СПб.: Наука, 2001.

УДК 778.5

Е.И. Нестерова, А.В. Бабкин

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ)

Цель управления кинематографической системой заключается в таком выборе оптимальных значений частных, обобщенных характеристик и интегральных показателей из соответствующих допустимых множеств, чтобы критерий качества кинопоказа системы в целом принимал наилучшее значение. При этом частные характеристики непосредственно входят в качестве управляемых параметров в обобщенные, обобщенные как управляемые параметры – в интегральные, а интегральные как управляемые параметры входят в

критерий качества кинопоказа, обеспечиваемого системой. Множества значений весовых коэффициентов частных характеристик, значений самих характеристик определяются по результатам квалитетных экспертиз.

Весовые коэффициенты частных характеристик составляют совокупность измерений первичных показателей состояния базисных элементов системы, т. е. они принципиально представляют выборку – реализацию многомерной случайной величины. Объективным основанием этого факта

является то, что несмотря на постоянный количественный уровень частной характеристики изображения или функциональной характеристики услуги, субъективные оценки, получаемые при субъективной экспертизе, имеют разброс вследствие случайного характера весовых коэффициентов для каждого эксперта. Поэтому обобщенные характеристики, интегральные показатели и критерий качества функционирования системы в целом являются функциями случайных величин; их целесообразно оценивать своими числовыми характеристиками – моментами, а последние удобно определять с использованием семиинвариантов и принимать их как критерии качества управления на соответствующих уровнях иерархической структуры кинематографической системы [1–4]. Вычисление семиинвариантов, естественно, предполагает знание характеристических функций соответственно обобщенных характеристик, интегральных показателей и критерия верхнего уровня системы.

Введенные критерии должны оптимизироваться как в интересах конкретного уровня, так и системы в целом.

В связи с этим объективно имеют место два варианта централизованного управления системой. В одном из них реализуется принцип конечной цели – цели только верхнего уровня, или это вариант со строгой централизацией управления – в нем все уровни системы подчинены единой глобальной цели системы. В другом варианте реализуется принцип иерархии, т. е. это вариант, при котором отдельным уровням, подчиненным верхнему, предоставляется право вырабатывать управляющие воздействия по отношению к непосредственно подчиненным им информационным элементам соответствующего нижнего уровня системы.

В основу построения критерия для варианта строго централизованного управления (критерия управления по оптимальному достижению единой цели системы) как критерия, охватывающего в целом зависимые или независимые частные, обобщенные и интегральные квалиметрические неотрицательные характеристики и показатели (рис. 1), принимаются следующие утверждения.

1.1. Линейная комбинация характеристических функций при условии, что коэффициенты комбинации вещественны, неотрицательны и их сумма равна единице, является характеристической функцией.

1.2. Вещественная часть характеристической функции и квадрат ее модуля являются характеристическими функциями.

1.3. Суммарный эффект кинопоказа, оцениваемый по любой из обобщенных квалиметрических характеристик q_{li} определяется вещественной частью характеристической функции $\varphi_{q_{li}}(\Delta q_{ij}) = M \exp\{jk_i \Delta q_{ij}\}$ линейной формы $q_{li} = \sum_{j=1}^n k_{ij} \Delta q_{ij}$ любых вещественнозначных физически реализуемых квалиметрических частных характеристик q_{ij} – характеристик нижнего уровня иерархически упорядоченной их структуры, где $\Delta q_{ij} = 1 - q_{ij}$ – отклонение частной квалиметрической характеристики от эталонного уровня, измеренное в нормированной относительной шкале; M – обозначение математического ожидания; j – индекс частной характеристики; i – индекс обобщенной характеристики; l – индекс интегрального показателя; q_i – обобщенная характеристика, определяемая линейной комбинацией вещественных частных характеристик q_{ij} по индексу j для каждого индекса i ; k_{ij} – весовой коэффициент (случайная величина) соответствующей частной характеристики; множества значений коэффициентов определяются в процессе квалиметрической экспертизы элементов системы.

1.4. Суммарный эффект кинопоказа, оцениваемый по любому интегральному квалиметрическому показателю Q_l , определяется характеристической функцией $\varphi_{Q_l}(\Delta q_{li}) = \sum_{i=1}^m k_{li} \varphi_{q_{li}}(\Delta q_{li})$; $\sum_{i=1}^m k_{li} = 1$; $k_{li} \geq 1$ линейной формы характеристических функций обобщенных квалиметрических характеристик q_{li} , непосредственно связанных иерархическим упорядочением с l -м интегральным показателем; k_{li} – весовой коэффициент характеристической функции соответствующей обобщенной характеристики; $\Delta q_{li} = 1 - q_{li}$ – отклонение обобщенной характеристики от эталонного значения, измеренное в относительной нормированной шкале.

1.5. Показатель качества – Q кинопоказа в целом оценивается максимальным значением смешанного семиинварианта первого порядка – v

$$\gamma_Q = \arg \max_{\{k_{ij}; k_{li}; k_l\}} \left(\frac{1}{j^v} \right) \frac{d^v}{d(\Delta Q_l)} \ln \varphi_Q(\Delta Q_l);$$

$$v = \sum_{i=1}^n v_i = 1; v = 1, 0$$

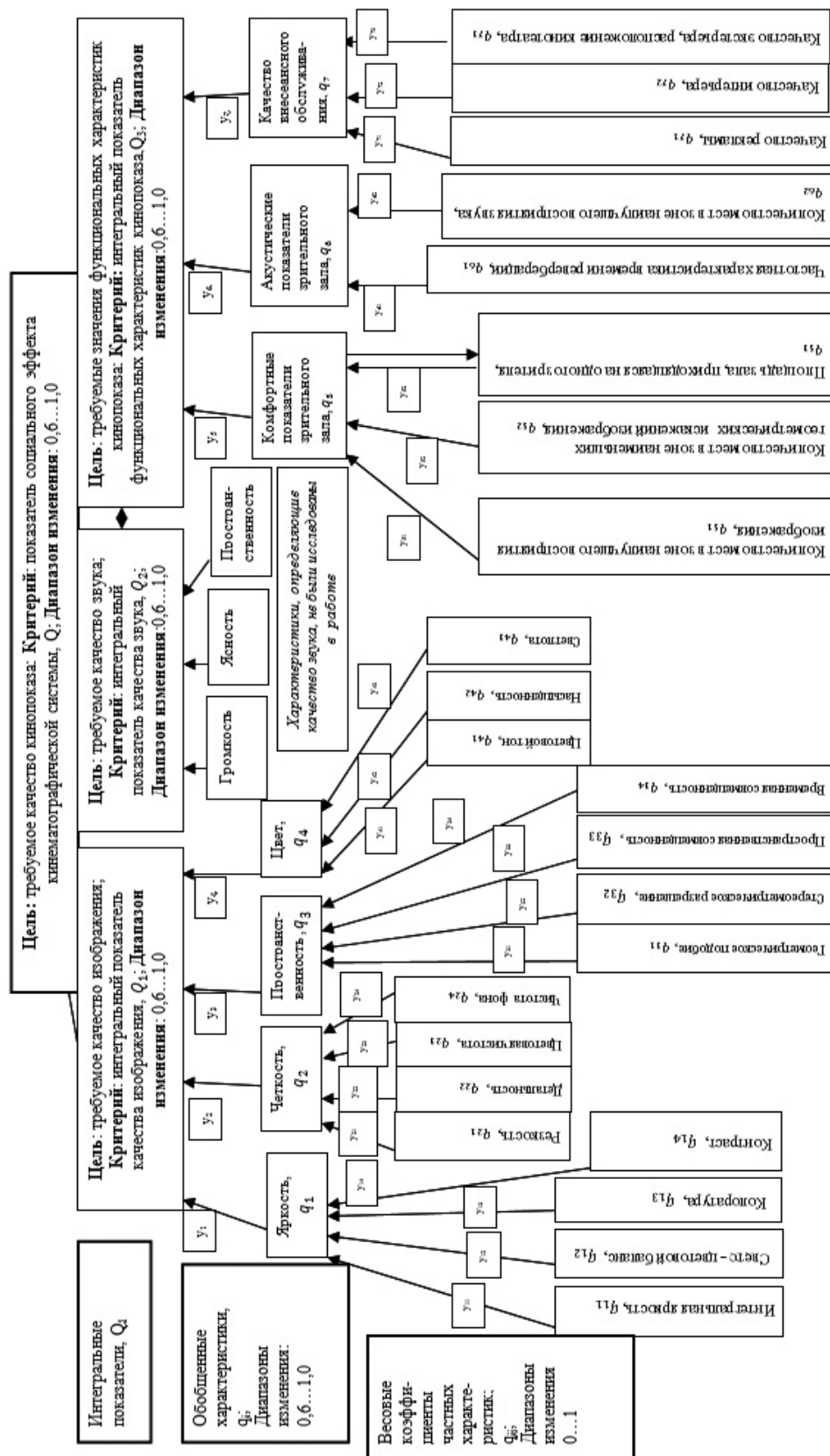


Рис. 1. Схема управления кинематографической системой по оптимальному достижению единой цели системы

по характеристической функции

$$\varphi_Q(\Delta Q_l) = \sum_{l=1}^n k_l \varphi_{Q_l}(\Delta Q_l); \quad \sum_{l=1}^n k_l = 1; \quad k_l \geq 0$$

линейной формы характеристических функций интегральных квалиметрических показателей Q_l ; $l = 1, \dots, n$, непосредственно определяющих в соответствии с иерархическим упорядочением эффект управления социальной кинематографической системой; k_l – весовой коэффициент характеристической функции соответствующего интегрального показателя.

В основу построения критериев для варианта управления кинематографической системой по иерархическому принципу (*по оптимальному достижению частных и единой цели системы*) (рис. 2), охватывающему зависимые или независимые частные характеристики – q_{ij} , $j = 1 \dots n$ исходного уровня системы, обобщенные – q_{li} , $i = 1 \dots m$ на другом уровне и интегральные показатели – Q_p , $l = 1 \dots n$ на третьем, верхнем уровне иерархии принимаются следующие утверждения.

2.1. Смешанный семиинвариант (кумулянт) v -го порядка как соответствующий критерий качества управления, подлежащий оптимизации, определяется значением смешанной производной v -го порядка логарифма характеристической функции в нулевой точке.

2.2. Суммарный эффект кинопоказа, оцениваемый по любой из обобщенных квалиметрических характеристик q_{li} , определяется, в общем случае, множеством максимальных значений смешанного семиинварианта первого порядка

$$A_{li} = \arg \max_{\{k_{ij} \in A_{ij}\}} \gamma_{v_{li} q_{li}};$$

$$\gamma_{v_{li} q_{li}} = \frac{1}{j^{v_{ij}}} \frac{d^{v_{ij}}}{d(\Delta q_{ij})^{v_{ij}}} \ln \varphi_{q_{li}}(\Delta q_{li})_{|\Delta q_{li}=0};$$

$$v_{li} = \sum_{j=1}^n v_{ij} = 1, \quad v_{ij} = 1, 0$$

по характеристической функции линейной формы $q_{li} = \sum_{j=1}^n k_{ij} \Delta q_{ij}$ вещественнозначных физически реализуемых квалиметрических частных характеристик q_{ij} исходного уровня иерархически упорядоченной их структуры.

Вычисленные таким образом множества A_{li} для всех $i = 1 \dots n$ передаются на уровень иерархии выбора оптимальных решений по интегральным показателям, точнее, по смешанным инвариантам интегральных показателей.

2.3. Суммарный эффект кинопоказа, оцениваемый по любому интегральному квалиметрическому показателю Q_p , $l = 1 \dots n$ определяется максимальным значением смешанного семиинварианта первого порядка

$$B_l = \arg \max_{\{k_{li} \in B_{li}\}} \min_{\bigcup_{li} A_{li}} \gamma_{v_l Q_l},$$

$$A_{li} = \arg \max_{\{k_{ij} \in A_{ij}\}} \gamma_{v_{li} q_{li}}$$

$$\varphi_{Q_l}(\Delta q_{li}) = \sum_{i=1}^m k_{li} \varphi_{q_{li}}(\Delta q_{li});$$

$$\sum_{i=1}^m k_{li} = 1; \quad k_{li} \geq 0;$$

$$\gamma_{v_l Q_l} = \frac{1}{j^v} \frac{d^v}{d(\Delta Q_l)^v} \ln \varphi_{Q_l}(\Delta Q_l)_{|\Delta Q_l=0},$$

$$v_l = \sum_{i=1}^m v_{li} = 1, \quad v = 1, 0$$

по характеристической функции линейной формы вещественнозначных физически реализуемых обобщенных квалиметрических характеристик q_{li} , непосредственно связанных иерархическим упорядочением с соответствующим интегральным показателем Q_l .

Выбор решений на этом уровне иерархии системы осуществляется по принципу наилучшего гарантированного результата, т. е. с учетом возможных неблагоприятных для этого уровня решений нижнего уровня. Установленные при этом множества B_i для всех $i = 1 \dots n$ и множества A_{li} для всех $i = 1 \dots m$ передаются на верхний уровень иерархии для выбора окончательного оптимального решения.

2.4. Показатель качества кинопоказа Q в целом оценивается максимальным значением смешанного семиинварианта первого порядка

$$C_Q = \arg \max_{\{k_l \in C_l\}} \min_{\bigcup_l B_l} \gamma_{v_Q Q},$$

$$B_l = \arg \max_{\{k_{li} \in B_{li}\}} \min_{\bigcup_{li} A_{li}} \gamma_{v_l Q_l},$$

$$A_{li} = \arg \max_{\{k_{ij} \in A_{ij}\}} \gamma_{v_{li} q_{li}},$$

$$\gamma_{v_Q Q} = \frac{1}{j^v} \frac{d^v}{d(\Delta Q)^v} \ln \varphi_Q(\Delta Q)_{|\Delta Q=0},$$

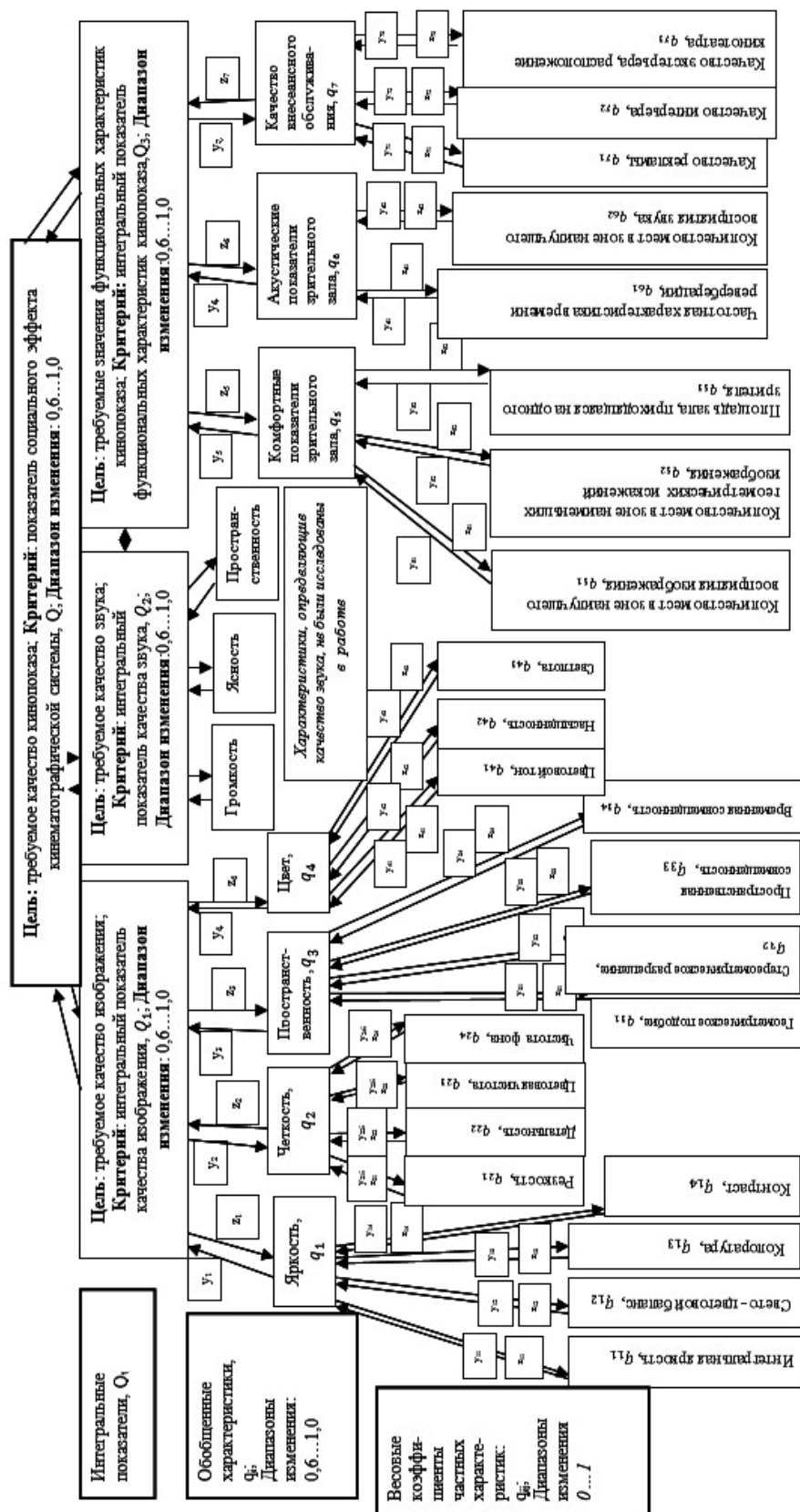


Рис. 2. Схема управления кинематографической системой по оптимальному достижению частных и единой цели системы

$$\gamma_{v_l Q_l} = \frac{1}{j^{v_l}} \frac{d^{v_l}}{d(\Delta Q_l)^{v_l}} \ln \varphi_{Q_l}(\Delta Q_l)_{\Delta Q_l=0},$$

$$\gamma_{v_{li} q_{li}} = \frac{1}{j^{v_{li}}} \frac{d^{v_{li}}}{d(\Delta q_{li})^{v_{li}}} \ln \varphi_{q_{li}}(\Delta q_{li})_{\Delta q_{li}=0},$$

$$\varphi_Q(\Delta Q_l) = \sum_{l=1}^n k_l \varphi_{Q_l}(\Delta Q_l),$$

$$\varphi_{Q_l}(\Delta q_{li}) = \sum_{i=1}^m k_{li} \varphi_{q_{li}}(\Delta q_{li}),$$

$$v = \sum_{l=1}^n v_l = 1, v_l = 1, 0; \sum_{i=1}^m k_{li} = 1,$$

$$k_{li} \geq 0, \sum_{l=1}^n k_l = 1, k_l \geq 0$$

по характеристической функции линейной формы $Q = \sum_{l=1}^n k_l \Delta Q_l$ вещественнозначных физически реализуемых интегральных квалиметрических показателей $Q_l, l=1 \dots n$, непосредственно определяющих, в соответствии с иерархическим упорядочением, эффективность социальной кинематографической системы.

На этом – верхнем уровне иерархии управления системой, – принимается окончательное решение так же, как и на нижестоящем, по принципу наилучшего гарантированного результата с одновременным уточнением выбранных решений всеми другими подчиненными уровнями из их множеств $B_i, i=1 \dots n, A_{ij}, j=1 \dots m$.

Достоверность принятых утверждений основывается на принятых выше утверждениях 1.1., 1.2., 2.1. и доказанных в [1–4], на агрегированном представлении линейными комбинациями совокупности функций любых зависимых или независимых весовых коэффициентов квалиметрических частных q_{ij} , а также обобщенных характеристик q_{li} и интегральных показателей Q_l как случайных величин, подчиненных произвольным законам распределения вероятностей с существующими моментами, и на применении принципа Штакельберга, адекватно отражающего реальный порядок выбора решения в многоуровневых иерархически сложных системах.

Каждой линейной комбинации однозначно соответствует комплексная функция – характеристическая функция многомерной случайной величины, представляющей либо обобщенную квалиметрическую характеристику, либо интегральный

показатель, либо показатель социального эффекта кинематографической системы в целом. Энергия каждой из таких характеристических функций равна, по известной теореме Парсеваля [4], соответственно энергии линейной комбинации функций исходных квалиметрических частных, или обобщенных характеристик, или интегральных показателей и, очевидно, однозначно зависит от каждого слагаемого соответствующей линейной комбинации. Теорема Парсеваля выводит также на аналогичные соотношения для плотностей распределения вероятностей обобщенных характеристик, интегральных показателей, показателя кинопоказа системы в целом с соответствующими им характеристическими функциями. Формирование характеристической функции верхнего уровня основано на реализации принципа вложения характеристических функций нижних уровней в соответствии с иерархической структурой кинематографической системы.

Таким образом, по характеристической функции показателя верхнего уровня у последнего, наряду с оптимизацией своего критерия, имеется реальная возможность количественного исследования влияния каждой из частных квалиметрических характеристик на соответствующую обобщенную характеристику, каждой обобщенной характеристики – на соответствующий интегральный показатель и каждого интегрального показателя – на показатель качества кинематографической системы в целом как в условиях строго централизованного управления, так и при принятии управленческих решений по принципу Штакельберга, т. е. с учетом права самостоятельного принятия соответствующих решений на отдельных уровнях кинематографической системы.

Алгоритм проверки гипотезы о нормальности распределения случайных весовых коэффициентов частных квалиметрических характеристик и случайных субъективных оценок обобщенных характеристик был разработан и апробирован для коэффициента чувствительности к отклонению интегральной яркости, причем, если сначала экспериментальные исследования предполагали моделирование характеристик за счет конструктивно-технологических параметров аппаратуры, то с появлением возможности использования программного обеспечения для

Результаты расчетов, подтверждающих гипотезу о нормальности закона распределения весовых коэффициентов характеристик и субъективных оценок

Название переменной	$\bar{X}$	σ	n	$\chi^2_{k,1/2q}$	$\chi^2_{k,1-1/2q}$	χ^2_{Σ}
Коэффициент чувствительности к интегральной яркости	0,62	0,05	71	0,103	5,991	5,932
Коэффициент весомости характеристик, определяющих соответствие изображения размеру экрана	0,18	0,02	71	0,103	5,991	5,094
Субъективная оценка яркости	0,70	0,01	51	0,103	5,991	3,230
Субъективная оценка технологических параметров зрительного зала	0,73	0,04	52	0,711	9,488	8,316

моделирования характеристик аналогичные исследования были распространены на оценку коэффициентов чувствительности к отклонениям характеристик видеопроекционного изображения, а затем экспертизы, в основе которых лежит аналогичный алгоритм, были распространены на область функциональной квалитметрии. Вне зависимости от вида оцениваемого параметра (весового коэффициента, квалитметрической ха-

рактеристики), алгоритм включал следующие этапы:

- проведение квалитметрической экспертизы по оценке весового коэффициента или квалитметрической характеристики;
- проверку гипотезы о нормальности закона распределения весового коэффициента частной характеристики или субъективной оценки обобщенной характеристики с помощью критерия

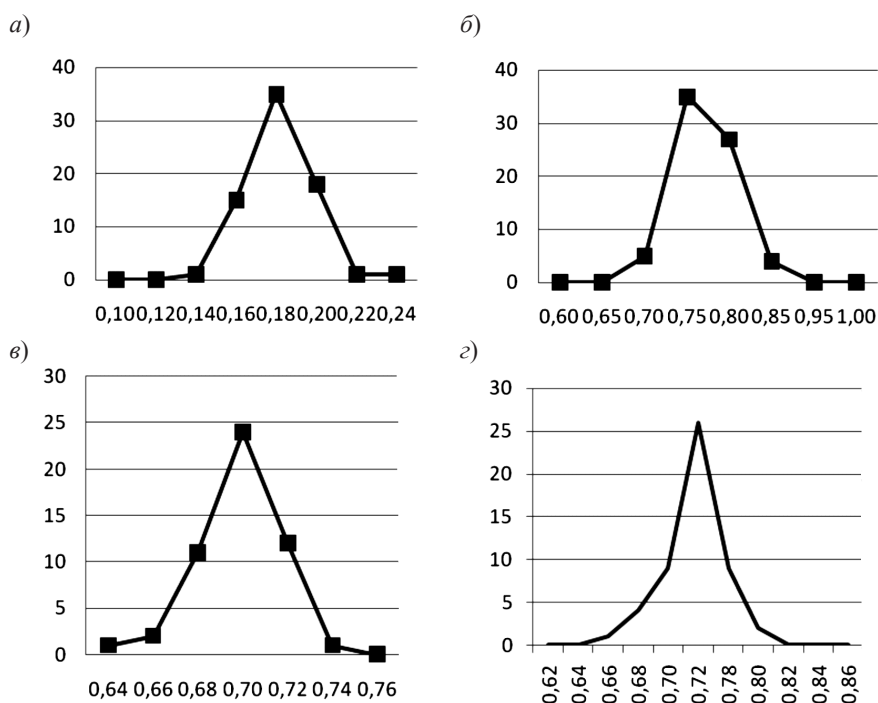


Рис. 3. Распределение вероятности появления:

а – коэффициента чувствительности к интегральной яркости; б – коэффициента весомости соответствия изображения размеру экрана; в – субъективной оценки яркости; г – субъективной оценки технологических параметров зала

$$\text{Пирсона } \chi_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^r \chi_i^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(m_i - nP_i)^2}{nP_i}.$$

По результатам квалиметрических экспертиз были проверены гипотезы о нормальности распределения весовых коэффициентов к частным характеристикам, определяющим качество кинопоказа (рис. 3 а, б) и субъективных оценок обобщенных характеристик (рис. 3 в, г) результаты расчетов критерия Пирсона приведены в таблице.

Как оказалось, распределения вероятностей для исследованных параметров действительно подчиняются нормальному закону. Нормальное распределение вероятности появления весовых коэффициентов частных характеристик и субъективных оценок обобщенных характеристик позволяет для оценки характеристических функций обобщенных, интегральных показателей и показателя социального эффекта кинематографической системы использовать следующие выражения:

$$\varphi(\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, \Delta Q_l) = e^{j \sum_{i=1}^l \bar{k}_i \Delta Q_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \Delta Q_i \Delta Q_{i+1} \sigma_i \sigma_{i+1} r_{i,j+1}},$$

$$\varphi(\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n) = e^{j \sum_{i=1}^n \bar{k}_i \Delta q_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta q_i \Delta q_{i+1} \sigma_i \sigma_{i+1} r_{i,j+1}},$$

$$\varphi_i(\Delta q_{i1}, \Delta q_{i2}, \dots, \Delta q_{im}) = e^{j \sum_{j=1}^m \bar{k}_{ij} \Delta q_{ij} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \Delta q_{ij} \Delta q_{i,j+1} \sigma_i \sigma_{i,j+1} r_{i,j,j+1}}.$$

Предложенные в работе информационно-квалиметрические критерии управления кинематографической системой были апробированы для такого элемента кинематографической системы, как кинопоказ [5–7], полученные результаты подтвердили целесообразность их использования как для сравнительного квалиметрического анализа услуг по кинопоказу, так и для формирования требований к предшествующим кинопоказу элементам кинематографических систем, а также для решения проблем сертификации мультимедийных центров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей [Текст] / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1969. – 400 с.
2. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее применения [Текст] / В. Феллер. – М.: Наука, 1967. – Т. 2. – 738 с.
3. Ширяев, А.Н. Вероятность [Текст] / А.Н. Ширяев. – М.: Наука, ФМЛ, 1980.
4. Прохоров, А.В. Задачи по теории вероятностей [Текст] / А.В. Прохоров, В.Г. Ушаков, Н.Г. Ушаков. – М.: Наука, ФМЛ, 1986.
5. Нестерова, Е.И. Квалиметрия и техническое регулирование в кинематографии [Текст] / Е.И. Нестерова. – СПб.: Политехника, 2010. – 183 с.
6. Нестерова, Е.И. Методология экспертной квалиметрии и сертификации систем качества в кинематографии [Текст] / Е.И. Нестерова. – СПб.: Политехника, 2005. – 248 с.
7. Нестерова, Е.И. Квалиметрические технологии в системах качества предприятий и организаций кинематографии [Текст] / Е.И. Нестерова. – СПб.: Политехника, 2007. – 152 с.

УДК 51-77; 007; 316.4

Д.Н. Верзилин, Т.Г. Максимова

МОДЕЛИ РЕАКЦИИ СОЦИАЛЬНЫХ СУБЪЕКТОВ НА ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Общие подходы и принципы концептуального моделирования причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий в социуме

Оценивание состояния социума осуществляется по результатам мониторинга массовых событий. Субъекты социума представляют собой как отдельных индивидуумов, так и их совокупности,

созданные на принципах организации и самоорганизации. Движение субъектов социума – это процесс изменения их состояния. Социум находится в динамическом равновесии при постоянном движении. Примерами массовых событий для индивидуумов являются рождение, начало заболевания, выздоровление, утрата трудоспособности, смерть, поступление в учебное заведение, его



окончание, поступление на работу, увольнение с работы и т. д., для организаций – создание, ликвидация, вхождение в состав более крупной системы и т. д. Субъекты социума обладают характеристиками, оказывающими влияние на возможность и частоту наступления массовых событий. Моделирование состояний субъектов социума и реакции социума на внешнее воздействие целесообразно осуществлять в рамках моделирования функционирования социально-экономических систем, в которых действуют моделируемые субъекты.

Массовые события определяют текущее состояние субъектов социума. Текущее состояние описывается набором факторов, которые естественно назвать внутренними или эндогенными факторами. В свою очередь, на процессы наступления массовых событий оказывают влияние факторы макросреды, т. е. внешние или экзогенные факторы. Факторы могут быть количественными, обладающими некоторыми числовыми значениями, или качественными, характеризующимися одним из нескольких возможных признаков. При моделировании процессов наступления массовых событий количественные факторы описываются количественными переменными, а качественные – категоризованными переменными.

Так же как и факторы, переменные могут разделяться на эндогенные и экзогенные. Значения эндогенных переменных формируются внутри моделируемой социально-экономической системы. Значения экзогенных переменных определяются внешними условиями. Таким образом, отнесение факторов или переменных к эндогенным (внутренним) или экзогенным (внешним) является условным и зависит от того, как, в соответствии с целями исследования, определяются границы моделируемой системы.

Некоторые экзогенные переменные соответствуют нерегулируемым факторам. Значения таких переменных определяются внешними условиями. Такие переменные выступают в качестве параметров для моделей, описывающих процедуры наступления массовых событий. Значения переменных, соответствующих регулируемым факторам, можно варьировать.

Значения эндогенных переменных с течением времени изменяются. Изменения определяются причинно-следственными связями между факторами. Даже в ситуациях, при которых внешние факторы с течением времени остаются неизменными, причинно-следственные связи между внутрен-

ними факторами могут обуславливать изменение эндогенных переменных и, в некоторых случаях, вызывать их неконтролируемое изменение. Целенаправленное воздействие на рассматриваемую социально-экономическую систему есть такое изменение значений регулируемых внешних факторов, которое обеспечивает благоприятную динамику состояния субъектов социума.

Таким образом, цель моделирования причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий в социуме в рамках некоторой социально-экономической системы состоит в описании зависимостей между факторами, позволяющими вырабатывать целенаправленное воздействие на систему.

Сетевые модели причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий

Концептуальная модель причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий должна описывать качественные зависимости между эндогенными переменными, определяющие направления их изменения. Для построения такой модели целесообразно использовать аппарат графов и сетей.

На этапе построения концептуальной модели используются априорные сведения о зависимостях между переменными, основанные на «здоровом смысле», известных социально-экономических соотношениях и инвариантах.

Например, рассматривается инвариант в форме соотношения, связывающего среднее количество субъектов социума, находящихся в заданном состоянии, среднюю интенсивность появления этого состояния и среднее время пребывания в данном состоянии, и инвариант в форме баланса потоков событий, связывающего изменение количества субъектов социума, находящихся в заданном состоянии, количество субъектов, перешедших в данное состояние, и количество субъектов, сменивших данное состояние на другое.

Для построения концептуальной сетевой модели целесообразно использовать аппарат знаковых графов [2, 3]. Использование статистических данных о массовых событиях позволит осуществить коррекцию концептуальной модели и описать количественные и логико-временные зависимости между переменными.

Введем в рассмотрение граф $G = (X, A, Q)$, где X – множество вершин графа, A – множество

дуг графа, Q – разметка на множестве дуг. Каждая дуга графа представляет собой пару вершин: $a \in A, a = (x, y), x, y \in X$. Разметка Q приписывает каждой дуге $a \in A$ знак «+» или «-»: $q(a) = \text{«+»}$ или $q(a) = \text{«-»}$.

Далее, каждой вершине графа соответствует эндогенная переменная. Для переменных и вершин будем использовать одинаковые обозначения.

Если увеличение (уменьшение) переменной $x \in X$ влечет увеличение (уменьшение) $y \in X$ и $a = (x, y)$, то $q(a) = \text{«+»}$.

Если увеличение (уменьшение) переменной $x \in X$ влечет уменьшение (увеличение) $y \in X$ и $a = (x, y)$, то $q(a) = \text{«-»}$.

Если изменение $x \in X$ не влечет изменение $y \in X$ и $a = (x, y)$, то $a \in A$.

Исследование построенной сетевой концептуальной модели позволяет выявить ситуации, при которых первоначальное незначительное увеличение (уменьшение) значения одной эндогенной переменной, вызванное изменением экзогенной переменной, приводит к неконтролируемому увеличению (уменьшению) значений эндогенных переменных, расположенных вдоль «положительного» цикла графа.

Цикл (замкнутый путь) графа G считается положительным, если положительно произведение знаков составляющих его дуг. Например, все циклы графа, приведенного на рис. 1, являются положительными. Все циклы графа на рис. 2 являются отрицательными.

Для модели, соответствующей последнему рисунку, гарантируется уменьшение (увеличение) значения переменной, которая первоначально была увеличена (уменьшена). В этой ситуации возможны колебательные процессы (на практике обычно затухающие) изменения значений переменных.

Как будет видно из дальнейшего изложения, предложенные сетевые концептуальные модели

причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий интегрируются с динамическими и регрессионными моделями, разрабатываемыми на основе статистических данных о массовых событиях.

Приведенные понятия, характеризующие процессы наступления массовых событий в социуме, предложенные сетевые модели, представляющие причинно-следственные связи между процессами, позволяют сформулировать следующие основные принципы концептуального моделирования.

1. Принцип ограниченности рассматриваемой социально-экономической системы. Необходимо ограничиться рассмотрением массовых событий, источником которых являются субъекты заданной социально-экономической системы.

2. Принцип разделения факторов. Необходимо различать внешние регулируемые, внешние нерегулируемые и внутренние факторы наступления массовых событий.

3. Принцип априорного определения направления причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий. Необходимо определить знаки взаимного влияния эндогенных переменных.

Построение комплекса моделей для оценивания на основе фрагментарных данных реакции социума на целенаправленные воздействия

Считаем, что источником массовых событий являются субъекты, наблюдаемые в дискретные моменты времени. В соответствии с введенными ранее терминами для каждого объекта фиксируются значения эндогенных и экзогенных переменных. В результате наблюдения над объектами формируется трехмерная таблица статистических данных (элементы таблицы имеют три индекса):

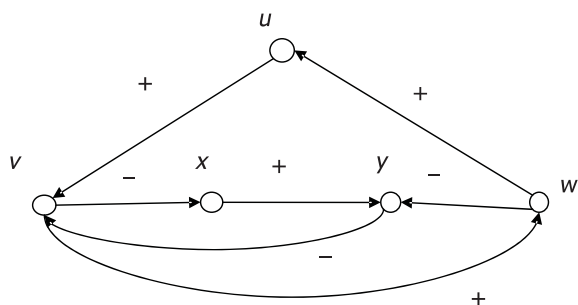


Рис. 1. Граф, в котором все циклы положительны

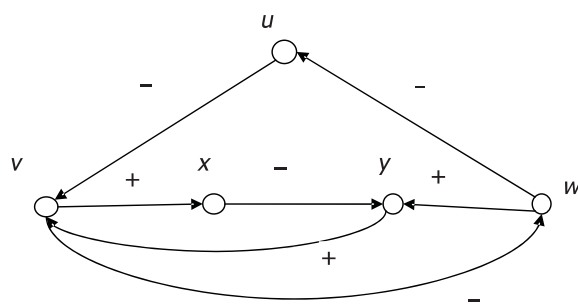


Рис. 2. Граф, в котором все циклы отрицательны

$$v_i^{pt}, w_j^{pt}; i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M; p = 1, \dots, P; \\ t = 1, \dots, T,$$

где v обозначает эндогенные переменные; w – экзогенные переменные; i, j – номера переменных; p – номер объекта; t – номер момента времени.

Таким образом, имеются так называемые, «панельные» данные, т. е. значения переменных фиксируются для различных объектов в различные моменты времени.

Данные могут быть фрагментарными (трехмерная таблица может содержать пропуски).

Сами переменные, а не их значения, будем обозначать: $v_i(t), w_j(t); i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M$, в зависимости от рассматриваемого момента времени t .

Регрессионные модели описывают статистически значимые зависимости между переменными. Построению регрессионных моделей предшествует определение тождеств и априорных моделей [1].

Тождества определяют однозначные функциональные зависимости между переменными; формируются на основе балансов потоков событий, инвариантов систем массового обслуживания и т. п.; позволяют однозначно выразить значения некоторых эндогенных переменных через значения других переменных. Будем считать, что такие переменные уже исключены из рассмотрения, и оставшиеся переменные не связаны функциональными зависимостями.

Используем понятие предопределенной переменной. Значения предопределенных переменных могут влиять на формирование значений эндогенных переменных в заданный момент времени. Предопределенная переменная представляет собой либо экзогенную переменную $w_j(\tau)$; $j = 1, \dots, M$, в этом случае $\tau \leq t$, либо эндогенную переменную $v_i(\tau)$, $i = 1, \dots, N$, в этом случае $\tau < t$.

Совокупность априорных моделей представляет собой систему линейных одновременных уравнений. Одновременные уравнения составляются в соответствии с теоретическими представлениями о зависимостях между переменными. Коэффициенты при переменных обычно не имеют точного числового выражения. Для них известен либо знак, либо диапазон. В общем виде уравнения записываются так:

$$c_{11}v_1(t) + c_{12}v_2(t) + \dots + c_{1n}v_n(t) + \\ + a_{10} + a_{11}z_1 + a_{12}z_2 + \dots + a_{1k}z_k = \delta_1,$$

$$c_{21}v_1(t) + c_{22}v_2(t) + \dots + c_{2n}v_n(t) + \\ + a_{20} + a_{21}z_1 + a_{22}z_2 + \dots + a_{2k}z_k = \delta_2$$

$$c_{n1}v_1(t) + c_{n2}v_2(t) + \dots + c_{nn}v_n(t) + \\ + a_{n0} + a_{n1}z_1 + a_{n2}z_2 + \dots + a_{nk}z_k = \delta_n.$$

Здесь $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ – переменные-невязки; $z_1, z_2, \dots, z_k$ – предопределенные переменные. Предполагается, что число уравнений совпадает с числом эндогенных переменных. Как правило, про многие коэффициенты при переменных можно однозначно сказать, что они равны нулю.

Именно априорное представление о том, какие коэффициенты равны нулю, облегчает составление регрессионных моделей и идентификацию их коэффициентов. В предположении, что коэффициенты при эндогенных переменных образуют неособенную матрицу, выражаем значения эндогенных переменных через значения предопределенных переменных:

$$v_1(t) = b_{10} + b_{11}z_1 + b_{12}z_2 + \dots + b_{1k}z_k + \delta_1,$$

$$v_2(t) = b_{20} + b_{21}z_1 + b_{22}z_2 + \dots + b_{2k}z_k + \delta_2$$

$$v_n(t) = b_{n0} + b_{n1}z_1 + b_{n2}z_2 + \dots + b_{nk}z_k + \delta_n.$$

По-прежнему про многие коэффициенты известно, что они равны нулю (матрица разрежена).

Записанные таким образом уравнения подлежат идентификации на основе стандартных процедур регрессионного анализа.

Если для какой-нибудь эндогенной переменной не удастся установить статистически значимую регрессионную модель, то такая переменная исключается из рассмотрения. При этом из правых частей уравнения исключаются соответствующие предопределенные переменные. В случае высоких корреляций между предопределенными переменными в правой части одного из уравнений количество переменных с ненулевыми коэффициентами может быть сокращено.

Регрессионные модели естественным образом интегрируются с определенными ранее сетевыми концептуальными моделями причинно-следственных связей между процессами наступления массовых событий.

Рассмотрим уравнение, в правой части которого присутствует с ненулевым коэффициентом эндогенная предопределенная переменная. Допустим, это уравнение с номером i :

$v_i(t) = e_{ij} + d_{ij}v_j(\tau)$, где e_{ij} – сумма всех остальных слагаемых уравнения.

В других обозначениях запишем:

$$v_i(\tau + t_{ij}) = e_{ij} + d_{ij}v_j(\tau).$$

Предположим, что e_{ij} не зависит от $v_j(\tau)$. Такое предположение оправдано, поскольку сильные корреляции между переменными правых частей и между переменными и остатками исключены.

Таким образом, изменение v_j в момент времени τ влечет пропорциональное изменение v_i спустя t_{ij} единиц времени:

$$\Delta v_i(\tau + t_{ij}) = d_{ij} \Delta v_j(\tau).$$

Если считать, что коэффициенты регрессий не претерпевают существенных изменений в течение небольших промежутков времени, то d_{ij} не зависит от τ .

Теперь введенную ранее концептуальную сетевую модель можно дополнить следующими данными. Каждой вершине, соответствующей эндогенной переменной, сопоставляются коэффициенты при экзогенных переменных и свободный член из уравнения регрессии. В этом списке отсутствуют коэффициенты при эндогенных предопределенных переменных. Вместо коэффициента вводится дуга, соединяющая переменные v_j и v_i . Эта дуга помечена двумя числами: d_{ij} и t_{ij} . При этом d_{ij} – коэффициент передачи изменений, а t_{ij} – временная задержка. Таким образом, построенная модель описывает динамику состояния социума. Рассмотрим пример сети в виде цикла, изображенного на рис. 3.

Легко заметить, что первоначальное изменение Δv_1 переменной v_1 , вызванное влиянием экзогенных факторов, трансформируется в изменение этой переменной, равное $d_{12}d_{21}d_{31}\Delta v_1 + \Delta v_1$ через $t_{12} + t_{21} + t_{31}$ единиц времени. Для положительного цикла первоначальное изменение будет увеличено, а для отрицательного – уменьшено.

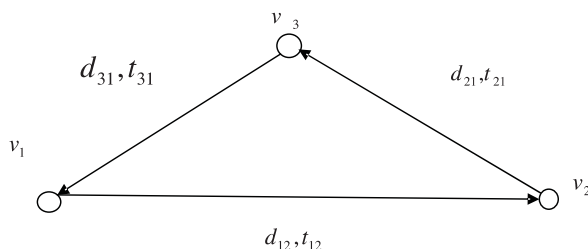


Рис. 3. Фрагмент сети, определяющей зависимости между эндогенными переменными

Предложенный подход к анализу циклических изменений значений эндогенных переменных эффективен в случае, если продолжительность циклов существенно превышает шаг наблюдений. Если это условие не выполнено, то отрицательные циклы могут никак себя не проявить, а для положительных циклов будет замечен синхронный рост образующих цикл переменных. В последнем случае между переменными будет наблюдаться корреляционная зависимость (цикл может быть заменен одной переменной с меткой). В случае необходимости исследования «быстрых» циклов шаг наблюдения должен быть уменьшен.

Разработка обобщенного алгоритма определения наиболее информативных показателей, описывающих управляющие воздействия и реакцию социума

Выше описаны процедуры формирования моделей для оценивания реакции социума на внешнее воздействие. Совокупность эндогенных и экзогенных переменных в составе предложенных моделей по своему назначению и условиям отбора может быть использована в качестве системы информативных показателей. Сформулируем основные шаги отбора переменных, определяющие алгоритм формирования информативных показателей.

Отбираем переменные, входящие в состав одновременных уравнений, затем – переменные, для которых идентифицированы регрессионные зависимости.

Сокращаем список переменных, устраняя сильные корреляционные зависимости между предопределенными переменными. Используем стандартные процедуры анализа главных компонент и факторного анализа (вводим новые переменные, ортогональные друг другу).

Разработан единый модельный комплекс для оценивания на основе фрагментарных данных реакции социума на целенаправленные воздействия. Разработанный модельный комплекс является теоретической основой решения частных задач, направленных на повышение точности и надежности оценок состояния социума в результате внешних воздействий. Аппарат знаковых графов может быть использован для описания структуры зависимостей между эндогенными переменными, определяющими состояние социума. Анализ зависимостей между эндогенными пере-



менными позволяет прогнозировать циклические и неконтролируемые изменения состояния социума. Зависимости между эндогенными переменными и зависимости эндогенных переменных от экзогенных переменных могут быть определены

на основе регрессионного и факторного анализа фрагментарных данных о массовых событиях в социуме.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт № 02.740.11.0437) и проекта РФФИ № 11-06-00454-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян, С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики: Учебник для вузов [Текст] / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – В 2 т. 2-е изд., испр. – Т.2. – 432 с.
2. Плотинский, Ю.М. Модели социальных про-

цессов [Текст] / Ю.М. Плотинский. – М.: Логос, 2001. – 296 с.

3. Huff, A.S. Mapping strategic thought [Текст] / A.S. Huff; ed. by A. S. Huff. // Mapping strategic thought. – Chichester: Wiley, 1990. – P. 11–49.

УДК 519.688

Т.С. Калинин, Н.П. Красий, А.В. Чернов

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА КОНЕЧНЫХ ПОЛЕЙ

Математический аппарат булевых производных широко применяется в технической диагностике цифровых устройств [1, 2]. Моделями цифровых устройств в данном исследовании являются дискретные динамические системы с заданным множеством существенных неисправностей D . Например, неисправности могут относиться к классам логических констант, изменения логических состояний, временных задержек и др. Задача анализа некоторого множества тестов T – определение множеств неисправностей $D(T_i) \in D$, обнаруживаемых тестами $T_i \in T$. В результате анализа устанавливается оценка полноты системы тестов T , а также образуется таблица неисправностей $Q = \|q_{i,j}\|$, $i = \overline{1, |T|}$, $j = \overline{1, |D|}$, $q_{i,j} = 0$, если $D_j \notin D(T_i)$, $q_{i,j} = 1$, если $D_j \subset D(T_i)$.

Для анализа задана логическая схема дискретной системы, в которой измеряется логическое значение z_i логической переменной, сопоставленной с точкой i логической схемы. При возникновении неисправностей из класса логических констант в точке i логической схемы значение переменной станет либо $z_i = 0$, либо $z_i = 1$. Таким образом, в данном случае техническая диагностика может выполняться с помощью анализа чувствительности S_{ij} на выходе j по отношению к изменению

сигнала в точке i логической схемы. Формальное определение чувствительности S_{ij} производится при помощи булевых производных $S_{ij} = \partial z_j / \partial z_i$, и строится таблица $S = \|S_{ij}\|$, $i = \overline{1, |T|}$, $j = \overline{1, |D|/2}$. Заметим, что переход от таблицы S к искомой таблице Q не представляет трудностей.

Цель данной статьи – описание метода и математической модели чувствительности дискретной системы для обнаружения константных неисправностей как не связанных, так и связанных с изменением временных задержек в цифровых устройствах. Предлагаемый подход отличается от известных двумя фактами. Во-первых, логические функции дискретной системы описываются над конечными полями, и, во-вторых, идея анализа чувствительности дискретной системы перенесена на случай расширений конечных полей, что позволяет использовать при анализе не только булевы, но и многозначные логические функции. В первой части статьи предложен метод формирования матрицы коэффициентов чувствительности $S = \|S_{ij}\|$ с помощью быстрых спектральных Фурье-преобразований. Во второй части предложена новая дифференциально-логическая модель динамической дискретной системы. Описан аналитический метод решения

системы дифференциально-логических уравнений с применением логических производных над конечными полями. Данный метод может служить отправной точкой анализа неисправностей, относящихся к классу временных задержек.

Использование математического аппарата конечных полей является альтернативным подходом к изучению логических функций. Первоначальные результаты описания логических функций с помощью полей Галуа были получены в [3], в работе [4] уделяется внимание связи между коэффициентом дискретного преобразования Фурье и полиномом, описывающим логическую функцию над конечным полем. Наиболее полной работой в данной области является [5], в которой сформулированы элементы, названные «теорией переключательных функций Галуа». Идея расширения полей для исследования дискретных динамических систем со свойством контролируемости в дальнейшем рассматривалась в [6, 7].

Тем не менее, представленные в этой статье методы исследования функций, описываемых над конечными полями F_2 характеристики 2, отличаются от названных выше и других работ в рассматриваемой области. Существенным отличием является предлагаемое в данной работе описание логических функций как отображений вида $f: F_{p^2} \rightarrow F_{p^n}$ для дискретных устройств с k входами и n выходами, т. е. над конечными полями расширений F_{p^n} (p – простое, n – натуральное) полей характеристики 2. В перечисленных выше работах рассматривались случаи, где входные, выходные значения и логические функции принадлежат конечным полям одной и той же размерности, что упрощает применение спектральных методов расчета коэффициентов чувствительности. В предлагаемом подходе размерности полей не играют существенной роли, однако от этого сложность вычислений спектральных коэффициентов чувствительности не увеличивается.

Логические функции, определяемые над расширениями конечных полей

Рассмотрим предлагаемый метод описания логических функций над конечными полями. Традиционно, дискретное устройство, имеющее k входов и n выходов, описывается n логическими функциями из k переменных, принадлежащих полю F_2 . Подход, использующий аппарат конечных полей, позволяет, в отличие от булевой алгебры, вместо набора n функций k

Таблица 1
Таблица истинности

x_2	x_1	x_0	y_1	y_0
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	1	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1

переменных описывать дискретную систему полиномом над полем, являющимся полем расширения поля F_2 . Функции, описываемые такими полиномами, представляют собой отображение вида $f: F_{2^k} \rightarrow F_{2^n}$, а в более общем случае – отображение вида $f: F_{p^k} \rightarrow F_{p^n}$.

Понятие о логической функции, определяемой над конечным полем, вводится следующим образом.

Пусть некоторая дискретная система описывается $n=2$ (количество выходов) булевыми функциями $k=3$ (количество входов) переменных, а также задается ее таблица истинности (табл. 1). Получаем отображение вида $f: (x_0, x_1, x_2) \rightarrow (y_0, y_1)$.

В терминах аппарата конечных полей приведем пример отображения $f: F_{2^3} \rightarrow F_{2^2}$. Пусть α – элемент поля F_{2^3} , β – элемент поля F_{2^2} , а неприводимые полиномы над этими конечными полями $x^3 + x^2 + 1$ и $x^2 + x + 1$ соответственно. Отображение зададим таблицей 2 (таблицей истинности).

Ненулевые элементы конечного поля F_{2^k} составляют мультипликативную циклическую группу порядка $2^k - 1$, между тем, обратный элемент для нейтрального по сложению элемента 0 поля F_{2^k} относительно операции умножения является неопределенным. Таким образом, относительно операции умножения элементы конечного поля F_{2^k} составляют циклический моноид, который будем обозначать M_{2^k} . Введем обозначение для нейтрального элемента поля F_{2^k} следующим образом. Пусть $\alpha^{-0} = 0$, тогда и элементами F_{2^k} и M_{2^k} будут $\alpha^{-0}, \alpha^0, \alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^m$, где $m = 2^k - 2$. Теперь, если рассматривать дискретную систему, которая описывается функциями k входных переменных, то она будет определяться на конечном счетном множестве, имеющем структу-

Таблица 2

Полиномиальная форма

Полиномиальная форма x	x_2	x_1	x_0	y_1	y_0	Полиномиальная форма y
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1	1
α	0	1	0	1	1	β^2
α^2	1	0	0	1	0	β
α^3	1	0	1	0	1	1
α^4	1	1	1	0	1	1
α^5	0	1	1	1	0	β
α^6	1	1	0	1	0	β

ру мультипликативного циклического моноида M_{2^k} , т. е.

$$f = (f_{\alpha^{-0}}, f_{\alpha^0}, f_{\alpha^1}, \dots, f_{\alpha^m}), \quad m = 2^k - 2,$$

и вместе с этим её элементы будут выбираться из конечного поля, например, из F_{2^n} . Таким образом, все множество логических функций, определяемых над M_{2^k} и принимающих значения из F_{2^n} , является векторным пространством размерности 2^k над полем F_{2^k} . Обозначим это векторное пространство E^{2^k} . Обозначим также

$$\mathbf{f} = (f_{\alpha^{-0}}, f_{\alpha^0}, f_{\alpha^1}, \dots, f_{\alpha^m}); \quad \mathbf{s} = (s_{\alpha^{-0}}, s_{\alpha^0}, s_{\alpha^1}, \dots, s_{\alpha^m});$$

$$m = 2^k - 2$$

элементы векторного пространства E^{2^k} и определим на нем две операции:

сложения

$$\mathbf{f} + \mathbf{s} = (f_{\alpha^{-0}} + s_{\alpha^{-0}}, f_{\alpha^0} + s_{\alpha^0}, f_{\alpha^1} + s_{\alpha^1}, \dots, f_{\alpha^m} + s_{\alpha^m}); \quad (1)$$

свертки

$$\mathbf{f} * \mathbf{s} = \mathbf{g} = (g_{\alpha^{-0}}, g_{\alpha^0}, g_{\alpha^1}, \dots, g_{\alpha^m}), \quad (2)$$

где $g_{\alpha^{-0}} = f_{\alpha^{-0}} s_{\alpha^{-0}}$,

$$g_{\alpha^i} = \sum_{j=1}^m f_{\alpha^i} s_{\alpha^{i \ominus j}}, \quad (3)$$

$$i = 0, 1, \dots, m, \quad m = 2^k - 2, \quad i \ominus j = (-i + j) \bmod j.$$

Выражения (1)–(3) позволяют рассматривать логические функции над конечными полями, изучая алгебраическую структуру, построенную на основе моноида M_{2^k} . Выражение (3) легко представляется в матричном виде, где матрица свертки $\mathbf{S}$ является блочно-диагональной:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_{\alpha^{-0}} & 0 & 0 & \bullet & \bullet & 0 \\ 0 & s_{\alpha^0} & s_{\alpha^m} & \bullet & \bullet & s_{\alpha^1} \\ 0 & s_{\alpha^1} & s_{\alpha^0} & \bullet & \bullet & s_{\alpha^2} \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ 0 & s_{\alpha^m} & s_{\alpha^{m-1}} & \bullet & \bullet & s_{\alpha^0} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Если исключить из матрицы (4) первую строку и первый столбец, то можно выделить из $\mathbf{S}$ подматрицу $\mathbf{S}_c$, которая является циркулянтной матрицей порядка $2^k - 1$, а $(s_{\alpha^{-0}}, s_{\alpha^0}, s_{\alpha^1}, \dots, s_{\alpha^m})$, $m = 2^k - 2$ является ее генератором. Более компактная запись (4):

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_{\alpha^{-0}} & \vdots & \vdots \\ \vdots & \mathbf{S}_c & \vdots \\ \vdots & \vdots & s_{\alpha^0} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Множество $2^k - 1$ перестановок f задается соотношениями:

$$(P_{\alpha^j})_{\alpha^{-0}} = f_{\alpha^{-0}}, \quad (6)$$

$$(P_{\alpha^j})_{\alpha^i} = f_{\alpha^{i \ominus j}}, \quad (7)$$

где $i, j = 0, 1, 2, \dots, 2^k - 2$, $i \ominus j = (-i + j) \bmod j$.

Например, в случае описания логических функций над M_{2^2} в соответствии с (6), (7) имеем перестановки:

$$P_{\alpha^0} = (f_{\alpha^{-0}}, f_{\alpha^0}, f_{\alpha^1}, f_{\alpha^2});$$

$$P_{\alpha^1} = (f_{\alpha^{-0}}, f_{\alpha^2}, f_{\alpha^0}, f_{\alpha^1});$$

$$P_{\alpha^2} = (f_{\alpha^{-0}}, f_{\alpha^1}, f_{\alpha^2}, f_{\alpha^0}).$$

Теперь обратим внимание на тот факт, что любая циркулянтная матрица может быть приведена к диагональному виду с помощью матрицы дискретного преобразования Фурье. Зададим матрицу $\mathbf{H}$ вида

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & \mathbf{H}_d \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\mathbf{H}_d$ – матрица дискретного преобразования Фурье порядка $2^k - 1$. Диагонализация выполняется следующим образом:

$$\mathbf{H}\mathbf{S}\mathbf{H}^{-1} = \mathbf{\Lambda}, \quad (9)$$

где $\mathbf{\Lambda}$ – диагональная матрица, причем первый диагональный элемент равен $s_{\alpha^{-0}}$, а остальные диагональные элементы являются коэффициентами дискретного преобразования Фурье циркулянтной матрицы $\mathbf{S}_c$. Линейное преобразование $\mathbf{F} \leftrightarrow \mathbf{f}$ будет задаваться в виде

$$\mathbf{F} = \mathbf{H}\mathbf{f}, \quad \mathbf{f} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{F}, \quad (10)$$

где $\mathbf{F} = (\mathbf{F}_{\alpha^{-0}}, \mathbf{F}_{\alpha^0}, \mathbf{F}_{\alpha^1}, \dots, \mathbf{F}_{\alpha^m})$, $m = 2^k - 2$.

Рассмотрим свертку двух логических функций $\mathbf{f}$ и $\mathbf{s}$, определенных над конечным полем, и как прежде $\mathbf{g} = \mathbf{f} * \mathbf{s}$, а в матричной записи

$$\mathbf{g} = \mathbf{S}\mathbf{f}, \quad (11)$$

где матрица $\mathbf{S}$ задается в виде (5). Умножая обе части (11) на $\mathbf{H}$, получаем:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}\mathbf{g} &= \mathbf{H}\mathbf{S}\mathbf{f}, \\ \mathbf{G} &= \mathbf{H}\mathbf{S}\mathbf{H}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{f}, \\ \mathbf{G} &= \mathbf{\Lambda}\mathbf{F}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{F} \leftrightarrow \mathbf{f}$, $\mathbf{g} \leftrightarrow \mathbf{G}$ и $\mathbf{s} \leftrightarrow \mathbf{\Lambda} = \mathbf{H}\mathbf{S}\mathbf{H}^{-1}$.

Матрица $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\Lambda_{\alpha^{-0}}, \Lambda_{\alpha^0}, \Lambda_{\alpha^1}, \dots, \Lambda_{\alpha^m})$, $m = 2^k - 2$, таким образом, $G_{\alpha^i} = \Lambda_{\alpha^i} F_{\alpha^i}$, где $i = -0, 0, 1, \dots, 2^k - 2$.

Приведенные выше рассуждения позволяют рассматривать логические функции над полями в спектральном виде, где $\mathbf{F}$ и $\mathbf{\Lambda}$ – матрицы, содержащие коэффициенты спектральных преобразований, т. е. в виде коммутативной алгебры, изоморфной алгебре (1)–(3).

Операции, определенные в спектральном домене:

сложение $\mathbf{F} + \mathbf{\Lambda}$

$$F_{\alpha^i} + \Lambda_{\alpha^i}, \quad i = -0, 0, 1, \dots, 2^k - 2, \quad (12)$$

умножение $\mathbf{F}\mathbf{\Lambda}$

$$F_{\alpha^i} \Lambda_{\alpha^i}, \quad i = -0, 0, 1, \dots, 2^k - 2, \quad (13)$$

очевидно, составляют коммутативную алгебру размерности 2^k и позволяют перейти к полиномиальному представлению логических функций над конечными полями.

Рассмотрим полиномиальное представление логических функций над конечным по-

лем. Пусть $f(\mathbf{x})$ – логическая функция, где $\mathbf{x} = (\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^j, \dots, \alpha^{2^k})$, $j = 1, \dots, 2^k$.

Собственные значения матрицы $\mathbf{S}$ при ее диагонализации (9) могут быть представлены в полиномиальном виде

$$\begin{aligned} h_{\alpha^{-0}}(x) &= (x^{2^k-1}) + 1, \quad h_{\alpha^i}(x) = x^{2^k-1-i}, \\ i &= 0, 1, \dots, 2^k-2, \quad m = 2^k-2; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\mathbf{H}^{-1} = (h_{\alpha^{-0}}, h_{\alpha^0}, h_{\alpha^1}, \dots, h_{\alpha^m}).$$

Полиномиальное представление собственных значений позволяет представить логическую функцию над конечным полем также в виде полинома, используя соотношение $\mathbf{f} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{F}$. Тогда

$$f(\mathbf{x}) = F_{\alpha^{-0}}((x^{2^k-1}) + 1) + \sum_{i=0}^{2^k-2} F_{\alpha^i} x^{2^k-1-i}.$$

Учитывая, что $f_{\alpha^{-0}} = f(0) = F_{\alpha^{-0}}$,

$$\begin{aligned} f(x) &= F_{\alpha^{-0}} + (F_{\alpha^{-0}} + F_{\alpha^0})x^{2^k-1} + \sum_{i=1}^{2^k-2} F_{\alpha^i} x^{2^k-1-i} = \\ &= a_{\alpha^{-0}} + a_{\alpha^0} x^{2^k-1} + \dots + \sum_{i=1}^{2^k-2} a_{\alpha^i} x^{2^k-1-i}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $a_{\alpha^{-0}} = F_{\alpha^{-0}}$, $a_{\alpha^0} = (F_{\alpha^{-0}} + F_{\alpha^0})$, $a_{\alpha^i} = F_{\alpha^i}$, $i = 1, 2, \dots, 2^k - 2$.

Выражение (15) является полиномиальной формой представления логической функции над конечным полем.

Вектор коэффициентов $\mathbf{a} = (a_{\alpha^{-0}}, a_{\alpha^0}, a_{\alpha^1}, \dots, a_{\alpha^m})$ и векторы логических функций $\mathbf{f} = (f_{\alpha^{-0}}, f_{\alpha^0}, f_{\alpha^1}, \dots, f_{\alpha^m})$, $m = 2^k - 2$ связаны через несингулярную матрицу порядка $2^k \times 2^k$ (рис. 1), из которой можно получить вектор коэффициентов (рис. 2), либо в матричной записи

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}\mathbf{f}, \quad (16)$$

и, соответственно,

$$\mathbf{f} = \mathbf{a}\mathbf{A}^{-1}. \quad (17)$$

Соотношение (16) содержит блочно-диагональную матрицу $\mathbf{A}$, элементы которой могут быть рассчитаны с помощью дискретного Фурье-преобразования.

Общая модель дифференциально-логической дискретной системы

В этой главе рассматривается метод представления динамической системы как дифференциальной системы над конечным полем. Дана система из n вещественнозначных векторных переменных $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^n$.

Каждой из вещественнозначных переменных v_i

$$\begin{pmatrix} f(0) \\ f(1) \\ f(\alpha) \\ f(\alpha^2) \\ \vdots \\ f(\alpha^m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \bullet & \bullet & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \bullet & \bullet & 1 & 1 \\ 1 & 1 & (\alpha^m) & \bullet & \bullet & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & (\alpha^m)^2 & \bullet & \bullet & \alpha^4 & \alpha^2 \\ 1 & 1 & (\alpha^m)^3 & \bullet & \bullet & \alpha^6 & \alpha^3 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ 1 & 1 & (\alpha^m)^m & \bullet & \bullet & (\alpha^m)^2 & \alpha^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{\alpha^{-\infty}} \\ a_{\alpha^0} \\ a_{\alpha} \\ a_{\alpha^2} \\ \bullet \\ \bullet \\ a_{\alpha^m} \end{pmatrix}$$

Рис. 1. Несингулярная матрица порядка 2^k

$$\begin{pmatrix} a_{\alpha^{-\infty}} \\ a_{\alpha^0} \\ a_{\alpha} \\ a_{\alpha^2} \\ \bullet \\ \bullet \\ a_{\alpha^m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \bullet & \bullet & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \bullet & \bullet & 1 \\ 0 & 1 & \alpha & \alpha^2 & \bullet & \bullet & (\alpha^m) \\ 0 & 1 & \alpha^2 & \alpha^4 & \bullet & \bullet & (\alpha^2)^m \\ 0 & 1 & \alpha^3 & \alpha^6 & \bullet & \bullet & (\alpha^3)^m \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ 0 & 1 & \alpha^m & (\alpha^m)^2 & \bullet & \bullet & (\alpha^m)^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f(0) \\ f(1) \\ f(\alpha) \\ f(\alpha^2) \\ \bullet \\ \bullet \\ f(\alpha^m) \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Вектор коэффициентов

соответствует булева переменная, задаваемая условием

$$x_i \begin{cases} 0, v_i \leq q_i, \\ 1, v_i > q_i, \end{cases}$$

$i = 1, \dots, n$; $q_i \in \mathbb{R}$ – граничная переменная.

Тогда система может описываться изменениями вектора $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in F_2$ с помощью временных разностных уравнений:

$$\begin{cases} x_1 = f_1(x_1(t - \tau_{11}), x_2(t - \tau_{12}), \dots, x_n(t - \tau_{1n})); \\ x_2 = f_2(x_1(t - \tau_{21}), x_2(t - \tau_{22}), \dots, x_n(t - \tau_{2n})); \\ \vdots \\ x_n = f_n(x_1(t - \tau_{n1}), x_2(t - \tau_{n2}), \dots, x_n(t - \tau_{nn})), \end{cases}$$

где τ_{ij} – временная задержка.

Далее описывается метод нахождения решения для такой разностной системы. В работе [8] доказывается теорема

Теорема 1

Логическое дифференциальное уравнение $\frac{\partial f}{\partial x_i} = g$ для $i = 1, \dots, m$ имеет решение $f = gx_i + h$ тогда и только тогда, когда g, h не зависят от x_i ,

и f, g, h – некоторые логические функции.

Рассмотрим дальнейшее развитие этого подхода. Обозначим $\hat{x}_i^* = (x_i, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$, т. е. набор переменных размерности $(n-1)$, в котором нет переменной x_i , и $\hat{x}_{\alpha_i}^* = x_i, \dots, x_{i-1}, \alpha_i, x_{i+1}, \dots, x_n$, т. е. набор переменных размерности n , в котором переменная x_i заменяется на переменную α_i .

Определение 1

Частной производной логической функции $f(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n)$ над конечным полем F_{p^n} по переменной x_i будем называть

$$\frac{\partial f_{\alpha_i}}{\partial x_i}(x^*) = f(x_1, \dots, x_{i-1}, \alpha_i, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x^*),$$

где $1 \leq i \leq n$, $x^* = (x_1, \dots, x_n)$, $\alpha_i \in F_p$.

Утверждение 1

Логическое дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial f_{\alpha_i \dots \alpha_n}}{\partial x_i \dots \partial x_n} = g(x^*), i = 1, \dots, n, x^* = (x_1, \dots, x_n) \quad (18)$$

имеет решение тогда и только тогда, когда

$$g(\hat{x}_{\alpha_i}^*) = 0. \quad (19)$$

Решением является

$$f(x^*) = \sum_{i=1}^n c_i(x_i) + (-1)^n g(x^*), \quad (20)$$

где

$$c_i(x_i) = (-1)^{i-1} \frac{\partial^{n-1} \phi_{\alpha_i \dots \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_n}}{\partial x_i \dots \partial x_{i-1} \partial x_{i+1} \dots \partial x_n}, \quad (21)$$

$$i = 1, \dots, n,$$

ϕ – логическая функция размерности $(n-1)$,

$$f: F_{p^n} \rightarrow F_{p^m}, \quad g: F_{p^n} \rightarrow F_{p^m}.$$

Доказательство

Вычислим первую частную производную над конечным полем:

$$\frac{\partial f_{\alpha_1}}{\partial x_1} = - \sum_{i=2}^n c_i(\hat{x}_i^*) + (-1)^{n+1} g(x^*).$$

Так как $c_i(\hat{x}_{\alpha_1}^*) = 0$ для $i = 2, \dots, n$, данное соотношение является верным только при условии $g(\hat{x}_{\alpha_1}^*) = 0$, что соответствует (19).

Вычислим вторую частную производную над конечным полем

$$\frac{\partial^2 f_{\alpha_1 \alpha_2}}{\partial x_1 \partial x_2} = \sum_{i=3}^n c_i(\hat{x}_i^*) + (-1)^{n+2} g(x^*),$$

так как $c_i(\hat{x}_{\alpha_2}^*) = 0$ для $i = 3, \dots, n$, данное соотношение является верным только при условии $g(\hat{x}_{\alpha_2}^*) = 0$, что соответствует (19). Вычисляя производные до n -го порядка, получаем формулу (18).

Докажем теперь, что функция f имеет вид (20). По определению 1 соотношение (18) при подстановке $(n-1)$ имеет вид

$$\frac{\partial^{n-1} f_{\alpha_2 \dots \alpha_n}}{\partial x_2 \dots \partial x_n} = c_1(\hat{x}_1^*) - g(x^*),$$

причем, по условию (19) $g(\hat{x}_{\alpha_1}^*) = 0$, а $c_1(\hat{x}_1^*)$ должно иметь вид (21) для $i=1$ при произвольной логической функции $\phi(x_2, \dots, x_n)$. Далее, для производной порядка $(n-2)$ получаем

$$\frac{\partial^{n-2} f_{\alpha_3 \dots \alpha_n}}{\partial x_3 \dots \partial x_n} = c_2(\hat{x}_2^*) - c_1(\hat{x}_1^*) + (-1)^2 g(x^*),$$

причем, $c_1(\hat{x}_{\alpha_2}^*) = 0$ и $g(\hat{x}_{\alpha_2}^*) = 0$, таким образом, $c_2(\hat{x}_2^*)$ должно иметь вид (21). Вычисляя производные n раз, получаем формулу (20).

В статье предложены математические модели неисправностей в цифровых устройствах, основанные на анализе чувствительности к ошибочным изменениям логических состояний схем. Рассмотренные модели базируются на математическом аппарате конечных полей и дифференциальном логическом исчислении. Основной результат первой части работы – формула (16) для расчета коэффициентов чувствительности быстрыми спектральными методами преобразований Фурье, имеющими сложность не более $O = n \log n$. Основной результат второй части работы – утверждение 1 и формула (20), позволяющая решить логическое дифференциальное уравнение над конечным полем с помощью рекурсивного расчета частных логических производных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-08-00097-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янушкевич, С. Логическое дифференциальное исчисление: достижения, тенденции и приложения [Текст] / С. Янушкевич, Д. Бохманн, Р. Станкович [и др.] // Автоматика и телемеханика. –2000. –№ 6. –С. 155–170.
2. Чернов, А.В. Развитие аппарата логического дифференциального исчисления в применении к задачам проектирования и диагностики телекоммуникационных систем [Текст] / А.В. Чернов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2008. –№ 2. –С. 118–126.
3. Ninomia, I. Theory of Coordinate Representation of Swichin Functions [Текст] / I. Ninomia // Memoirs. Fac. Engg. –1958. –Vol. 10. –P. 175–190.
4. Menger, K.S. Jr. A Transform for Logic Networks [Текст] / K. S. Jr. Menger // IEEE Trans. Comput. –1969. –Vol. C –18. –P. 241–250.
5. Pradhan, D.K. A Theory of Galois Switching Function [Текст] / D.K. Pradhan // IEEE Trans. Comput. –1978. –Vol. C–27. –P. 239–248.
6. Белявский, Г.И. Математические модели линейных контролируемых дискретных динамических систем [Текст] / Г.И. Белявский, А.В. Чернов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2009. –№ 2. –С. 145–151.
7. Чернов, А.В. Методы линеаризации и модели контролируемых нелинейных дискретных динамических систем [Текст] / А.В. Чернов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2009. –№ 2. –С. 156–162.
8. Posthoff, C. Logic Functions and Equations. [Текст] / C. Posthoff, B. Steinbach. Binary Models for Computer Science. –Springer, 2003. –392 p.



ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРНО-СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Современные технические системы, такие, как энергоблоки АЭС, атомные корабли и суда, магистральные трубопроводные системы представляют собой многоагрегатные пространственно распределенные автоматизированные технические комплексы (АТК) агрегатов, механизмов и устройств, связанных между собой единством потоков энергии, вещества и информации (ресурсов). Процессы в таких системах характеризуются гигантскими причинно-следственными цепочками и «переплетающимися» обратными связями. При проектировании таких сверхсложных АТК и их управляющих систем возникает ряд принципиально новых и нерешенных проблем [1]. Первая группа проблем связана с объективной оценкой важнейших системных свойств АТК – структурной надежности, живучести и безопасности. Вторая группа проблем, относящаяся к теории процессов управления, связана с разработкой решений по реконфигурации структуры АТК при заранее непредсказуемых комбинациях отказов компонентов.

Решение отмеченных проблем требует существенного развития моделей и методов структурного анализа. Сложность процессов эволюции АТК в пространстве структурных состояний вынуждает принимать ряд упрощений при построении математических моделей. Так, в логико-вероятностных методах (ЛВМ) расчета надежности структурно-сложных систем [6, 7] общепринятыми являются гипотезы о бинарности состояний компонентов (элементов и связей), об одном типе отказов (обрыв или «вырывание» элемента из структуры), а также об отсутствии так называемых *зависимых отказов*. При этом предполагается возможным описать как условия выполнения АТК своего функционального назначения, так и условия безопасности его функционирования в форме логических функций от состояний работоспособности всех элементов системы.

Следуя работам [6, 7], при принятых допущениях такими логическими функциями являются функции работоспособности системы (ФРС). При

записи ФРС в виде минимальной ДНФ (МДНФ) каждый ее конъюнкт будет представлять т. н. *кратчайший путь успешного функционирования* (КПУФ). Каждый конъюнкт записанной в МДНФ инвертированной ФРС будет представлять т. н. *минимальное сечение отказов* (МСО). Заметим, что ФРС является функцией состояния всех элементов системы, поэтому пространство состояний аргументов функции имеет $N = 2^n$ значений, где n – число элементов в системе. В связи с этим разработка математических моделей и формальных аналитических методов получения ФРС в виде КПУФ и МСО для структурно-сложных систем, позволяющих уйти от прямого перебора, реально возможного только для малых систем, является чрезвычайно актуальной для теории и практики.

В работах [2, 3] предложены, а в [5] развиты аналитические подходы к получению ФРС для класса многоагрегатных АТК, характеризующихся рядом особенностей, главные из которых состоят в наличии в их структуре:

элементов типа «перемычка», обеспечивающих передачу ресурсов в том или ином направлении в зависимости от структурного состояния АТК и заложенных в управляющую систему алгоритмов;

замкнутых, как правило, «переплетающихся» контуров, состоящих из агрегатов и устройств, обеспечивающих необходимые условия протекания в АТК процессов выработки, передачи и преобразования ресурсов;

«закольцованных» схем передачи ресурсов, например, энергии между распределительными щитами.

Логико-математическая модель структурно-сложных технических систем

Так же как и в работах [2–7], для описания элементов введем в рассмотрение две бинарные переменные:

x_i – индикатор работоспособности i -го элемента ($x_i = 1$, если элемент работоспособен, и $x_i = 0$ в противном случае);

y_i – индикатор, характеризующий факт выполнения или невыполнения своего назначения (возложенной на него функции) ($y_i = 1$, если элемент на своем выходе выдает необходимый продукт (энергию, вещество, информацию), и $y_i = 0$ в противном случае).

Элемент может не выполнять своего назначения не только из-за потери собственной работоспособности (т. е. при $x_i = 0$), но и при неполучении на свои входы необходимых для своего функционирования ресурсов от смежных элементов.

Множество элементов разделим на два класса. Первый класс (класс P – produce) – элементы-источники или элементы-производители некоторого ресурса. Второй класс (класс T – transport) – элементы, обеспечивающие передачу, распределение или переработку одного вида ресурса в другой. К первому классу элементов АТК относятся, например, аккумуляторные батареи, ядерные реакторы, дизель-генераторы и т. п. агрегаты, в которых существует «начальный» источник энергии (химической, ядерной, тепловой). Ко второму классу относятся, например, кабельные линии передачи электроэнергии, трубопроводные коммуникации, распределительные щиты, парогенераторы, турбогенераторы, насосы и т. п. агрегаты. Класс i -го элемента обозначим символом $c_j \in \{P, T\}$.

Дополнительно к бинарным переменным x_i и y_i введем в рассмотрение маркеры $H_{i,j}^z$, которые назовем *путевыми маркерами*. Эти маркеры являются, по существу, метками, характеризующими пути и направления передачи ресурса от j -го элемента к i -му для обеспечения условий функционирования последнего. Индекс $z = c_j$ помечает класс элемента-поставщика ресурса. Например, $H_{i,j}^P$ означает, что j -й элемент является производящим и передает ресурс со своего выхода непосредственно на вход i -го элемента. $H_{i,j}^T$ означает, что ресурс поступает от j -го элемента, относящегося ко второму классу.

Теперь для каждого отдельного элемента можно записать логическое условие его функционирования в виде:

$$y_i = x_i f_i(H_{i,j}^z \cdot y_j, z = c_j; j \in N_i); i \in N, \quad (1)$$

где N – множество индексов всех выделенных в структуре АТК элементов, $N = \{1, 2, \dots, n\}$; N_i – множество индексов элементов, смежных i -му элементу и являющихся поставщиками всех необходимых для обеспечения его функционирования

ресурсов (энергия, рабочая среда, управление); f_i – логическая функция бинарных переменных $H_{i,j}^z \cdot y_j$, записанная в базисе операций конъюнкции и дизъюнкции и характеризующая условие достаточности поступающих на вход i -го элемента ресурсов. В отличие от работ [2–5] логическая функция f_i записывается не как функция от переменных y_j , а как функция от произведения переменных y_j на путевой маркер $H_{i,j}^z$, где z – класс j -го элемента-поставщика.

Система из n логических уравнений (1) с включенными в нее путевыми маркерами описывает все функциональные и ресурсные связи в АТК и представляет собой математическую модель его структуры, являясь, по существу, «базой знаний».

Метод формализованного получения логических функций работоспособности системы в аналитическом виде

Одна из основных задач анализа системы уравнений (1) – нахождение решений относительно различных y_i с целью получения логической функции работоспособности системы как функции индикаторов работоспособности элементов $Y = Y(x_i, i \in N)$. Решение системы логических уравнений (1) может быть найдено, например, методом последовательных подстановок со сведением исходной системы к одному логическому уравнению относительно, например, переменной y_1 .

В процессе подстановок будут получаться промежуточные уравнения вида:

$$y_s = A(x_i, H_{i,j}^z, y_k; i, j, k \in 1:n, k \neq s) + B(x_i, H_{i,j}^z, y_k; i, j, k \in 1:n, k \neq s) y_s, \quad (2)$$

где функции A и B представлены в виде ДНФ и содержат в своих выражениях различные переменные и маркеры $x_i, H_{i,j}^z, y_k$, но при этом не содержат в себе переменной y_s .

Отдельные конъюнкты K_r , входящие в A и B , будут, очевидно, представлять собой логические произведения соответствующих переменных работоспособности x_i , переменных выхода y_k и путевых маркеров $H_{i,j}^z$:

$$K_r = \prod_i x_i \cdot \prod_{i,j} H_{i,j}^z \cdot \prod_k y_k.$$

При любых фиксированных значениях $x_i, H_{i,j}^z, y_k$ уравнение (2) является простым логическим уравнением вида

$$y_s = A + B \cdot y_s. \quad (3)$$

Согласно таблице истинности это уравнение имеет два возможных решения:

$$1. y_s = A + B; 2. y_s = A.$$

Выбор одного из решений должен быть согласован с логикой функционирования системы. В некоторых случаях часть B необходимо сохранить, чтобы не потерять важную часть решения, в других же, наоборот, – необходимо отбросить ее, иначе возможно поглощение части верного решения. Наборы маркеров $H_{i,j}^z$, входящие в каждый конъюнкт выражения, позволяют, руководствуясь приведенными ниже правилами, определить, какие конъюнкты необходимо отбросить, а какие – сохранить. Однако этот анализ необходимо производить в конце решения, когда все подстановки завершены.

В каждом конъюнкте K_r будет содержаться индивидуальный набор маркеров $H_{i,j}^z$, поэтому конъюнкты поглощать друг друга не будут, даже если выбрать частное решение $y_s = A + B$. С другой стороны, в B могут содержаться «полезные» конъюнкты, которые необходимо сохранить. Поэтому предлагается всегда выбирать решение $y_s = A + B$, оставив анализ на последний шаг.

Таким образом, в результате последовательных подстановок решение для выбранной переменной y_s будет получено в виде выражения, в котором отсутствуют y_i :

$$y_s = \sum_k K_k; K_k = \prod_{i \in I(k)} x_i \cdot \prod_{(i,j) \in M(k)} H_{i,j}^z = X_k \cdot H_k. \quad (2)$$

Произведение маркеров $H_k = \prod_{(i,j) \in M(k)} H_{i,j}^z$ заменяется на единицу или нуль. Выбор значения основывается на следующем требовании: конфигурация АТК, описываемая $X_k \cdot H_k$, будет работоспособной, если все задействованные в ней элементы будут обеспечены всеми необходимыми ресурсами от своих поставщиков. При этом, все элементы должны быть напрямую или косвенно связаны с элементами P -класса, т. е. с источниками энергии, ресурса, информации и т. д. в системе. На основе этого требования строится следующее правило.

Будем говорить, что в конъюнкте H_k содержится путь $L = H_{i_1,j_1}^{z_1} H_{i_2,j_2}^{z_2} \dots H_{i_m,j_m}^{z_m}$ длиной m , состоящий из всех или части маркеров $H_{i,j}^z$, входящих в H_k , если $j_s = i_{s+1}$ для любого $s \in 1:m-1$, и маркеры, входящие в L , не повторяются. Например, возможны пути $H_{1,2}^T H_{2,3}^P H_{3,4}^T$, $H_{4,5}^T H_{5,4}^T$ и т. п. Значение H_k будет равно единице, если для лю-

бого T -маркера $H_{i,j}^T$, входящего в H_k , можно найти хотя бы один путь, завершающийся P -маркером: $L = H_{i,j}^T H_{j,j_2}^T \dots H_{i_m,j_m}^P$. В этом случае конъюнкт $K_k = X_k \cdot H_k = X_k$, т. е. сохраняется. Если хотя бы для одного T -маркера $H_{i,j}^T$ не существует пути, приводящего к P -маркеру, то i -й элемент не будет обеспечен, по крайней мере, одним из ресурсов, и $H_k = 0$, а конъюнкт $K_k = X_k \cdot H_k = 0$, т. е. отбрасывается на основании несоответствия «физическим» принципам работы системы. Например, $H_1 = H_{4,5}^T H_{5,4}^T = 0$, а $H_2 = H_{1,2}^T H_{2,3}^P = 1$.

Хрестоматийный пример

Сущность предлагаемого подхода к нахождению логических функций работоспособности технической системы удобно пояснить на примере анализа системы, структурная схема которой приведена на рисунке. Рассматриваемая система обладает всеми указанными ранее особенностями структурно-сложных систем, такими, как

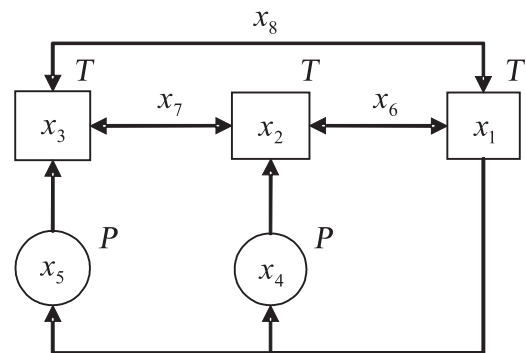
энергетические «обратные связи» (между элементами 1, 4 и 1, 5), обеспечивающие самоподдержание процесса функционирования;

«закольцованную» схему передачи и распределения электроэнергии (элементы 1, 2, 3);

управляемые переключки (элементы 6, 7, 8).

Система уравнений, описывающая структуру системы, имеет вид:

$$\begin{cases} y_1 = x_1(x_6 H_{1,2}^T y_2 + x_8 H_{1,3}^T y_3) \\ y_2 = x_2(x_6 H_{2,1}^T y_1 + x_7 H_{2,3}^T y_3 + H_{2,4}^P y_4) \\ y_3 = x_3(x_8 H_{3,1}^T y_1 + x_7 H_{3,2}^T y_2 + H_{3,5}^P y_5) \\ y_4 = x_4 H_{4,1}^T y_1 \\ y_5 = x_5 H_{5,1}^T y_1 \end{cases} \quad (5)$$



Пример структурно-сложной системы

1–3 – распределительные щиты; 4, 5 – электрогенераторы, требующие энергию и для собственных нужд;
6–8 – кабельные переключки

В уравнениях для y_1, y_2 и y_3 , характеризующих наличие на выходах элементов 1, 2 и 3 энергии, кроме переменных работоспособности x_1, x_2 и x_3 также содержатся переменные x_6, x_7 и x_8 , характеризующие исправность соответствующих кабельных перемычек, связывающих данные элементы.

Найдем решение системы относительно y_1 . Для начала подставим уравнения y_4 и y_5 в уравнения для переменных y_2 и y_3 :

$$\begin{cases} y_1 = x_1(x_6 H_{1,2}^T y_2 + x_8 H_{1,3}^T y_3) \\ y_2 = x_2(x_6 H_{2,1}^T y_1 + x_7 H_{2,3}^T y_3 + x_4 H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1) \\ y_3 = x_3(x_8 H_{3,1}^T y_1 + x_7 H_{3,2}^T y_2 + x_5 H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1) \end{cases} \quad (6)$$

Далее, совершив подстановку y_3 в уравнение для y_2 и раскроем скобки.

$$\begin{aligned} y_2 = & x_2(x_6 H_{2,1}^T y_1 + x_7 H_{2,3}^T x_3(x_8 H_{3,1}^T y_1 + x_7 H_{3,2}^T y_2 + \\ & + x_5 H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1) + x_4 H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1) = x_2 x_6 H_{2,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_3 x_7 x_8 H_{2,3}^T H_{3,1}^T y_1 + x_2 x_3 x_7 H_{2,3}^T H_{3,2}^T y_2 + \\ & + x_2 x_3 x_5 x_7 H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1 + x_2 x_4 H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1 \end{aligned}$$

Это уравнение имеет вид $y_2 = A + B y_2$. Возьмем его частное решение:

$$\begin{aligned} y_2 = A + B = & x_2 x_6 H_{2,1}^T y_1 + x_2 x_3 x_7 x_8 H_{2,3}^T H_{3,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_3 x_7 H_{2,3}^T H_{3,2}^T y_1 + x_2 x_3 x_5 x_7 H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_4 H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1. \end{aligned}$$

Рассмотрим конъюнкт $x_2 x_3 x_7 H_{2,3}^T H_{3,2}^T$. В нем отсутствуют переменные y_k , поэтому его можно считать завершенной конфигурацией. В произведении маркеров $H_{2,3}^T H_{3,2}^T$ нет ни одного P -маркера, поэтому ни для $H_{2,3}^T$, ни для $H_{3,2}^T$ нельзя построить путь к источнику ресурса. Следовательно, $H_{2,3}^T H_{3,2}^T$ равен нулю, и мы можем использовать этот факт для упрощения выражения, не дожидаясь окончания процесса решения относительно y_1 : $x_2 x_3 x_7 H_{2,3}^T H_{3,2}^T = 0$.

$$\begin{aligned} y_2 = & x_2 x_6 H_{2,1}^T y_1 + x_2 x_3 x_7 x_8 H_{2,3}^T H_{3,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_3 x_5 x_7 H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1 + x_2 x_4 H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1. \end{aligned}$$

Подставим полученное выражение в уравнение для y_3 и раскроем скобки:

$$\begin{aligned} y_3 = & x_3(x_8 H_{3,1}^T y_1 + x_7 H_{3,2}^T(x_2 x_6 H_{2,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_3 x_7 x_8 H_{2,3}^T H_{3,1}^T y_1 + x_2 x_3 x_5 x_7 H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_4 H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1) + x_5 H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1) = x_3 x_8 H_{3,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_3 x_6 x_7 H_{3,2}^T H_{2,1}^T y_1 + x_2 x_3 x_7 x_8 H_{3,2}^T H_{2,3}^T H_{3,1}^T y_1 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + x_2 x_3 x_5 x_7 H_{3,2}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1 + x_2 x_3 x_4 x_7 H_{3,2}^T H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1 + \\ & + x_3 x_5 H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1. \end{aligned}$$

Затем подставим полученные для y_2 и y_3 выражения в уравнение для y_1 :

$$\begin{aligned} y_1 = & x_1(x_6 H_{1,2}^T(x_2 x_6 H_{2,1}^T y_1 + x_2 x_3 x_7 x_8 H_{2,3}^T H_{3,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_3 x_5 x_7 H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1 + x_2 x_4 H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1) + \\ & + x_8 H_{1,3}^T(x_3 x_8 H_{3,1}^T y_1 + x_2 x_3 x_6 x_7 H_{3,2}^T H_{2,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_3 x_7 x_8 H_{3,2}^T H_{2,3}^T H_{3,1}^T y_1 + x_2 x_3 x_5 x_7 H_{3,2}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_3 x_4 x_7 H_{3,2}^T H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1 + x_3 x_5 H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1) = \\ & = x_1 x_2 x_6 H_{1,2}^T H_{2,1}^T y_1 + x_1 x_2 x_3 x_6 x_7 x_8 H_{1,2}^T H_{2,3}^T H_{3,1}^T y_1 + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_5 x_6 x_7 H_{1,2}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1 + \\ & + x_1 x_2 x_4 x_6 H_{1,2}^T H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1 + x_1 x_3 x_8 H_{1,3}^T H_{3,1}^T y_1 + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_6 x_7 x_8 H_{1,3}^T H_{3,2}^T H_{2,1}^T y_1 + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_7 x_8 H_{1,3}^T H_{3,2}^T H_{2,3}^T H_{3,1}^T y_1 + \\ & + x_2 x_3 x_5 x_7 x_8 H_{1,3}^T H_{3,2}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1 + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_4 x_7 x_8 H_{1,3}^T H_{3,2}^T H_{2,4}^T H_{4,1}^T y_1 + x_1 x_3 x_5 x_8 H_{1,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T y_1. \end{aligned}$$

Полученное уравнение имеет вид $y_1 = B y_1$. Его частное решение:

$$\begin{aligned} y_1 = B = & x_1 x_2 x_6 H_{1,2}^T H_{2,1}^T + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_6 x_7 x_8 H_{1,2}^T H_{2,3}^T H_{3,1}^T + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_5 x_6 x_7 H_{1,2}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T + \\ & + x_1 x_2 x_4 x_6 H_{1,2}^T H_{2,4}^T H_{4,1}^T + x_1 x_3 x_8 H_{1,3}^T H_{3,1}^T + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_6 x_7 x_8 H_{1,3}^T H_{3,2}^T H_{2,1}^T + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_7 x_8 H_{1,3}^T H_{3,2}^T H_{2,3}^T H_{3,1}^T + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_5 x_7 x_8 H_{1,3}^T H_{3,2}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T + \\ & + x_1 x_2 x_3 x_4 x_7 x_8 H_{1,3}^T H_{3,2}^T H_{2,4}^T H_{4,1}^T + \\ & + x_1 x_3 x_5 x_8 H_{1,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T. \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение (7) не содержит в правой части переменных $y_k, k \in 1:5$. Осталось сделать последний шаг в решении – проанализировать оставшиеся конъюнкты:

- $x_1 x_2 x_6 H_{1,2}^T H_{2,1}^T = 0$, так как $H_{1,2}^T H_{2,1}^T = 0$ из-за отсутствия P -маркеров;
- $x_1 x_2 x_3 x_6 x_7 x_8 H_{1,2}^T H_{2,3}^T H_{3,1}^T = 0$, так как $H_{1,2}^T H_{2,3}^T \times H_{3,1}^T = 0$ (нет P -маркеров);
- $x_1 x_2 x_3 x_5 x_6 x_7 H_{1,2}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T = x_1 x_2 x_3 x_5 x_6 x_7$, так как для всех T -маркеров можно составить пути к P -маркеру $H_{1,2}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T, H_{2,3}^T H_{3,5}^T, H_{5,1}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T$, на основании чего $H_{1,2}^T H_{2,3}^T H_{3,5}^T H_{5,1}^T = 1$;

- $x_1x_2x_4x_6H_{1,2}^TH_{2,4}^PH_{4,1}^T = x_1x_2x_4x_6$, так как $H_{1,2}^T \times H_{1,2}^TH_{2,4}^PH_{4,1}^T = 1$ (существуют пути $H_{1,2}^TH_{2,4}^P$ и $H_{4,1}^TH_{1,2}^P$);
- $x_1x_3x_8H_{1,3}^TH_{3,1}^T = 0$, так как $H_{1,3}^TH_{3,1}^T = 0$ (нет P -маркеров);
- $x_1x_2x_3x_6x_7x_8H_{1,3}^TH_{3,2}^TH_{2,1}^T = 0$, так как $H_{1,3}^TH_{3,2}^T \times H_{2,1}^T = 0$ (нет P -маркеров);
- $x_1x_2x_3x_7x_8H_{1,3}^TH_{2,3}^TH_{3,1}^T = 0$, так как $H_{1,3}^TH_{2,3}^TH_{3,1}^T = 0$ (нет P -маркеров);
- $x_1x_2x_3x_5x_7x_8H_{1,3}^TH_{3,2}^TH_{2,3}^PH_{3,5}^TH_{5,1}^T = x_1x_2x_3x_5x_7x_8$, так как $H_{1,3}^TH_{3,2}^TH_{2,3}^PH_{3,5}^TH_{5,1}^T = 1$ (существуют пути $H_{1,3}^TH_{3,5}^P$, $H_{3,2}^TH_{2,3}^PH_{3,5}^P$, $H_{2,3}^TH_{3,5}^P$, $H_{5,1}^TH_{1,3}^PH_{3,5}^P$);
- $x_1x_2x_3x_4x_7x_8H_{1,3}^TH_{3,2}^TH_{2,4}^PH_{4,1}^T = x_1x_2x_3x_4x_7x_8$, так как $H_{1,3}^TH_{3,2}^TH_{2,4}^PH_{4,1}^T = 1$ (существуют пути $H_{1,3}^TH_{3,2}^TH_{2,4}^P$, $H_{3,2}^TH_{2,4}^PH_{4,1}^T$, $H_{4,1}^TH_{1,3}^TH_{3,2}^PH_{2,4}^P$);
- $x_1x_3x_5x_8H_{1,3}^TH_{3,5}^TH_{5,1}^T = x_1x_3x_5x_8$, так как $H_{1,3}^TH_{3,5}^TH_{5,1}^T = 1$ (существуют пути $H_{1,3}^TH_{3,5}^P$, $H_{5,1}^TH_{1,3}^PH_{3,5}^P$).

В итоге, получаем ФРС в виде ДНФ:

$$y_1 = x_1x_2x_3x_5x_6x_7 + x_1x_2x_4x_6 + x_1x_2x_3x_5x_7x_8 + \\ + x_1x_2x_3x_4x_7x_8 + x_1x_3x_5x_8.$$

Пользуясь правилами булевой алгебры, приведем ФРС к минимальной форме (при этом конъюнкт $x_1x_2x_3x_5x_7x_8$ будет поглощен), являющейся дизъюнкцией отдельных КПУФ:

$$y_1 = x_1x_2x_3x_5x_6x_7 + x_1x_2x_4x_6 + x_1x_2x_3x_4x_7x_8 + x_1x_3x_5x_8.$$

Инвертированная ФРС в МДНФ представляет собой дизъюнкцию отдельных МСО:

$$\bar{y}_1 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2\bar{x}_3 + \bar{x}_2\bar{x}_5 + \bar{x}_2\bar{x}_8 + \bar{x}_3\bar{x}_4 + \bar{x}_3\bar{x}_6 + \bar{x}_4\bar{x}_5 + \\ + \bar{x}_6\bar{x}_8 + \bar{x}_4\bar{x}_7\bar{x}_8 + \bar{x}_5\bar{x}_6\bar{x}_7.$$

Анализ показывает, что решение абсолютно верное, физически объясним каждый его КПУФ и МСО. В решении нет ни лишних, ни упущенных комбинаций элементов – конъюнктов в ФРС. Точно учитывается и назначение переключки, и выделяются в решении все четыре контура циркуляции энергии. Такой результат, к сожалению, не был получен ранее. Предлагавшиеся методы зачастую не давали правильных результатов, либо «выдавали лишние корни», либо «теряли» объективно имеющиеся [2]. Это отмечено также в статье [4].

Практическое применение

Предложенный подход к построению корректной логико-математической модели АТК на основе топологии структурной схемы и аналитический регулярный метод вывода функции работоспособности системы в форме КПУФ и МСО

позволяет решать следующие важные задачи проектирования:

1) выполнение количественных оценок вероятностных показателей надежности и безотказности АТК с использованием отработанных в теории ЛВМ алгоритмов и процедур [6, 7];

2) оценку качества структурной организации АТК по детерминированным показателям, таким, как V -отказоустойчивость, d -отказоустойчивость, K -отказоустойчивость как функция от кратности отказов [1–3, 5] с выявлением всех «узких мест» – опасных комбинаций отказавших элементов минимальной кратности, позволяющую исключить тем самым создание т. н. «структурно-порочных» систем;

3) решение задачи синтеза алгоритмов реконфигурации структуры АТК при любых заранее непредсказуемых комбинациях отказов элементов и связей, обеспечиваемое содержанием в КПУФ полной информации о всех минимальных комбинациях работоспособных компонентов, при которых АТК может выполнять свое функциональное назначение; такая задача сформулирована в [1, 2, 8] как получение ответа на вопрос, как собрать структуру из оставшихся в строю элементов.

Автором разработан программный комплекс «StructSolver», реализующий метод, рассмотренный в данной статье.

Дальнейшее развитие метода связано с потребностями выполнения структурного анализа комплексов, у которых «выходной эффект» (уровень работоспособности, эффективности, живучести) зависит не только от комбинаций работоспособных и неработоспособных элементов, но и от порядка следования отказов во времени. Это класс автоматизированных комплексов с подсистемами аварийной защиты, у которых возможно неизбежное накопление так называемых «скрытых» отказов и, как следствие, каскадный (цепочечный) характер развития аварийных ситуаций. В этих случаях возникает потребность в формализованном методе построения полного графа деградации АТК. Алгоритмическая процедура решения такой задачи заложена в [3]. Важным является и учет двух типов отказов элементов, в частности, коротких замыканий и обрывов. Решение этого класса задач на основе использования рассмотренных здесь корректных логико-математических моделей предложено в [5].

Автор выражает благодарность И.П. Симакову за обсуждение постановок важных задач системного анализа и путей их решения, а также Г.Н. Черкесову за проявленное внимание к этой работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Войтецкий, В.В.** Развитие методологии, теории и принципов организации комплексных систем управления техническими средствами кораблей (судов) и управляющих систем типа АСУ ТП технических комплексов с повышенным риском эксплуатации [Текст] / В.В. Войтецкий, И.П. Симаков // Юбилейный научно-технический сб. НПО «Аврора». –1995. –С. 46–86.
2. **Астров, В.В.** Применение методов вероятностной логики и исследования операций к анализу живучести пространственно-распределенных энергетических систем [Текст] / В.В. Астров, И.П. Симаков, Г.Н. Черкесов; Под ред. акад. АН СССР Ю.Н. Руденко // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Живучесть систем энергетики. –Иркутск: СО АН СССР. –1979. –С. 49–60.
3. **Симаков, И.П.** Аналитические методы структурного анализа автоматизированных технических комплексов при оценке их безопасности и надежности [Текст] / И.П. Симаков // Матер. Всесоюзной конф. по надежности, живучести и безопасности автоматизированных технических комплексов. –Суздаль-Москва: Изд-во Ин-та проблем управления АН СССР, 1989.
4. **Черкесов, Г.Н.** Логико-вероятностный анализ надежности сложных систем на основе общего решения систем логических уравнений [Текст] / Г.Н. Черкесов, Ю.В. Степанов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2003. –№ 2. –С. 149–158.
5. **Симаков, И.П.** Математические модели, формализованные методы и программные средства объективной оценки показателей надежности и безопасности структурно-сложных технических систем [Текст] / И.П. Симаков, И.П. Холодных // Вычислительные, измерительные и управляющие системы. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. –С. 130–139.
6. **Рябинин, И.А.** Надежность, живучесть и безопасность корабельных электроэнергетических систем [Текст] / И.А. Рябинин, Ю.М. Парфенов. –СПб: Изд-во Военно-морской академии им. Н.Г. Кузнецова, 1997. –430 с.
7. **Рябинин, И.А.** Надежность, живучесть и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин. –СПб: Изд-во Политехника, 2000. –248 с.
8. **Колесников, Р.Д.** Автоматизация управления судовыми энергетическими установками в аварийных ситуациях [Текст] / Р.Д. Колесников, А.С. Смирнов // Вопросы судостроения. Сер. Автоматика и телемеханика. –1985. –№ 30. –С. 14–20.

УДК 519.1+519.8

А.М. Магомедов

ОБ ОДНОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ РЕБЕРНОЙ 2-РАСКРАСКЕ ДВУДОЛЬНОГО ГРАФА

В прикладных задачах востребованы различные виды реберной раскраски графов. Реберная раскраска называется *правильной*, если цвета любых двух смежных ребер различны. Наименьшее число цветов, достаточное для правильной реберной раскраски графа G , называется *реберным хроматическим индексом* и обозначается $\chi'(G)$. Связь $\chi'(G)$ с максимальной степенью $\Delta(G)$ вершин графа G исследована в 1964 г. В.Г. Визингом [1]: $\Delta(G) \leq \chi'(G) \leq \Delta(G) + 1$. В 1981 г. I. Holyer доказал [2] NP-полноту задачи проверки равенства $\Delta(G) = \chi'(G)$.

Правильная раскраска называется *интервальной*, если для каждой вершины номера цветов инцидентных ребер заполняют интервал. Исходные данные к расписанию, где в системе объ-

ектов X обслуживаются объекты множества Y , обычно представляются в виде двудольного графа $G = (X, Y, E)$. Если степень каждой вершины из X равна a , будем говорить, что G является $(a, *)$ -графом; если при этом степень каждой вершины из Y равна b , будем говорить, что G является (a, b) -графом. D. Hanson, C.O.M. Loten, B. Toft в 1998 г. доказали [3], что при нечетном Δ любой $(2, \Delta)$ -граф имеет интервальную раскраску $\Delta + 1$ цветом.

Результаты, относящиеся к правильной раскраске, используются, например, при построении расписаний, а результаты, относящиеся к интервальной раскраске, – при оптимизации расписаний. Обширный обзор задач теории расписаний приведен в [4]. Некоторые аспекты построения

расписаний длительности 5 без простоев рассмотрены в [5].

В данной статье для заданного $(2,*)$ -графа $G = (X, Y, E)$ рассматривается реберная раскраска специального вида, сужение которой на некоторое подмножество из E обладает свойствами, полезными для исследования существования интервальной раскраски.

2-каркас и выровненная 2-раскраска

Обозначения и определения. Если в двудольном графе $G = (X, Y, E)$

$$d_G x = a \forall x \in X; \max_{y \in Y} d_G y = b,$$

то граф G будем называть $(a, \bar{b})$ -графом.

Пусть p – целое положительное, $G = (X, Y, E)$ является $(2, 2p+1)$ -графом, $E' \subseteq E$, каждой вершине $x \in X$ инцидентно точно одно ребро, а каждой вершине $y \in Y$ – не более p ребер множества E' (каждая вершина $x \in X$ насыщена в E' точно один раз, а каждая вершина $y \in Y$ – не более p раз). Подграф $G' = (X', Y', E')$, порожденный множеством ребер E' , называется p -каркасом графа G , если имеется вершина $y \in Y$, насыщенная в E' точно p раз.

Ребра каркаса удобно характеризовать в терминах *освещенности*: ребра графа, принадлежащие каркасу, будем называть *темными*, остальные ребра графа – *светлыми*. Вершину $y \in Y$ степени 2 будем называть вершиной *светлого*, *серого* или *темного* типа, если среди ребер графа $G = (X, Y, E)$, инцидентных y , количество светлых ребер равно соответственно 2, 1 или 0.

Лемма 1. Пусть связный $(2,*)$ -граф $G = (X, Y, E)$ с четными степенями всех вершин обладает 2-каркасом $G' = (X', Y', E')$. Тогда либо найдется вершина $y \in Y$, такая, что $d_G y = 2$, либо $d_G y = 4$ для всех $y \in Y$.

Доказательство. Подграф графа G , дополнительный к подграфу G' , обозначим $\bar{G}'$. Рассмотрим случай, когда не существует вершина $y \in Y$ степени 2, другими словами (ввиду четности $d_G y$), $d_G x \geq 4 \forall y \in Y$. Докажем, что тогда $d_G x = 4 \forall y \in Y$.

Допустим противное: пусть имеется вершина $y_0 \in Y$, такая, что $d_G y_0 > 4$; ввиду ограничений $d_G y \leq 2 \forall y \in Y'$ и тривиального тождества $d_G y = d_{\bar{G}'} y + d_{G'} y$, отсюда вытекает, что

$$d_{\bar{G}'} y_0 - d_{G'} y_0 > 0. \quad (1)$$

Если $d_{\bar{G}'} y < d_{G'} y$ для какой-либо вершины

$y \in Y$, то из $d_G y \leq 2 \forall y \in Y'$ следует неравенство $d_G y \leq 3$, которое ввиду четности $d_G y$ эквивалентно равенству $d_G y = 2$, что в нашем случае невозможно. Таким образом, в рассматриваемом случае

$$d_{\bar{G}'} y \geq d_{G'} y \forall y \in Y. \quad (2)$$

Тогда, с одной стороны,

$$\begin{aligned} \sum_{y \in Y} (d_{\bar{G}'} y - d_{G'} y) &= (d_{\bar{G}'} y_0 - d_{G'} y_0) + \\ &+ \sum_{y \in Y \setminus \{y_0\}} (d_{\bar{G}'} y - d_{G'} y) > 0, \end{aligned}$$

согласно (1) и (2). С другой стороны, из равенств

$$d_G x = 2 \forall x \in X \text{ и } d_G x = 1 \forall x \in X$$

следует

$$\sum_{y \in Y} (d_{\bar{G}'} y - d_{G'} y) = 0.$$

Полученное противоречие доказывает, что либо существует вершина $y \in Y$, степень которой равна 2, либо $d_G y = 4$ для всех $y \in Y$.

Лемма доказана.

Для графа $G = (X, Y, E)$ и множества цветов $P \equiv \{1, 2, \dots, p\}$ сюръекция

$$C: E \rightarrow P$$

называется *реберной p -раскраской*; для каждой вершины $y \in X \cup Y$ и каждого цвета $i \in P$ обозначим через $c(v, i)$ количество ребер i -го цвета, инцидентных вершине v , и будем говорить, что в вершине v цвет i представлен $c(v, i)$ раз.

Реберная p -раскраска $(2, 2p+1)$ -графа $G = (X, Y, E)$ называется *выровненной*, если:

в каждой вершине $x \in X$ представлен точно один цвет;

если $d_G y > 2$, то $|c(y, i) - c(y, j)| \leq 1$ для всех $i, j \in P$ и $y \in Y$ (*условие выровненности*).

Условие выровненности означает, что, во-первых, в каждой вершине $y \in Y$ любой цвет $i \in P$ представлен не более трех раз, во-вторых, $c(y, i) = 3$ тогда и только тогда, когда

$$\begin{aligned} d_G y &= 2p+1 \text{ и} \\ c(y, 1) &= \dots = c(y, i-1) = c(y, i+1) = \dots = c(y, p) = 2. \end{aligned}$$

Выровненная p -раскраска и p -каркас называются *согласованными*, если цвета любых двух смежных темных ребер различны; к структуре, состоящей из p -каркаса и согласованной с ним выровненной p -раскраски, будем применять термин « p -каркас-раскраска».

Утверждение 1. Если в связном $(2,*)$ -графе $G = (X, Y, E)$ существует некоторый 2-каркас

$G' = (X, Y', E')$, то граф G обладает 2-каркас-раскраской.

Доказательство.

Первый случай. Множество Y содержит вершины нечетной степени.

Вершины графа G удобно называть в дальнейшем «родительскими» вершинами. Для каждой родительской вершины $y \in Y$, которой инцидентны два темных ребра (x', y) и (x'', y) и непустой набор светлых ребер $(x^{(1)}, y), \dots, (x^{(k)}, y)$, произведем замену вершины y и всех инцидентных ей ребер на две «дочерние» вершины y' и y'' , темные ребра (x', y') , (x'', y') и светлые ребра $(x^{(1)}, y''), \dots, (x^{(k)}, y'')$. Корректность присвоения ребрам освещенности очевидна: темные ребра снова образуют каркас. Полученный граф $G_1 = (X, Y_1, E_1)$ назовем «дочерним» графом.

Для каждой «родительской» вершины $x \in X$ выполним замену вершины x и обоих инцидентных ей ребер (x, y_i) и (x, y_j) на конструкцию из двух новых «дочерних» вершин x' , x'' и ребер (x', x'') , (x', y_i) , (x'', y_j) .

Добавим *фиктивную* вершину и соединим с ней *фиктивными* ребрами все вершины нового графа, степени которых имеют нечетные значения. Полученный «модифицированный дочерний граф» является эйлеровым. Выберем произвольно одно из двух направлений обхода эйлеровой цепи, начиная с фиктивной вершины, и выполним обход цепи, попеременно присваивая пройденным ребрам цепи цвета 1 и 2.

Удалим теперь фиктивные элементы (вершину и ребра) и отождествим вершины x' и x'' каждой пары дочерних для $x \in X$ вершин с восстановлением родительской вершины x и присвоением цвета ребра вида (x', y_i) восстановленному ребру (x, y_i) , а цвета ребра вида (x'', y_j) – восстановленному ребру (x, y_j) . Справедливость следующего утверждения очевидна.

Элементарное утверждение (о каркасе G'): если выполнить отождествление каждой пары дочерних вершин y' и y'' с восстановлением родительской вершины $y \in Y$ и присвоением цвета ребра вида (x_i, y') ребру (x_i, y) , а цвета ребра вида (x_j, y'') – ребру (x_j, y) , то получим «2-каркас-раскраску» – выровненную реберную 2-раскраску графа G , где любые два смежных ребра каркаса G' имеют различные цвета.

Второй случай. Все вершины множества Y имеют четные степени и значение $|X|$ чётно.

Построим дочерний граф $G_1 = (X, Y_1, E_1)$, как и выше. Без ограничения общности будем считать его связным (в противном случае дальнейшие рассуждения будут применены к каждой связной компоненте).

Последовательным ребрам эйлеровой цепи дочернего графа, начинающейся в произвольно выбранной вершине $y \in Y_1$:

$$y \equiv y_{j_1}, (y_{j_1}, x_{i_1}), x_{i_1}, (x_{i_1}, y_{j_2}), y_{j_2}, (y_{j_2}, x_{i_2}), x_{i_2}, \dots, \\ x_{i_k}, (x_{i_k}, y_{j_{k+1}}), y_{j_{k+1}} \equiv y$$

присвоим цвета 1 и 2 по *правилу чередования*:

первому ребру (y_{j_1}, x_{i_1}) присваивается цвет 1; при переходе через вершину множества X цвет ребра сохраняется, а при переходе через вершину множества Y цвет ребра меняется.

В результате:

1) для каждой вершины $x \in X$ два новых ребра $(x', y_i), (x'', y_j)$ инцидентные вершинам x' , x'' , дочерним для вершины x , получают один и тот же цвет;

2) для каждой вершины $y \in Y$, которой инцидентны два темных ребра, эти темные ребра являются последовательными ребрами эйлеровой цепи и получают разные цвета. В каждой иной вершине $y \in Y$ среди инцидентных y ребер (включающих, заметим, разве лишь одно фиктивное ребро) цвета 1 и 2 представлены равным образом;

3) вершины множества X встречаются в эйлеровой цепи четное число раз; отсюда следует, что цвет первого ребра цепи совпадает с цветом последнего ребра; следовательно, в вершине y цвета 1 и 2 представлены равным образом. Для каждой вершины из Y_1 , встречающейся в цепи лишь в качестве промежуточной вершины, соответствующее утверждение тривиально.

Остается применить элементарное утверждение (о каркасе G').

Третий случай. Степени всех вершин множества Y четные, значение $|X|$ нечетно.

Согласно лемме 1, либо степени всех вершин Y равны 4, либо в Y найдется вершина степени 2. Если степени всех вершин Y равны 4 и $|X| = 2K + 1$, где K – некоторое целое положительное, то из очевидных равенств

$$|E| = 2|X| \text{ и } |E| = 4|Y|$$

получим:

$$2 \cdot (2K + 1) = 4|Y|, \quad 4|Y| - 4K = 2,$$

что невозможно.

Таким образом, в рассматриваемом случае имеется вершина $y_0 \in Y$ степени 2. Построим дочерний граф $G_1 = (X, Y_1, E_1)$. Очевидно, $d_{G_1} y_0 = 2$.

Ситуация 3.1. *Имеется серая вершина $y_0 \in Y_1$.*

Если y_0 – вершина серого типа, то, выполнив обход эйлеровой цепи, начиная с вершины y_0 (и с любого из двух, инцидентных y_0 , ребер), следуя сформулированному выше правилу присвоения цветов 1 и 2, приходим к элементарному утверждению (о каркасе).

Ситуация 3.2. *В Y_1 имеются вершины степени 2 и все такие вершины – темного типа.*

Так как $|X|$ нечетно и ребра каркаса G' насыщают каждую вершину из X точно один раз, то количество темных ребер в графе G нечетно. Следовательно, в рассматриваемом случае найдется вершина $\bar{y} \in Y_1$, инцидентная точно одному из ребер темного типа и нескольким ребрам светлого типа; из нечетности $d_G \bar{y}$ и неравенства $d_G \bar{y} > 3$ следует, что вершина $\bar{y}$ инцидентна не менее чем трем ребрам светлого типа.

Построение в графе G_1 «чередующейся» цепи начнем в вершине $\bar{y}$, выбрав в качестве начального ребра цепи любое из светлых ребер вида $(x, \bar{y})$, и продолжим построение в соответствии с правилом: при достижении очередной вершины $x \in X$ цепь продолжается ребром темного типа, а при достижении очередной вершины $y \in Y$ цепь продолжается любым не пройденным ранее светлым ребром, инцидентным вершине y .

Построение такой цепи с чередующейся освещенностью может быть продолжено, пока не встретится вершина y_0 темного типа. В самом деле, если посещенная в процессе построения вершина $y \in Y_1$ инцидентна хотя бы одному светловому ребру, то среди ребер, инцидентных y , ребер светлого типа не меньше, чем ребер темного типа (ввиду четности степени $d_{G_1} y$).

Пусть построена чередующаяся цепь $\bar{y} - y_0$, где y_0 – вершина темного типа. Поменяв освещенность каждого ребра цепи $\bar{y} - y_0$ на противоположный тип, получим новый каркас графа G (обозначим его $\bar{G}'$) и серую вершину y_0 .

Справедливость утверждения леммы для такого случая была установлена выше при рассмотрении ситуации 3.1; единственное отличие заключается в том, что элементарное утверждение применяется теперь к новому каркасу $\bar{G}'$. Утверждение доказано.

Замечание. Как видно из доказательства утверждения, лишь в ситуации 3.2 актуально то обстоятельство, что 2-каркас, для которого можно указать согласованную с ним 2-раскраску, необязательно является 2-каркасом, заданным в условии утверждения. Приведем пример, где 2-каркас, заданный в условии, действительно, не подходит.

Рассмотрим граф $G = (X, Y, E)$, где $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$, $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$, а множество ребер E – суть объединение множества темных ребер:

$$\{(x_1, y_1), (x_2, y_1), (x_3, y_2), (x_4, y_2), (x_5, y_3)\}$$

и множества светлых ребер:

$$\{(x_1, y_2), (x_2, y_3), (x_3, y_3), (x_4, y_3), (x_5, y_2)\}.$$

2-каркас, порожденный набором темных ребер, есть $G' = (X, Y', E')$. Пусть C – выровненная реберная раскраска графа G в цвета 1 и 2, согласованная с G' . Без ограничения общности допустим, что $c(x_1, y_1) = 1$. Так как $(x_1, y_1), (x_2, y_1) \in E'$, то $c(x_2, y_1) = 2$; поскольку $c(x_2, y_3) = c(x_2, y_1)$, то и $c(x_2, y_3) = 2$. Далее, т. к. ребра (x_3, y_2) и (x_4, y_2) – темного цвета, то цвета этих ребер различны. Поскольку вершины x_3 и x_4 имеют один и тот же набор смежных вершин (y_2 и y_3), из двух возможных вариантов для их цветов:

$$1) c(x_3, y_2) = 1, c(x_4, y_2) = 2,$$

$$2) c(x_3, y_2) = 2, c(x_4, y_2) = 1,$$

достаточно рассмотреть любой один; пусть, например, $c(x_3, y_2) = 1, c(x_4, y_2) = 2$.

Так как вершине y_2 инцидентны два ребра цвета 1: (x_1, y_2) и (x_3, y_2) и одно ребро (x_4, y_2) цвета 2, то цвет четвертого ребра (x_5, y_2) , инцидентного вершине y_2 , равен 2 (цвет, представленный в вершине x_5 , равен 2), тогда и цвет ребра (x_5, y_3) равен 2. Таким образом, вершине y_3 инцидентны три ребра цвета 2: $(x_2, y_3), (x_3, y_3), (x_4, y_3)$ и точно одно ребро (x_5, y_3) цвета 1.

Полученное противоречие доказывает, что в качестве 2-каркаса, согласованного с некоторой выровненной 2-раскраской, не может быть выбран 2-каркас $G' = (X, Y', E')$, заданный в условии.

Поступим в соответствии с пунктом 3.2 доказательства утверждения. Множество Y содержит единственную вершину степени 2: это вершина y_1 (темного типа); положим $y_0 \equiv y_1$. Чередующаяся цепь: $y_3, (y_3, x_4), x_4, (x_4, y_2), y_2, (y_2, x_1), x_1, (x_1, y_1), y_1$ начинается с вершины $\bar{y} \equiv y_3$, которой инцидентны

точно одно ребро темного типа и несколько ребер светлого типа. Поменяв освещенность ребер чередующейся цепи, получим граф с темными ребрами $(x_1, y_2), (x_2, y_1), (x_3, y_2), (x_4, y_3), (x_5, y_3)$, образующими нужный каркас G'' , и светлыми ребрами $(x_1, y_1), (x_2, y_3), (x_3, y_3), (x_4, y_2), (x_5, y_2)$.

Приложение результата, близкого к рассмотренному выше, обсуждается в [6]. Отметим, что справедливо и следующее утверждение.

Утверждение 2. Пусть заданы целое положительное p и $(2, 2p+1)$ -граф $G = (X, Y, E)$. Если $|S| \leq p |\Gamma(S)|$ для любого подмножества S множества X , то граф G обладает p -каркас-раскраской.

Данному результату и его приложениям целесообразно посвятить отдельную статью.

Статья написана при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» № 2011-1.3.2-111-017/12 и гранта РФФИ № 0901-96504-р_юг_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Визинг, В.Г. Об оценке хроматического класса p -графа [Текст] / В.Г. Визинг // Дискретный анализ: Сб. науч. тр. –Новосибирск: Ин-т математики СОАН СССР, 1964. –Вып. 3. –С. 25–30.
2. Holyer, I. The NP-completeness of edge-coloring [Текст] / I. Holyer // SIAMJ. Comput. –1981. –Vol. 10. –№ 4. –Р. 718–720.
3. Hanson, D. On interval colourings of bi-regular bipartite graphs [Текст] / D. Hanson, C.O.M. Loten, B. Toft // ArsCombinat. –1998. –Vol. 50. –Р. 23–32.
4. Танаев, В.С. Теория расписаний. Многостадийные системы [Текст] / В.С. Танаев, Ю.Н. Сотсков, В.А.

Струсович. –М.: Наука, 1989.

5. Магомедов, А.М. Условия существования непрерывных расписаний длительности пять [Текст] / А.М. Магомедов, А.А. Сапоженко // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 15. Вычислительная математика и кибернетика. –2011. –Т. 34. –№ 1. –С. 39–44.

6. Магомедов, А.М. Два частичных паросочетания в двудольном графе специального вида [Текст] / А.М. Магомедов // Матер. X Междунар. семинара Дискретная математика и ее приложения; Под ред. О.М. Касим-Заде. –М.: Изд-во механико-математ. ф-та МГУ. –2010. –С. 310–312.

УДК 004. 94.

Ю.А. Голландцев, В.А. Дубенецкий

РАСШИРЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТА ФУНКЦИЯМИ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Информационная поддержка процессов управления проектами является важным фактором повышения качества проектирования и сокращения затрат на организацию проектных работ. Однако сфера НИОКР при обширных и разносторонних связях с другими сферами деятельности фирмы, как правило, относительно обособлена в организации. Это связано с неопределенностью процесса НИОКР, спецификой деятельности в сфере проектирования.

Эффективность информационной поддержки процессов управления во многом определяется тем, насколько полно и точно информационная модель проекта отражает реальные процессы и объекты проекта. В процессе управления проектами используется множество видов информации.

Причем, состав и структура этой информации в сильной степени зависят от области проектирования, многие из них часто могут быть конкретизированы только в процессе проектирования.

Процесс *Управление проектом* на среднесрочном и краткосрочном уровнях управления состоит из следующих работ:

- объемно-календарное планирование работ по проекту;
- управление разработкой и ведением технической документации;
- учет и контроль выполнения работ по проекту, включая управление обеспеченностью проектов материалами и комплектующими;
- управление потоками работ с объектами проекта, включая формирование технологических



схем работы, управление ролями сотрудников, учет и контроль сроков выполнения работ.

Подход к проектированию информационных систем управления проектами на основе каркасов. В настоящее время особый интерес представляют подходы к проектированию приложений на основе доменных архитектур [3, 4]. Выбрав нужные классы архитектурных доменов можно использовать имеющиеся архитектурные решения для реализации конкретной информационной системы. Такой подход приводит к массовому повторному использованию успешных архитектурных решений и дизайна, снижению риска неудачи, поскольку эталонные модели проверены на практике. Для описания предлагаемых решений будем использовать язык UML (*Unified Modeling Language*) – унифицированный язык моделирования [2]. Это стандартная нотация визуального моделирования программных систем, принятая консорциумом Object Managing Group (OMG) осенью 1997 г., на сегодняшний день поддерживается многими объектно-ориентированным CASE продуктами.

Комплексная модель проекта является основой предлагаемых решений и включает в себя следующие компоненты:

- иерархическую модель работ проекта, позволяющую решать задачи объемно-календарного планирования;

- иерархическую модель состава технических компонентов проекта (конструкторская спецификация);

- модель, задающую ролевую структуру объектов различных классов, связанных с проектом;

- модель расчета стоимости работ проекта на основе калькуляций стоимости;

- модель управления логикой работ с объектами проектов с оперативным контролем плановых сроков выполнения.

В качестве основы для архитектурных решений информационной системы управления проектами возьмем системную модель управления проектами, в которой в качестве основных компонентов выделены *Субъект управления проектом*, *Объект управления проектом* и *Процесс управления проектом* [1]. Последовательно рассмотрим различные аспекты информационной поддержки процесса управления проектами.

Проанализируем структуру для моделирования ролевой структуры *Субъектов управления проектом*. Следует отметить, что инструмент

должен позволять расширять и изменять классификацию субъектов. Для этого может быть использован каркас *Управление схемами классификации информационных объектов*. Суть проектного решения составляет введение сущности *Роль субъекта в проекте*, которая позволяет описывать ролевую структуру не в виде ассоциаций, а в виде настраиваемого списка [5]. Такое решение позволяет предоставить точку расширения для моделирования разнообразных ролевых структур, встречающихся на практике. Для моделирования структуры проектных работ используется традиционная модель, описывающая иерархию работ и их причинно-следственные связи [1]. Основным компонентом модели проекта является спецификация проектных работ. В системной модели выделен такой класс, как *Объект проекта*. Данное расширение является существенным отличием рассматриваемой модели от известных моделей.

Сущность *Объект проекта* позволяет вести реестр объектов проекта. Природа объекта определяется соответствующей схемой классификации. Для моделирования схем классификации объектов проектов используется каркас *Управление схемами классификации информационных объектов* [5]. Важным расширением модели проекта является связывание *Работы проекта с Объектом проекта*.

Оценку стоимости проекта предлагается производить путем формирования разнообразных калькуляций стоимости. Каркас *Калькуляции* позволяет конструировать разнообразные калькуляции, привязывать к ним объект калькуляции, рассчитывать стоимость по статьям с использованием процедур расчета сводных норм расхода ресурсов [5]. Спецификация имеющихся трудовых ресурсов и их распределение является традиционным и в данной статье не рассматривается [5].

На рис. 1 представлен фрагмент проектного решения, поддерживающего введение в модель объектов проекта.

Особенность рассматриваемой модели управления проектами – управление состояниями объектов проекта путем спецификации регламента работы с элементами объектов проекта, учета и контроля выполнения операций с элементами на оперативном уровне управления проектами. Смена состояния может рассматриваться как событие (или веха). Состояние работы проекта и всего проекта можно определить через состояния связанных с ними объектов проекта. На рис. 2

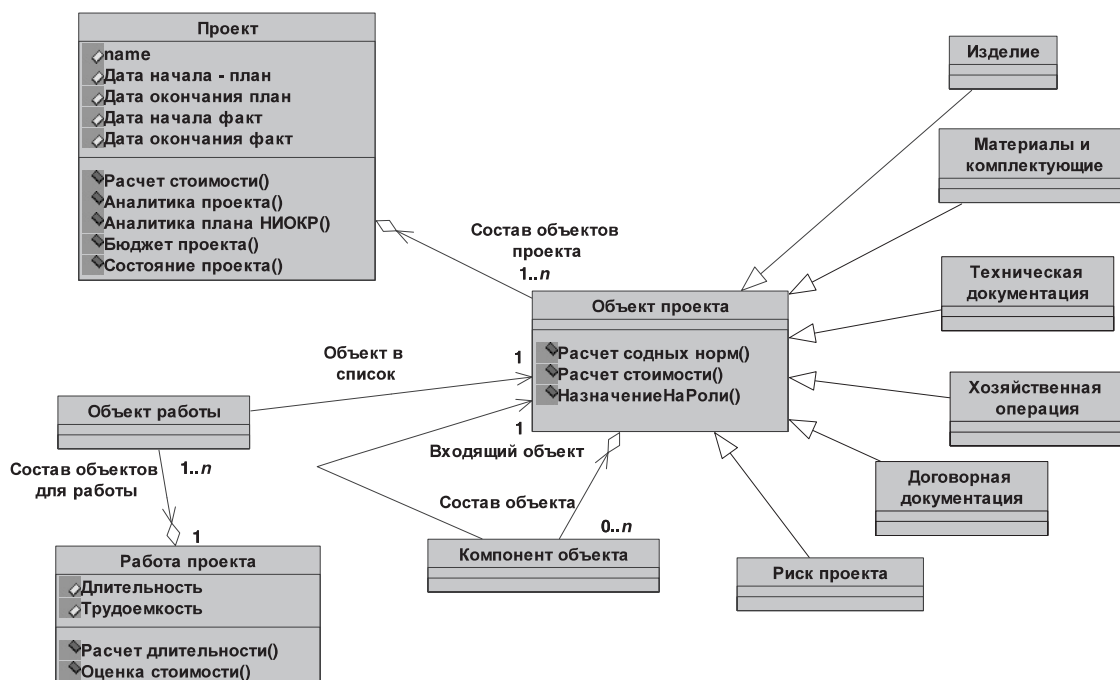


Рис. 1. Фрагмент каркаса для моделирования объектов проекта

представлен фрагмент проектного решения, поддерживающий названные выше функции. Первая часть схемы поддерживает инструментальные функции формирования схем кооперации, описывающих состояния, переходы и функции переходов различных классов объектов проекта. Вторая часть схемы описывает решения по исполнению логики движения конкретных элементов в соот-

ветствии с заданной спецификацией для соответствующего класса.

Часть каркаса, ответственного за движение элементов объектов проектов, включает в себя следующие сущности и ассоциации. Метод *Назначение ролей* (), сущность *Объект на роль* и ассоциации *Роли объектов* и *Объект на роль* позволяют конкретизировать ролевую структуру

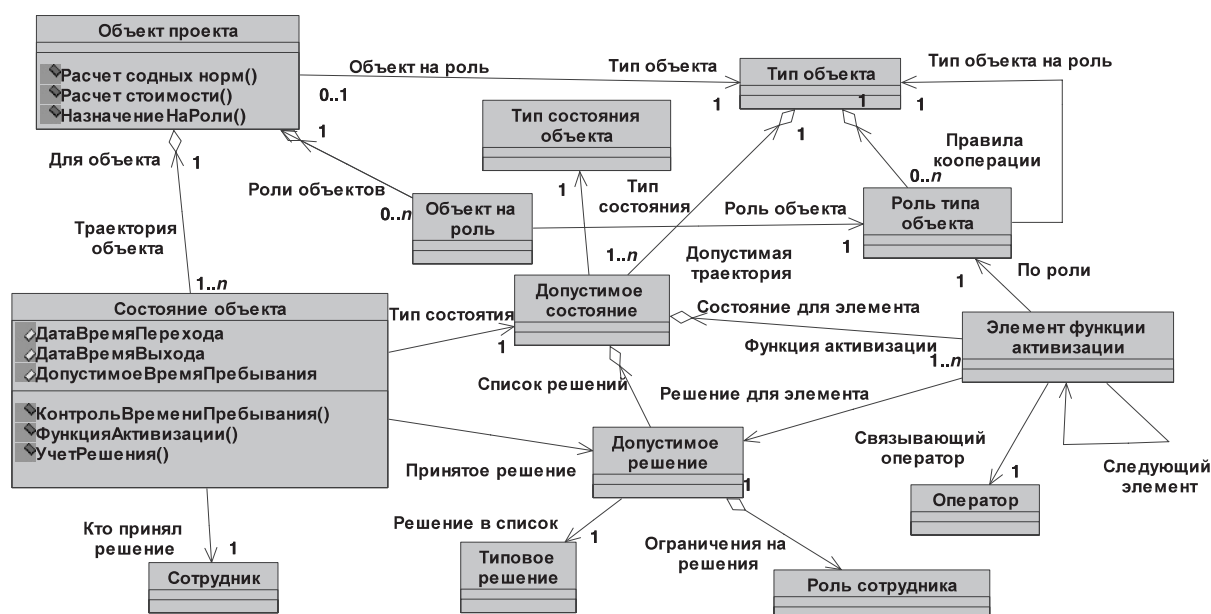


Рис. 2. Фрагмент каркаса для моделирования логики управления состоянием объектов

Таблица 1

Структура основных работ проекта

Наименование работ
1. Выполнение проекта
1.1. Подготовительный этап
1.1.1. Разработка коммерческого предложения
1.1.2. Разработка технического задания
1.1.3. Заключение контракта на проектирование электропривода
1.1.4. Формирование приказа с номером Заказа
1.1.5. Получение аванса
1.2. Концептуальное проектирование привода
1.3. Разработка конструкторско-технологической документации
1.4. Производство опытного образца двигателя
1.5. Разработка программного обеспечения системы управления приводом
1.6. Выбор и оплата комплектующих изделий
1.7. Поставка комплектующих изделий
1.8. Комплексование аппаратно-программных средств электропривода
1.9. Испытание электропривода
1.10. Окончательная оплата работ по акту на разработку электропривода

путем последовательного назначения элементов на соответствующие роли в экземпляре кооперации. Для управления движением конкретных элементов введены сущность *Состояние объекта* и ассоциация *Траектория объекта*. Атрибут *Допустимое время пребывания* позволяет задать ограничение на время пребывания элемента в конкретном состоянии. Атрибуты *Дата_Время_Перехода*, *Дата_Время_Выхода* позволяют учитывать время пребывания в некотором состоянии. Метод *Контроль_Времени_Пребывания ()* обеспечивает контроль превышения допустимого времени пребывания в состоянии. Метод *Функция_Активизации ()*, используя цепочку связей *Тип состояния*, *Функция активизации*, обеспечивает проверку условия активизации и перевод объекта в соответствующее состояние. Метод *Учет решения использует ()* связи *Принятое решение*, *Решение в список* и *Ограничения на решения*, обеспечивает контроль доступа и учет принятого в конкретном состоянии конкретного объекта проекта решения.

Пример работы с проектом. В качестве примера рассматривается проект разработки электропривода, включающий в себя изготовление и испытание опытного образца изделия. Примерная спецификация работ по проекту представлена в табл. 1.

Общее количество работ в рассматриваемом примере проекта составляет 65 видов. Общее количество объектов проекта составляет более 300. Основные объекты проекта представлены в табл. 2. На рис. 3 показан пример формы для редактирования состава работ проекта. Для расчета календарного графика выполнения работ задана дата 01.05.2011. Для каждой терминальной работы задана соответствующая калькуляция стоимости работ.

Бюджет каждой агрегированной работы и всего проекта рассчитывается автоматически на основе результатов расчета графика выполнения терминальных работ. Бюджет проекта может быть представлен как в табличной форме, так и в виде графика. Важной частью предлагаемой

Таблица 2

Список основных объектов проекта

Объект	Класс объекта
K010.2011 Коммерческое предложение	Коммерческое предложение
T3 ЭП001.2011 ТЗ на разработку электропривода	Техническое задание
ЭП001.2011 Контракт на разработку электропривода Т75	Договор НИОКР
ИС001.2011 Контракт на разработку испытательного стенда	Договор НИОКР
КП ЭП001.2011 Календарный план	Календарный план
Калькуляции для определения договорной цены	Калькуляция
010.2011 Платеж по контракту на разработку электропривода (аванс)	Платежные поручения заказчика
001.2011 Заказ на изготовление двигателя	Заказ для производства
КД Т75.112 КД электропривода	Конструкторская документация
ТД Т75.112.019 ТД двигателя	Технологическая документация
Т75.112 Электропривод	Сборка
Т75.112.019 Агрегат приводной	Сборка

модели проекта является возможность связывания работ проекта с разнообразными объектами проекта. Для каждого класса проектных работ настраивается собственная структура связывания. На рис. 4 представлен пример связывания объектов проекта для работы класса *Подготовительные работы*.

Как видно из примера, к проектной работе должны быть привязаны объекты следующих классов: *Приказы, Контракт, Техническое задание, Календарный план, Коммерческое предложение*. Для работы проекта класса *Конструирование* состав связанных объектов уже другой (*3D модели, Чертежи*).

Расчет сводных норм расхода материалов и комплектующих на проект основывается на спецификации материальных объектов проекта. Обеспечение проектов материалами и комплектующими может быть организовано на основе формирования заявок на обеспечение проектов материалами и комплектующими. Учет закупок выполняется обычным путем с использованием функций управления закупками и учета движения товарно-материальных ценностей.

Ролевая структура определяется составом атрибутов исходного класса. На рис. 5 представлен пример управления состоянием работы *1.ЭП.1.1 Разработка коммерческого предложения*.

№	Обознач.	Наименование	Значение	ВВ.Зн	Формула
1	Стоимость	Стоимость закупок	0,00	0,00	Ввод
2	ТРД	Трудоёмкость (ч/дн)	0,00	0,00	Ввод
3	СтЧ/дн	Стоимость человеко-дня (руб.)	0,00		Ввод
4	ОЗП	Основная заработная плата	0,00	0,00	(ст*СтЧ/дн)
5	Отчисления	Отчисления	0,00	0,00	(ст*ОЗП*0,01)
6	Пр	Прочие расходы	0,00	0,00	Ввод
7	Полная сто	Полная стоимость	0,00	0,00	(((ст*Стоим

Рис. 3. Пример расчета стоимости проектной работы на основе калькуляции

The screenshot shows a software interface with a list of tasks on the left and a detailed view of a selected task on the right. A magnifying glass icon is positioned over the task list.

Обозначение	Наименование	Дата создания
1. ЭП.1.3.1	Подготовка контракта	
1. ЭП.1.3.2	Определение договорной цены	ПЭО
1. ЭП.1.3.3	Разработка календарного плана	
1. ЭП.1.3.4	Согласование контракта	
1. ЭП.1.3.5		
1. ЭП.1.3.6		
1. ЭП.1.4		
1. ЭП.1.5		
1. ЭП.2		
1. ЭП.2.1		
1. ЭП.2.2		
1. ЭП.2.3		
1. ЭП.2.4		
1. ЭП.2.5		
1. ЭП.2.6		
1. ЭП.2.7		
1. ЭП.2.8		
1. ЭП.2.9		
1. ЭП.2.10		
1. ЭП.3		
1. ЭП.3.1		

Характеристика	Значение (Наименование)	Обозначение
Приказы	Приказ на открытие проекта ЭП001	0001
Контракт проекта	Разработка электропривода Т75	ЭП0001.2011
Техзадание	ТЗ на проектирование электропривода	ТЗ ЭП001.2011
Календарный план	Календарный план по договору ЭП001	КП ЭП001.2011
Коммерческое предложение	Коммерческое предложение на прс К 010.2011	

Рис. 4. Пример связывания проектной работы с объектами проекта

ния. Работа может быть выполнена только тогда, когда связанные объекты проекта документ *К 010.2011 Коммерческое предложение* перейдет в состояние *Хранение*, документ *ТЗ ЭП 001.2011 ТЗ на разработку электропривода* перейдет в

состояние *Согласование документа внутреннее*.

Таким образом, предлагаемая информационная модель позволяет описать иерархический состав работ каждого проекта:

The screenshot shows a software interface with a task list on the left and a detailed view of a selected task on the right. A magnifying glass icon is positioned over the task list.

Обозначение	Наименование	Дата создания
1. ЭП.1.1	Разработка коммерческого предложения	21.03.2011 13:06:57

Характеристика	Значение (Наименование)	Обозначение
Приказы		
Контракт проекта		
Техзадание	ТЗ на проектирование электропривода	ТЗ ЭП001.2011
Календарный план	Календарный план по договору ЭП001	КП ЭП001.2011
Коммерческое предложение		

Работа	Состояние	Дата
Подготовка документа	Выполнять	
Согласование документа (внутреннее)		
Согласование документа внешнее		
Утверждение документа (внутреннее)		
Утверждение документа внешнее		
Хранение		

Рис. 5. Пример управления состоянием работ и состояниями связанных объектов проекта

оценить стоимость и бюджет проекта на основе калькуляций стоимости отдельных работ;

описать состав и структуру объектов проекта (в т. ч., технических компонентов) и рассмотреть *Проект* как технический объект и применить к

нему весь комплекс сервисов для поддержки процессов жизненного цикла изделия (*Подготовка производства, Производство, Снабжение* и др.);

связать условия завершения работы с состояниями объектов проекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воропаев, В.И.** Системное представление Управления проектами (COVNET) [Электронный документ] / В.И. Воропаев, Г.И. Секлетова. –Режим доступа: http://www.pmuniversity.ru/files/article_1_systematic.pdf

2. **Рамбо, Джеймс.** UML: специальный справочник [Текст] / Джеймс Рамбо, Айвар Якобсон, Грэди Буч. –СПб: Питер, 2002.

3. **Гринфилд, Джек** Фабрики разработки программ. Поточковая сборка типовых приложений, моделирование, структуры и инструменты [Текст] / Джек

Гринфилд, Шорт Кейт; пер. с англ. –М.: ООО «ИД Вильямс», 2007.

4. **J. Duffy, Daniel** Domain Architectures. Models and Architectures for UML Applications: Datasim Education BV [Текст] / Daniel J. Duffy. –Amsterdam, Netherlands, 2004.

5. **Советов, Б.Я.** Теория информационных процессов и систем [Текст] / Б.Я. Советов, В.А. Дубенецкий, В.В. Цехановский [и др.]. –М.: Изд. центр «Академия», 2010.

УДК 004.891.2

Р.М. Хисамутдинов

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТОВ ЧЕРВЯЧНОГО ТИПА ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Инструмент – одна из базовых составляющих технологической системы резания, используемой в машиностроительном производстве. С ростом уровня автоматизации машиностроения его роль значительно возрастает, и поэтому своевременное обеспечение качественным инструментом с оптимальными конструктивными параметрами – необходимое условие эффективности системы технологической подготовки производства нового изделия [1].

Вопросы автоматизации системы инструментального обеспечения машиностроительного предприятия в современных экономических условиях особо актуальны в связи с тем, что производство машиностроительных заводов России является многономенклатурным [4].

Инструмент должен отвечать требованиям к заданной геометрической точности обработки и производительности, соответствовать условиям его эксплуатации в автоматическом цикле, таким, как автоматическая смена инструмента, диагностика, оперативная информация о состоя-

нии режущей кромки инструмента, размерная подналадка, оптимальность конструктивных параметров инструмента и параметров его установки для компенсации систематической составляющей и т. д. [2].

В реальных условиях зубообрабатывающего производства фактический профиль зуба колеса будет иметь отклонения от теоретически точного профиля не только из-за погрешности формообразования («органических» погрешностей), но и из-за чисто технологических факторов: упругих деформаций технологической системы резания, погрешностей кинематической цепи станка, износа инструмента и т. д. Значительный удельный вес в указанных погрешностях составляют погрешности, имеющие систематический характер. При этом появляется реальная возможность компенсировать систематическую составляющую технологической погрешности профиля зуба колеса за счет выбора оптимальных конструктивных параметров червяка и параметров его установки относительно зубчатого колеса [3].

Указанную компенсацию можно произвести по результатам измерения погрешности профиля зуба предварительно обработанного зубчатого колеса. Результаты измерения погрешности профиля, как правило, представляются в виде графика (эвольвентограммы): по оси ординат откладываются углы развернутости эвольвенты v , по оси абсцисс – отклонения профиля от теоретической эвольвенты f_r (рис. 1). Прежде всего необходимо опытную партию зубчатых колес данного типоразмера с заданным припуском обработать на строго определенных режимах: скорости вращения червяка и продольной подаче. Для того, чтобы исключить часть погрешности профиля, возникающую от радиального биения зубчатого венца, необходимо на основе результатов измерения построить эвольвентограммы для нескольких профилей зубьев (например, для трех), расположенных равномерно по зубчатому венцу, и определить средние значения погрешности профиля для каждого угла развернутости [5, 6].

На рис. 1 для текущего значения угла развернутости v_i показаны теоретическая («органическая») погрешность профиля до оптимизации – f_{rti} , фактическая погрешность профиля до оптимизации – f_{rfi} и «органическая» погрешность профиля после оптимизации – f_{rtoi} . Фактическая погрешность профиля после оптимизации для текущего v_i определим из выражения:

$$f_{frfoi} = f_{rfi} - f_{rti} + f_{rtoi}. \quad (1)$$

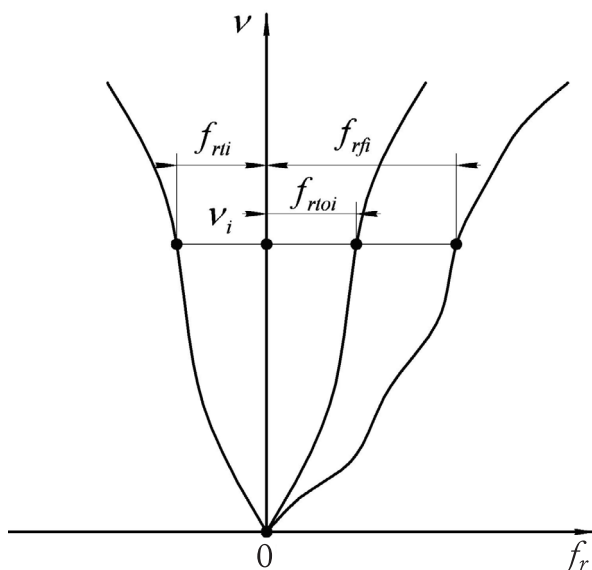


Рис. 1. Изменение погрешности профиля зуба колеса в зависимости от угла развернутости эвольвенты

Данная фактическая погрешность профиля после оптимизации должна быть минимизирована. Процедуру минимизации целесообразно выполнять по следующей схеме:

1) из эвольвентограмм вводятся усредненные значения погрешности профиля f_{rfi} для каждого угла развернутости v_i , соответствующего каждой конкретной расчетной точке;

2) для каждой точки рассчитывается значение «органической» погрешности профиля до оптимизации f_{rti} ;

3) оптимизируемому параметру задается приращение и для каждой точки рассчитывается значение «органической» погрешности профиля после оптимизации f_{rtoi} ;

4) по формуле (1) для каждой точки рассчитывается значение фактической погрешности профиля после оптимизации f_{frfoi} , и из полученных значений f_{frfoi} формируется массив;

5) определяется максимальное и минимальное значение элементов массива, разность между ними покажет фактическую погрешность профиля зуба колеса после цикла оптимизации f_{frfo} . Указанная погрешность является критерием оптимизации или целевой функции при решении данной оптимизационной задачи.

В нашем случае целесообразно выполнить однопараметрическую оптимизацию, и в качестве независимого оптимизируемого параметра взять наиболее важный – осевой ход винтовой режущей кромки червяка p_{z1} . Параметр винтовой режущей кромки, угол подъема винтовой режущей кромки, межосевой угол между червяком и колесом будут зависеть от p_{z1} .

Блок-схема оптимизационного модуля представлена на рис. 2. Здесь f_{frfo} – исходное значение фактической погрешности профиля зуба колеса; p_{z1} – исходное значение осевого хода винтовой режущей кромки червяка; p_{z1t} – текущее значение осевого хода; Δ_p – приращение осевого хода; f_{frfoi} – текущее значение фактической погрешности профиля зуба колеса; ε_p – предельно допустимая абсолютная погрешность расчета осевого хода винтовой режущей кромки червяка. Номинальное значение основных конструктивных параметров червяка можно определить в следующей последовательности.

1. Диаметр посадочного отверстия $d_{отв} = 20 * m_n^{0,373}$, где m_n – модуль зубчатого колеса в нормальном сечении. Рассчитанное значение $d_{отв}$ следует округлить до ближайшего большего из нормального ряда.

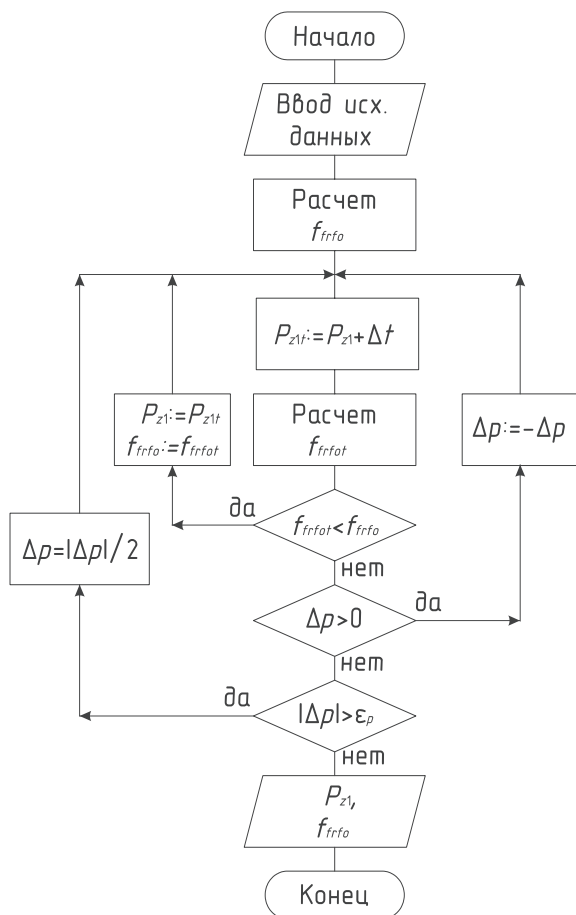


Рис. 2. Блок-схема оптимизационного модуля

2) Диаметр окружности, проходящей по дну витков червяка, $d_{вп} = 1,75d_{отв}$.

3) Полная высота зуба (витка) червяка $h_1 = 2,25m_n + \Delta h_{пер}$, где $\Delta h_{пер}$ – величина переточки червяка по наружной цилиндрической поверхности, $\Delta h_{пер} = 1 \dots 1,5$ мм для $m_n = 4 \dots 6$ мм.

4) Диаметр окружности выступов червяка $d_{a1} = d_{bn} + 2h_1$.

5) Число заходов червяка z_1 не должно иметь общих множителей с числом зубьев обрабатываемого колеса и не должно быть кратным ему.

6) Угол подъема винтовой режущей кромки червяка на окружности выступов

$$\sin \lambda_{a1} = \frac{m_n z_1 \cos \alpha_n}{d_{a1}},$$

где α_n – угол профиля исходного контура зубчатой рейки колеса в нормальном сечении.

7) Осевой ход винтовой режущей кромки

$$p_{z1} = \frac{\pi m_n z_1 \cos \alpha_n}{\cos \lambda_{a1}}.$$

После расчета номинальных значений основных конструктивных параметров червяка в соответствии с разработанной программой, производится их оптимизация на базе результатов измерения погрешности профиля зубьев предварительно обработанных зубчатых колес, как было показано выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юликов, М.И. Система проектирования режущего инструмента [Текст] / М.И. Юликов. –М.: ВЗМИ, 1989.
2. Адгамов, Р. И. Стратегия обеспечения инструментом заводов ОАО «КАМАЗ» [Текст] / Р.И. Адгамов, Р.М. Хисамутдинов // Деловая слава России. –2007. –№. 4–5.
3. Юнусов, Ф.С. Повышение точности производящих поверхностей формообразующих элементов [Текст] / Ф.С. Юнусов, Р.М. Хисамутдинов. –Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева. –2008. –С. 212.
4. Симонова, Л.А. Методология построения интегрированного информационного обеспечения гибких

производственных систем механической обработки на машиностроительных предприятиях: Монография [Текст] / Л.А.Симонова. –СПб.: Инфо-Да, 2004. –С. 198.

5. Сморкалов, Н.В. Численное моделирование поверхностей при обработке резанием [Текст] / Н.В. Сморкалов. –Набережные Челны: Изд-во Камского гос. политехн. ин-та, 2003. –С. 177.

6. Сморкалов, Н.В. Способ чистовой обработки зубьев эвольвентных зубчатых колес [Текст]/ Н.В. Сморкалов, В.П. Скрипин., В.П. Птицин, Ю.Ф. Белугин// Патент РФ № 2005013. –Бюллетень Роспатента 30.12.1993. –№ 47–48.



ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ МЯГКОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ КОДОВ РИДА–СОЛОМОНА

Коды Рида–Соломона широко используются в современных системах хранения и передачи информации. Классические алгоритмы декодирования, используемые в настоящее время, способны исправить $(d-1)/2$ ошибок в метрике Хэмминга, где d – минимальное расстояние кода. Однако они не способны полностью использовать корректирующую способность кодов Рида–Соломона. В частности, для несовершенных кодов исправимы некоторые конфигурации ошибок большего веса. Вместе с тем, декодирование в метрике Хэмминга предполагает принятие жестких решений демодулятором, что сопряжено со значительными потерями информации о принятых сигналах. При использовании мягкого декодирования информация о надежности решений, принятых демодулятором, передается декодеру. Это обуславливает необходимость использования мягкого декодирования в современных системах хранения и передачи информации.

Для декодирования блочных кодов могут применяться как алгебраические, так и комбинаторные алгоритмы. До недавнего времени отсутствовали алгоритмы мягкого декодирования кодов Рида–Соломона, сложность которых является полиномиальной функцией от параметров кода. Такой алгоритм, относящийся к алгебраическим, был предложен Кёттером и Варди в 2003 г. [3]. Однако его корректирующая способность далека от оптимальной. Достаточно давно известен комбинаторный метод Чейза, который в пределе сводится к декодированию по максимуму правдоподобия, но имеет сложность, выражающуюся экспоненциальной функцией от длины кода.

В данной статье рассматривается задача построения алгоритма мягкого декодирования кодов Рида–Соломона с большей корректирующей способностью, чем у известных аналогов. Предлагаемый подход представляет собой комбинацию послыонного алгоритма, предназначенного для эффективной реализации интерполяционного шага метода Кёттера–Варди и метода Чейза.

Коды Рида–Соломона и их мягкое декодирование

Коды Рида–Соломона являются не двоичными линейными кодами, позволяющими исправлять ошибки в блоках данных.

$(n, k, n-k+1)$ код Рида–Соломона над полем F есть множество векторов вида $(f(x_1), \dots, f(x_n))$,

$$f(x) = \sum_{i=0}^{k-1} f_i x^i, \quad f_i \in F, \quad x_i \in F.$$

Из данного определения видно, что точки (x_i, y_i) , где $y_i = f(x_i)$, должны лежать на одной кривой, задаваемой полиномом, степень которого меньше k .

Метод Кёттера–Варди. Исторически первый метод мягкого алгебраического декодирования кодов Рида–Соломона был предложен Кёттером и Варди [3].

Исходными данными для него являются условные вероятности $P\{c_i = a_j | r_i\}$, вычисляемые демодулятором. Здесь c_i – i -й символ кодового слова, r_i – соответствующие ему принятые сигналы, a_j – j -й элемент поля F .

На первом шаге метода Кёттера–Варди вероятности $P\{c_i = a_j | r_i\}$ используются для построения матрицы кратностей корней M , элементами которой являются неотрицательные целые числа M_{ij} . Величина M_{ij} является мерой близости i -го символа принятого вектора к j -му элементу конечного поля. Существуют различные методы построения матрицы кратностей корней; один из простейших задается соотношением $M_{i,j} = \lfloor \lambda \cdot P\{c_i = a_j | r_i\} \rfloor$ [3].

На втором шаге осуществляется интерполяция, т. е. построение полинома, имеющего корни (x_i, y_j) кратности M_{ij} , $i = 0, \dots, n-1, j = 0, \dots, |F|-1$, т. е. $Q^{[j_1, j_2]}(x_i, y_j) = 0, j_1 + j_2 < M_{i,j}$, где $Q^{[j_1, j_2]}(x_i, y_j)$ – производная Хассе порядка (j_1, j_2) в точке (x_i, y_j) . При этом интерполяционный полином $Q(x, y)$ должен иметь минимально возможную $(1, k-1)$ -взвешенную степень.

Третий шаг заключается в факторизации построенного интерполяционного полинома $Q(x, y)$. В результате факторизации находятся все полиномы $p(x)$ с коэффициентами из F со степенью, не

превосходящей $(k-1)$, являющиеся корнями полинома $Q(x, y)$ (то есть $y - p(x)$ делит $Q(x, y)$).

Метод Кёттера–Варди позволяет найти все кодовые слова, удовлетворяющие неравенству $S_M(c) > \Delta_{(1,k-1)}(N)$, где $N = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{|F|-1} \frac{M_{i,j}(M_{i,j} + 1)}{2}$ – общее число уравнений; $\Delta_{(1,k-1)}(N)$ – минимальная $(1, k-1)$ -взвешенная степень многочлена от двух переменных, имеющего N членов; $S_M(c) = \sum_{i=0}^{n-1} M_{i,c_i}$ – вес кодового слова c .

Кодовое слово, являющееся решением задачи декодирования, с большой вероятностью содержится в полученном списке.

Наиболее трудоемкий шаг метода Кёттера–Варди – построение полинома от двух переменных, имеющего корни переменной кратности. Данная задача сводится к решению системы, состоящей из N линейных однородных алгебраических уравнений. Например, для случая $(255, 239)$ -кода и $\lambda = 4$ число уравнений достигает 647 700. Как известно, сложность алгоритма Гаусса растет пропорционально N^3 , что делает его практически неприменимым в данном случае. Однако эта система сильно структурированная, что позволяет построить более быстрые алгоритмы. Один из наиболее эффективных путей решения задачи двумерной интерполяции – послойный интерполяционный алгоритм, описанный в [5].

Послойный интерполяционный алгоритм.

Для реализации интерполяционного шага метода Кёттера–Варди может быть использован послойный интерполяционный алгоритм, являющийся обобщением двоичного интерполяционного алгоритма, предложенного в [8] для случая списочно-го декодирования.

Искомый интерполяционный полином может быть найден в базисе Грёбнера идеала многочленов, имеющих точки (x_i, y_j) корнями кратности $M_{i,j}$ [1, 7]. Идея послойного алгоритма состоит в нахождении этого идеала как произведения идеалов, построенных для подмножеств интерполяционных точек. В основе алгоритма лежит двоичное разложение элементов матрицы кратностей корней. Элементы данной матрицы $M_{i,j}$, $i = 0, \dots, |F|-1$, $j = 0, \dots, |F|$ показывают, какие кратности должен иметь искомый полином в точках (x_i, y_j) . Матрица кратностей корней может быть представлена как $M = \sum_{h=0}^m 2^h M^{(h)}$, где $M^{(h)}$ – матрица, состоящая из $\{0, 1\}$. Назовем множество точек (x_i, y_j) , для которых $M_{i,j}^{(h)} = 1$, h -м слоем L_h . Матрица $M^{(h)}$ мо-

жет быть представлена как $M^{(h)} = \sum_{t=1}^{g_h} M^{(h,t)}$, где каждая строка матрицы $M^{(h,t)}$ содержит не более одного ненулевого элемента. Таким образом, слой L_h разбивается на g_h групп, причем каждая группа $L_{h,t}$ содержит точки (x_i, y_j) с различными x_i . Для каждой группы $L_{h,t}$, $t = 1..g_h$ можно построить идеал $I_{M^{(h,t)}} = \{Q(x, y) \mid Q(x_i, y_j) = 0, (x_i, y_j) \in L_{h,t}\}$. Тогда идеал полиномов, имеющих корни в точках слоя L_h , $I_{M^{(h)}} = \{Q(x, y) \mid Q(x_i, y_j) = 0, (x_i, y_j) \in L_h\}$ может быть получен как $I_{M^{(h)}} = \prod_{t=1}^{g_h} I_{M^{(h,t)}}$.

Идеал многочленов, кратности корней которых соответствуют элементам матрицы M , может быть построен согласно формуле $I_M = (\dots (I_{M^{(m)}} \cdot I_{M^{(m-1)}})^2 \cdot I_{M^{(m-2)}} \dots I_{M^{(1)}})^2 \cdot I_{M^{(0)}}$. Параметры задачи интерполяции позволяют оценить степень r многочлена $Q(x, y)$ относительно переменной y и ограничиться рассмотрением модуля

$$I_{M,p} = \{Q(x, y) = \sum_{j=0}^p q_j(x) y^j \mid Q(x, y) \in I_M\}.$$

Преобразование перекодирования. Преобразование перекодирования основано на замене переменных [6]:

$$z = \frac{y - f(x)}{\varphi(x)},$$

где $\varphi(x) = \prod_{(x_i, y_j) \in A} (x - x_i)$, $f(x)$ – интерполяционный полином, построенный по точкам множества A . Данное множество состоит из k точек (x_i, y_j) с наибольшими кратностями $M_{i,j}$ и различными i .

Такая замена переменных приводит к тому, что искомый интерполяционный полином $Q(x, y)$ всегда содержит некоторый известный заранее множитель $P(x)$. Следовательно, на интерполяционном шаге метода Кёттера–Варди необходимо построить лишь $Q(x, y)/P(x)$, в результате чего размерность задачи двумерной интерполяции существенно снижается. Полином $Q(x, y)/P(x)$ может быть найден в базисе Грёбнера соответствующим образом преобразованного модуля $I_{M,p}$. При построении этого базиса необходимо использовать $(1, -1)$ -взвешенную степень.

Метод Чейза. Метод Чейза является универсальным алгоритмом декодирования линейных блочных кодов. Он состоит в выделении D наименее надежных символов в принятом векторе, переборе возможных их значений и исправлении ошибок в прочих символах с помощью алгебраического декодера. В работе [2] была предложена эффективная реализация этого метода для случая кодов Риды–Соломона, основанная на рассмотре-

нии двух наиболее вероятных значений каждого из D наименее надежных символов и многократном использовании промежуточных результатов жесткого алгебраического декодера.

Предлагаемый подход

Предлагаемый подход представляет собой комбинацию послойного алгоритма, интегрированного с преобразованием перекодирования, и метода Чейза.

Не ограничивая общности, будем считать, что первые D символов принятого вектора являются наименее надежными. Рассматриваемый подход состоит в переборе наиболее вероятных их значений.

Пусть M – матрица кратностей корней, формируемая на первом этапе метода Кёттера–Варди. Построим следующее дерево матриц кратностей корней.

- В корне данного дерева (нулевой уровень) находится матрица кратностей корней $\hat{M}^{(0)}$, которая получается из M путем обнуления кратностей, соответствующих выбранным D x_i .
- Из вершины, находящейся на $(i-1)$ -м уровне, выходит $|V_{i-1}|$ ветвей, где $V_{i-1} = \{(x_i, y_j) | j=0, \dots, |F|-1, M_{i,j} > 0\}$. Каждая ветвь ведет к вершине, которой соответствует своя точка (x_i, y_j) и $\hat{M}^{(i)}$, равная $\hat{M}^{(i-1)}$ за исключением элемента $\hat{M}_{i,j}^{(i)} = M_{i,j}$.
- На листьях дерева (уровень D) находятся матрицы кратностей корней, соответствующие различным пробным векторам.

Для полученных матриц необходимо построить базисы Грёбнера модулей $\{Q(x, y) = \sum_{i=0}^p y^i q_i(x) | Q^{[j_1, j_2]}(x_i, y_j) = 0, j_1 + j_2 < \hat{M}_{i,j}^{(D)}\}$, имеющих корни (x_i, y_j) кратности $\hat{M}_{i,j}^{(D)}$. Для этого будем действовать следующим образом. С помощью послойного алгоритма построим базис модуля для матрицы $\hat{M}^{(0)}$. Базис модуля для матрицы из i -го уровня будем формировать из соответствующего базиса модуля $(i-1)$ -го слоя путем обработки с помощью итеративного интерполяционного алгоритма, описанного в [6]. В результате такой обработки у полиномов модуля появятся требуемый корень (x_i, y_j) кратности $M_{i,j}$. Описанная процедура позволяет многократно использовать промежуточные результаты вычислений, что способствует снижению сложности декодера.

В результате описанных выше действий формируются базисы Грёбнера модулей многочленов, имеющих корни, кратности которых задаются матрицами кратностей корней, расположенными на листьях дерева. Далее должны быть выбраны элементы $Q_i(x, y)$ найденных базисов Грёбнера с наименьшей $(1, k-1)$ -взвешенной степенью, вычислены $p_{i,s}(x)$: $Q_i(x, p_{i,s}(x)) = 0, \deg p_{i,s}(x) < k$ и построены соответствующие им кодовые слова. Решение задачи декодирования выбирается как наиболее вероятное из этих кодовых слов.

Численные результаты

Предложенный алгоритм реализован на языке C++, его эффективность исследована с помощью

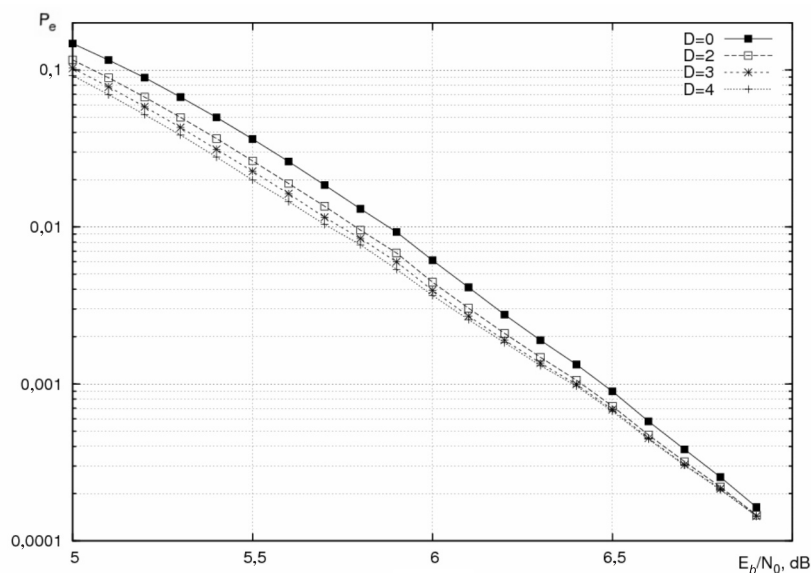


Рис. 1. Качество декодирования (63,55)-кода Рида-Соломона

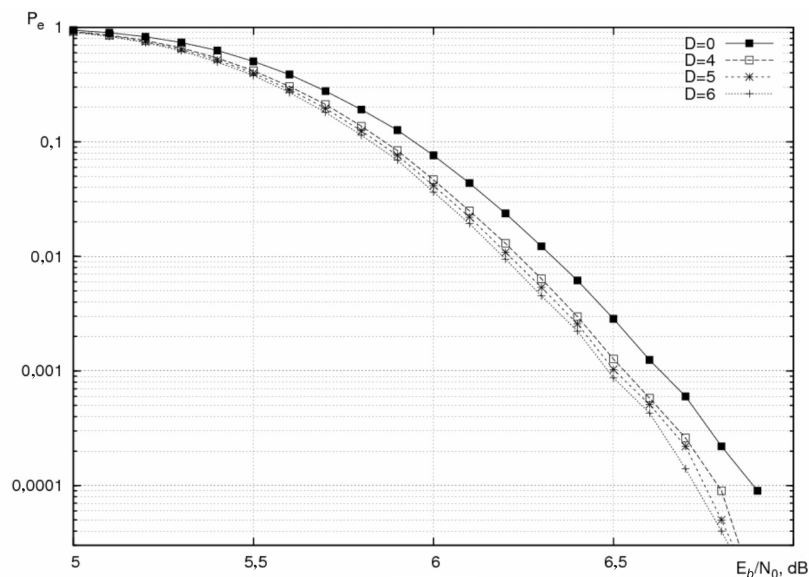


Рис. 2. Качество декодирования (255,239)-кода Рида–Соломона

статистического моделирования. Рассматривалась передача двоичного образа кодов Рида–Соломона через канал с АБГШ с использованием двоичной фазовой модуляции.

На рис. 1 представлен график зависимости вероятности ошибки декодирования от отношения сигнал/шум для (63,55)-кода над $GF(2^8)$. Кривые соответствуют реализации послойного алгоритма для максимальной кратности корней 4 с применением метода Чейза при различных значениях параметра D . На рис. 2 и 3 изображены аналогичные графики для (255,239)-кода и

(511,467)-кода соответственно. Из полученных результатов видно, что увеличение этого параметра приводит к росту корректирующей способности декодера. Необходимо отметить, что в работе [2] было показано, что корректирующая способность метода Чейза в сочетании с декодером, исправляющим $(n - k)/2$ ошибок в метрике Хэмминга, сопоставима с корректирующей способностью метода Кёттера–Варди. На приведенных выше графиках случай $D = 0$ соответствует классическому методу Кёттера–Варди. Таким образом, предлагаемый подход обеспечива-

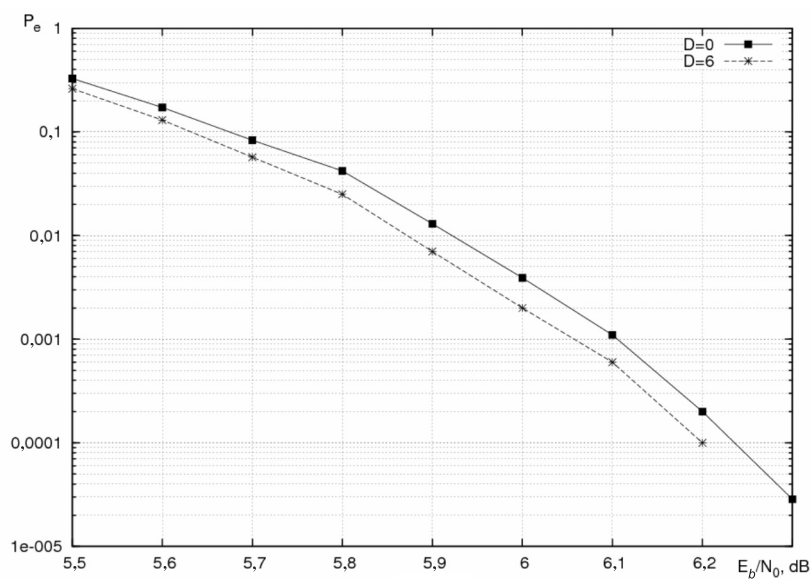


Рис. 3. Качество декодирования (511,467)-кода Рида–Соломона

Время декодирования

E_b/N_0 , дБ	Время, мс					
(n, k)	(63,55)		(255,239)		(511,467)	
D	0	4	0	6	0	6
5	0,8890	1,1378	10,902	17,559	51,324	70,044
5,5	0,7762	0,7966	10,428	15,866	49,296	65,364
6,0	0,5769	0,5345	9,9690	13,703	48,672	59,280
6,5	0,3968	0,3267	9,2301	9,5756	46,488	46,176
7,0	0,2659	0,2158	7,9644	6,3937	45,552	40,872

ет большую корректирующую способность по сравнению с известными аналогами.

Для оценки вычислительной сложности предложенного алгоритма были произведены замеры времени декодирования для различных параметров, результаты которых представлены в таблице.

Видно, что ростом отношения сигнал/шум сложность декодирования снижается, причем, если для малых E_b/N_0 гибридный алгоритм оказывается более трудоемким по сравнению с методом Кёттера–Варди ($D = 0$), то для больших E_b/N_0 ситуация меняется на противоположную. Это объясняется тем, что при малых E_b/N_0 первый этап интерполяции, соответствующий послойному алгоритму, имеет почти одинаковую сложность для гибридного алгоритма и метода Кёттера–Варди, и наблюдаемое различие сложности обусловлено влиянием второго этапа гибридного алгоритма, соответствующего методу Чейза. При больших значениях отношения E_b/N_0 первый этап гибрид-

ного алгоритма сводится к случаю списочного декодирования, что приводит к значительному снижению его сложности. Это обусловлено снижением эффективности послойного интерполяционного алгоритма при наличии большого числа ненулевых элементов в строках матрицы кратностей корней. Такие матрицы часто возникают в ходе работы метода Кёттера–Варди.

В статье представлен алгоритм мягкого декодирования кодов Рида–Соломона, являющийся комбинацией послойного алгоритма, предназначенного для эффективной реализации интерполяционного шага метода Кёттера–Варди и метода Чейза. Показано, что предложенный алгоритм обеспечивает большую корректирующую способность по сравнению с методом Кёттера–Варди, а также имеет меньшую сложность при больших отношениях сигнал/шум.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ МК-1976.2011.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Becker, T.** Groebner Bases. A computational Approach to Commutative Algebra [Текст] / T. Becker, V. Weispfenning. –Springer, 1993. –P. 574.
2. **Bellorado, J.** Low-Complexity Soft-Decoding Algorithms for Reed-Solomon Codes-Part I: An Algebraic Soft-In Hard-Out Chase Decoder [Текст] / J. Bellorado, A. Kavcic // IEEE Trans. on Inf. Theory. –2010. –Vol. 56. –№ 3. –P. 945–959.
3. **Koetter, R.** Algebraic soft-decision decoding of Reed-Solomon codes [Текст] / R. Koetter, A. Vardy // IEEE Trans. on Inf. Theory. –2003. –Vol. 49. –№ 11. –P. 2809–2825.
4. **Koetter, R.** Efficient interpolation and factorization in algebraic soft-decision decoding of Reed-Solomon codes [Текст] / R. Koetter, J. Ma, A. Vardy, A. Ahmed // In Proc. of IEEE International Symp. on Information Theory. –2003. –P. 365.
5. **Miloslavskaya, V.** Fast Interpolation in Algebraic Soft Decision Decoding of Reed-Solomon Codes [Текст] / V. Miloslavskaya, P. Trifonov // In Proc. IEEE R8 International Conf. on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering. –2010. –P. 65–69.
6. **Nielsen, R.R.** Decoding Reed-Solomon codes beyond half the minimum distance [Текст] / R.R. Nielsen, T. Hoholdt // Proc. of the International Conf. on Coding Theory and Cryptography. –Mexico: Springer-Verlag, 1998. –P. 221–236.
7. **Sauer T.** Polynomial interpolation of minimal degree and Grobner bases [Текст] / T. Sauer // Groebner Bases and Applications: Proc. of the International Conf. 33 Years of Groebner Bases. –1998. –Vol. 251. –P. 483–494.
8. **Trifonov P.** Efficient interpolation in the Guruswami-Sudan algorithm [Текст] / P. Trifonov // IEEE Trans. on Inf. Theory. –2010. –Vol. 56. –№ 9. –P.4341–4349.

УДК 61:614.849

А.В. Матвеев, М.В. Иванов, А.Б. Шевченко

АЛГОРИТМ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Одна из важнейших задач государственной политики – обеспечение различных аспектов безопасности граждан [1]. К наиболее значимому фактору угроз безопасности относятся пожары.

Из анализа данных за последние годы следует, что пожарная безопасность как характеристика состояния защищенности населения, объектов национальной экономики и окружающей природной среды от воздействий пожаров в количественном отношении характеризуется некоторым снижением числа пожаров. Однако ежедневные статистические показатели (более 550 пожаров и связанная с ними гибель более 40 человек, травмирование 35 человек, материальные потери более 23 млн руб.) говорят о высоком уровне пожарного риска на территории РФ [2].

Проблема борьбы с пожарами в Российской Федерации приобретает большое экономическое значение, поскольку показатель доли ущерба от пожаров к объему национального ВВП является в России одним из самых высоких в мире.

Повышение уровня пожарной опасности в современных условиях определяет необходимость повышения пожарной безопасности населения, объектов защиты и природных ресурсов.

Под объектами защиты в данном случае понимаются объекты, расположенные на территориях поселений, а также здания, сооружения, строения, к которым установлены или должны быть установлены требования пожарной безопасности для предотвращения пожара и защиты людей при пожаре [3].

Существующая угроза пожарной опасности на объектах защиты вызывает необходимость системного подхода в решении задач своевременного обнаружения и ликвидации очагов возгорания, оповещения и эвакуации людей в случае наступления пожара.

Для обеспечения пожарной безопасности на объектах защиты требуется создание на них эффективных технических условий для выполнения основных требований пожарной безопасности, которые предусматривают проведение профилак-

тических мероприятий и содержание всех систем защиты от пожаров в соответствии с требованиями проектной и технической документации. Для реализации данных целей на объектах защиты создаются системы обеспечения пожарной безопасности (СОПБ). Важнейшая составляющая таких систем – средства оповещения, которые должны обеспечить своевременную передачу информации о возникновении угрозы пожара, выборе наиболее безопасных путей эвакуации в зависимости от реализуемого сценария развития пожара, в т. ч. в направлении ближайшей зоны безопасности здания – специально оборудованного помещения, предназначенного для защиты людей от опасных факторов пожара.

Эффективность функционирования системы обеспечения пожарной безопасности любой сложности в условиях воздействия поражающих факторов, потенциально приводящих к реализации пожара, зависит от ее характеристик и характеристик воздействия поражающих факторов на объект защиты. В общем случае выражение для показателя эффективности СОПБ может быть записано в виде функционала эффективности [4, 5]:

$$\mathcal{E}_{\text{сопб}} = f(P_{\text{пр}}, P_{\text{оп}}, P_{\text{эв}}), \quad (1)$$

где $P_{\text{пр}}$ – показатель эффективности СОПБ по ликвидации очагов возгорания; $P_{\text{оп}}$ – показатель эффективности СОПБ по оповещению о пожарной опасности; $P_{\text{эв}}$ – показатель эффективности СОПБ по эвакуации людей.

Расчет потенциальной опасности и связанная с этим оценка вероятности реализации угроз – наиболее сложная и ответственная часть всего процесса обеспечения пожарной безопасности [8].

Показатель технико-экономической эффективности варианта СОПБ представляет собой величину, выражающую отношение показателя эффективности СОПБ к величине затрачиваемых финансовых ресурсов на ее создание.

Приемлема следующая постановка задачи управления уровнем пожарной безопасности на объекте защиты: обеспечить максимально допу-

стимый уровень пожарной безопасности при имеющихся ресурсах на организацию безопасности. Однако для особо важных объектов, таких, как объекты с массовым пребыванием людей, может ставиться обратная задача – обоснование объема ассигнований на обеспечение требуемого уровня пожарной безопасности [6, 7].

Реализация определенного уровня пожарной безопасности на объектах защиты обеспечивается совокупностью технических средств и организационных мероприятий, каждое из которых обеспечивает определенный уровень показателя эффективности управления пожарной безопасностью P_i при конкретной стоимости этого средства (мероприятия) – C_i^n .

Общая стоимость используемых средств СОПБ определяется по формуле:

$$C = \sum_{i=1}^I C_i^n, \quad (2)$$

где I – суммарное количество технических средств и организационных мероприятий.

Однако такой подход нельзя считать в полной мере корректным. Если показатель эффективности СОПБ напрямую зависит от эффективности составляющих ее элементов и «разовых затрат», то стоимость СОПБ в целом должна включать расходы на установку (монтаж) элементов защиты – $C_i^{уст}$, затраты на регламентное обслуживание (где это требуется) – $C_i^{рег}$, на обучение управляющего и обслуживающего персонала – $C_i^{об}$:

$$C = \sum_{i=1}^I C_i^n + \sum_{i=1}^I C_i^{уст} + \sum_{i=1}^I C_i^{рег} + \sum_{i=1}^I C_i^{об}. \quad (3)$$

Выражение (3) может быть использовано в качестве модели затрат системы обеспечения пожарной безопасности и учета влияния стоимостного показателя на выбор рационального варианта построения СОПБ.

Достоинством предлагаемого подхода является то, что он позволяет экспериментировать с некоторой моделью системы обеспечения пожарной безопасности, чтобы выяснить, какие из альтернативных вариантов защиты более эффективны при финансовых ограничениях и наиболее «дешевы» при обеспечении требуемого уровня пожарной безопасности.

Система обеспечения пожарной безопасности подразумевает наличие технических средств, предназначенных для обнаружения очагов возгорания и средств оповещения.

Поэтому, не нарушая общности рассу-

ждений, рассматривается сущность технико-экономического оценивания вариантов построения СОПБ по обнаружению и оповещению о пожарной опасности, которое заключается в определении показателя эффективности СОПБ ($R_{э/оп}$) по обнаружению и оповещению людей в случае наступления пожара совокупностью однотипных средств обнаружения очагов возгорания и оповещения людей, и сопоставлении величины с их суммарной стоимостью.

Предполагается m вариантов построения СОПБ по обнаружению и оповещению о пожарной опасности. В соответствии с предложенным определением численное значение показателя технико-экономической эффективности определяется по следующей формуле:

$$R_{э/оп}^j = \left[\frac{1 - \prod_{i=1}^{I_{оп}} (1 - p_i)}{C_j / \max\{C_1, C_2, \dots, C_m\}} \right], \quad (4)$$

где $R_{э/оп}^j$ – показатель технико-экономической эффективности j -го варианта СОПБ по обнаружению и оповещению о пожарной опасности, $j = \overline{1, m}$; P_i – вероятность обнаружения очага возгорания и оповещения людей i -м средством; C_j – стоимость j -го варианта СОПБ по обнаружению и оповещению о пожарной опасности, определяется с помощью выражения (3); $I_{оп}$ – количество средств, необходимое для обнаружения очагов возгорания и оповещения людей на объекте защиты.

В качестве демонстрационных возможностей предлагаемого подхода рассматривается пример выбора средств обнаружения очага возгорания системой обеспечения пожарной безопасности на основе показателя «эффективность/стоимость». Результаты расчетов оценок технико-экономической эффективности средств обнаружения очагов возгорания представлены на рис. 1.

Анализ результатов расчетов показывает, что предпочтение в рассматриваемом примере следует отдать средству второго типа (аспирационный датчик) как наиболее эффективному и меньшим составом обеспечивающему равное среди рассматриваемых средств значение показателя «эффективность/стоимость».

Сущность предложенного подхода к оценке влияния выбранных технических средств СОПБ, обеспечивающих решение свойственных задач, на величину показателя эффективности заклю-

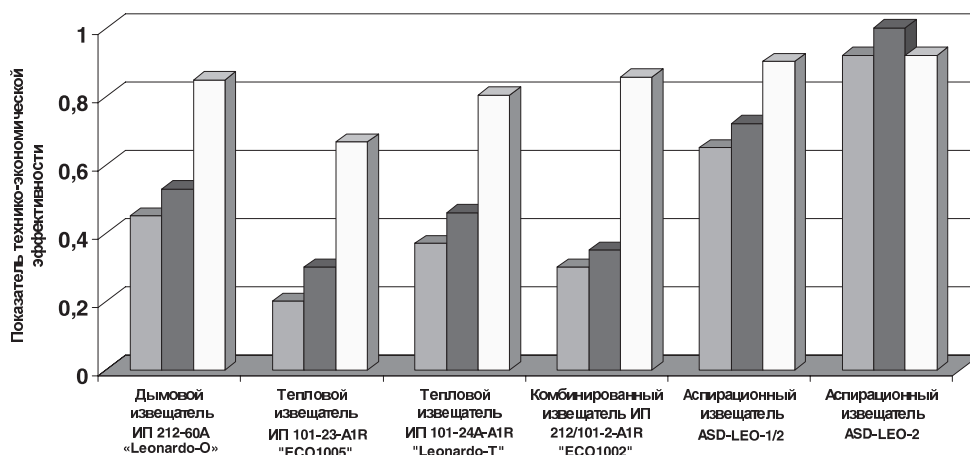


Рис. 1. Результаты технико-экономической оценки системы оповещения
(□) P; (■) C/Cmax; (▨) R

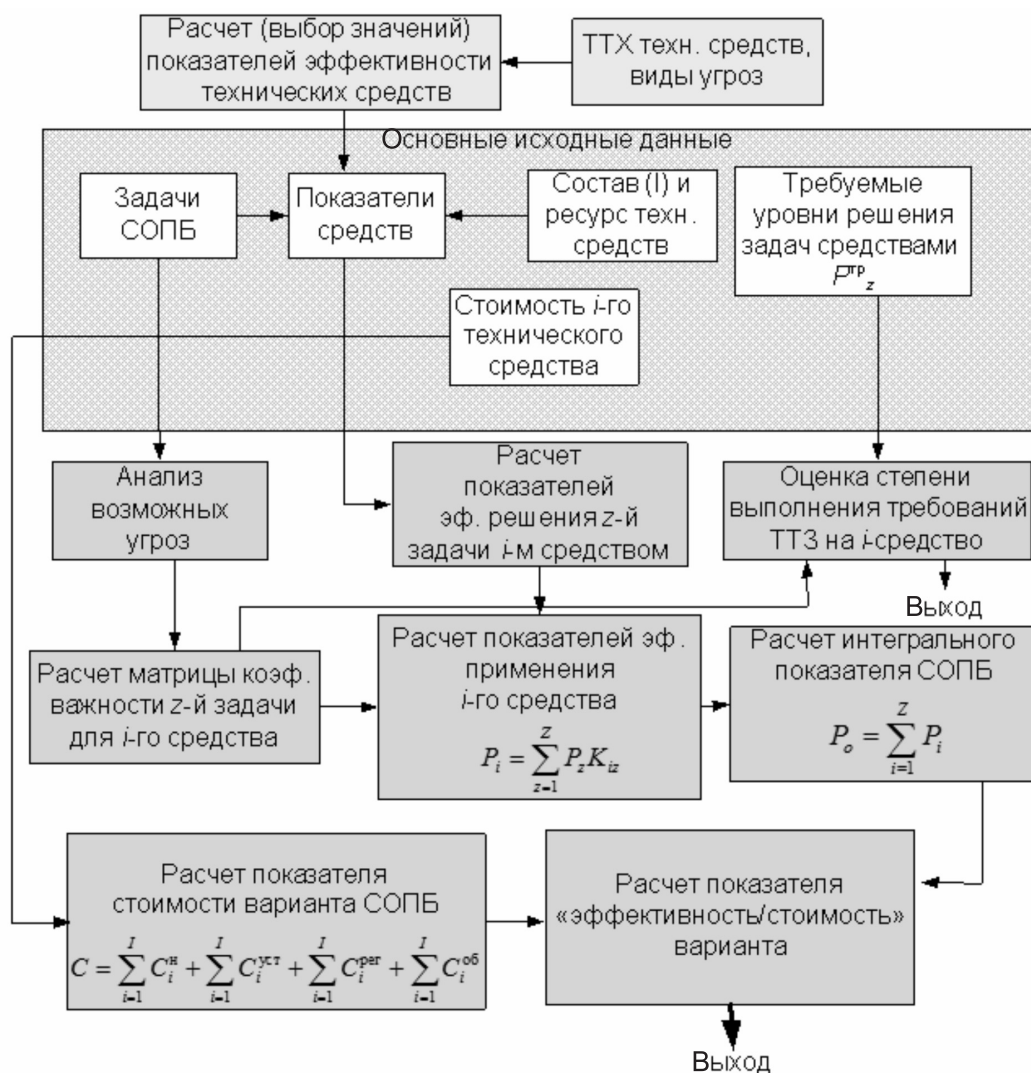


Рис. 2. Блок-схема алгоритма оценки технико-экономической эффективности вариантов построения СОПБ



чается в сравнении интегральных возможностей СОПБ в одинаковых условиях применения.

Выполнение такой оценки возможно с использованием специально разработанного алгоритма оценки.

Упрощенная блок-схема разработанного алгоритма оценки представлена на рис. 2.

В качестве основных исходных данных используются:

численные значения показателей эффективности при решении собственных задач (z) каждым средством (i) – P_{zi} ;

заданные требуемые уровни решения z -й задачи защиты – $P_z^{тр}$;

коэффициенты «важности» z -й задачи защиты для i -го средства – K_{zi} ;

стоимость i -го средства.

Процедура оценивания выполняется последовательным выполнением ряда этапов:

расчет значений показателей эффективности применения каждого i -го средства – P_i с учетом матрицы коэффициентов «важности»;

интегрального показателя СОПБ – P_0 ;

показателя стоимости варианта СОПБ – C ;

расчет показателя технико-экономической эффективности СОПБ.

Результаты расчетов представляются в табличной форме и в виде диаграмм относительных показателей технико-экономической эффективности каждого варианта СОПБ и оценки степени

выполнения требований по каждой задаче обеспечения пожарной безопасности.

Вполне очевидно, что типы и количество используемых средств обеспечения пожарной безопасности зависят от важности объекта, доступности (наличия на рынке услуг) необходимых технических средств и финансовых возможностей.

Существуют различные подходы к определению состава технических средств, используемых в СОПБ, применительно к коммерческим, промышленным и государственным структурам. В основу может быть положен экономический ущерб, при обеспечении безопасности особо важных объектов – показатели уровня повышения эффективности их функционирования. Однако при любом подходе показателем эффективности СОПБ должен служить, как показано, уровень (вероятность) обеспечения пожарной безопасности. Исходя из этого уровня, тем или иным способом обосновывается структура СОПБ, определяется номенклатура и состав используемых технических средств.

Предложенный подход технико-экономического оценивания вариантов построения СОПБ позволяет ранжировать альтернативные варианты построения СОПБ по величине показателя их эффективности и осуществить выбор предпочтительного варианта для конкретного объекта защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 12.05.2009 №537 «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года» [Текст].

2. Пресс-релиз МЧС России «Статистика пожаров в Российской Федерации за 2009 г.» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.mchs.gov.ru>

3. Федеральный закон от 22.07.2008 №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Текст].

4. Брушлинский, Н.Н. Системный анализ и проблемы пожарной безопасности народного хозяйства [Текст] / Н.Н. Брушлинский, В.В. Кафидов, В.И. Козлачков [и др.]. – М.: Стройиздат, 1998.

5. Матвеев, А.В. Аналитическая модель системы управления пожарной безопасностью АЭС [Текст] / А.В. Матвеев, М.В. Иванов, А.Б. Шевченко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Те-

лекоммуникации. Управление. – 2010. – № 6. – С. 91–95.

6. Матвеев, А.В. Обоснование путей обеспечения пожарной безопасности на объектах сферы науки и образования [Текст] / А.В. Матвеев, М.В. Иванов, Ю.А. Тимофеева // Матер. XVII Междунар. науч.-метод. конф. Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке; Т. 3. Национальная безопасность. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С.71–75.

7. Матвеев, А.В. Основы теории анализа и управления риском в чрезвычайных ситуациях [Текст] / А.В. Матвеев, В.Г. Бурлов, В.В. Матвеев, В.В. Потапов. – СПб.: НПО «Стратегия будущего», 2003.

8. Холщевников, В.В. Проблемы оценки безопасности людей при пожаре в уникальных зданиях и сооружениях [Текст] / В.В. Холщевников // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – № 4. – С.21–27.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РЕЖИМА ПОСАДКИ МОРСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Ключевой проблемой для морских летательных аппаратов (ЛА) является взлет и посадка при интенсивном морском волнении. В идеале транспортное средство должно быть всепогодным, однако и экранопланы, и гидросамолеты не могут эксплуатироваться при штормовой погоде, когда ветровое морское волнение имеет большую балльность. Чем больше размеры, прочность и энерговооруженность ЛА, тем выше граница разрешенных режимов полета (балльности морского волнения) для взлета и посадки в неспокойном море. Однако слишком большие размеры аппарата не только увеличивают его стоимость, но и часто не соответствуют имеющимся грузопотокам на большинстве реальных грузопассажирских линий. Поэтому очень важно максимизировать возможность взлета и посадки малых и средних аппаратов при морском волнении.

Эффективным способом решения этой проблемы является оптимизация направления захода на посадку по отношению к генеральному направлению распространения морских волн. При этом генеральное направление может определяться автоматически путем обработки показаний бортовых датчиков. В этом случае реализация оптимального режима захода на посадку и сама посадка требуют использования результатов численного анализа характеристик волновых возмущений.

Посадка морского ЛА на взволнованную морскую поверхность отличается от приземления обычного самолета на бетонную взлетно-посадочную полосу. Пилот или автоматическая система управления может выбрать любое направление посадки, поскольку область для возможной посадки не ограничена полосой и может принадлежать любому подходящему «квадрату» в открытом море недалеко от места назначения. Естественно, направление вектора ветра должно быть принято во внимание при выборе направления захода на посадку.

Посадка против ветра позволяет снизить посадочную скорость относительно поверхности.

При ветровых морских волнах генеральное направление совпадает с направлением ветра, т. е. аэродинамически целесообразно приземлиться по направлению, обратному генеральному направлению распространения морских волн. Но при сильном ветре, когда волны существенны, посадка против ветра дает существенные волновые нагрузки, поскольку ЛА сталкивается с гребнями морских волн, которым соответствуют максимальные отклонения водной поверхности от невозмущенного уровня. Поэтому в соответствии с гидродинамикой это направление исключительно невыгодно из-за высокой частоты встреч с морскими волнами и максимальной крутизны волн, в связи с чем вероятность аварийной посадки транспортного средства из-за чрезмерной нагрузки является большой.

Гидродинамически лучше производить посадку перпендикулярно генеральному направлению распространения морских волн. Посадка перпендикулярно ветру не может обеспечить минимальную скорость относительно поверхности, но уклон морских волн в этом направлении может быть умеренным, и гидродинамическое торможение будет не столь тяжелым. Именно поэтому оптимизация направления посадки – очень важная задача, и управление движением при посадке должно выполняться на основании обработки текущей информации об особенностях возмущения морской поверхности. Профиль и интегральные характеристики морских волн могут быть оценены вместе с параметрами полета морского ЛА [1].

Посадка морского ЛА в условиях интенсивного морского волнения должна соответствовать требованию минимизации механических нагрузок при гидродинамическом торможении. Ключевым фактором является автоматизация выбора направления захода на посадку по отношению к генеральному направлению распространения морских волн, экстремизирующего указанный критерий. После рассмотрения нескольких вариантов формального критерия наиболее удачным

был признан предложенный автором достаточно простой критерий «мягкости» посадки в виде среднеквадратического значения вертикальной скорости погружения днища ЛА в воду σ_{V_B} , выражаемого формулой $\sigma_{V_B} = V \sigma_a$, где V – посадочная путевая скорость, σ_a – среднеквадратическое значение уклона волновой поверхности вдоль траектории посадки.

При выводе расчетного выражения для критерия σ_{V_B} необходима достаточно адекватная математическая модель полностью развитого трехмерного ветрового морского волнения, поскольку именно этот общий случай морского волнения представляет наибольший интерес и позволяет сделать наиболее широкие обобщения. Были использованы формулы для энергетического спектра морского волнения по Нейману и по Пирсону–Мошковицу и формула для среднеквадратического значения уклона волновой поверхности вдоль траектории посадки [2–7].

Результирующая расчетная формула имеет вид:

$$\sigma_{V_B} = (V_l - v \cos \psi) \times \sqrt{\int_0^\infty \left(\int_0^{\pi/2} (\cos^2 \psi \cos^4 \chi P(\chi, k) d\chi + \sin^2 \psi \cos^2 \chi \sin^2 \chi P(\chi, k)) d\chi \right) dk},$$

где для спектров Неймана и Пирсона–Мошковица, соответственно,

$$P(\chi, k) = \frac{1,03 \cdot 10^{-2}}{k} \exp \left[-\frac{0,112 \cos^2 \chi}{(k(3,95_{M^0 C^{-5/2}})(v/g)^{5/2})^2} \right]$$

$$\text{и } P(\chi, k) = \frac{1,03 \cdot 10^{-2}}{k} \exp \left[-\frac{0,112 \cos^2 \chi}{(k(0,391)(v^2/g))^2} \right].$$

Здесь k – пространственная частота; v – скорость ветра; ψ – угол по отношению к направлению ветра; V_l – воздушная скорость.

Используя данную формулу можно построить графики рис. 1 и 2.

На основании графиков можно исследовать зависимость показателя «мягкости» посадки от многих факторов, прежде всего – от направления захода на посадку по отношению к направлению ветра, совпадающему с генеральным направлением распространения морских волн. При умеренном волнении, соответствующем скорости ветра 2–10 м/с, наиболее благоприятна траектория посадки при $\psi = 90^\circ$. При более развитом ветровом волнении, соответствующем скорости ветра 10–14 м/с, все направления в интервале 0° – 90° пригодны для совершения посадки, которая происходит при незначительных механических нагрузках. В штормовом море, соответствующем скорости ветра 14 м/с и выше, ситуация резко меняется, и наиболее благоприятная траектория посадки будет против ветра ($\psi = 0$). Разница в нагрузках при благоприятном и неблагоприятном направлениях посадки может превышать один порядок. Нагруз-

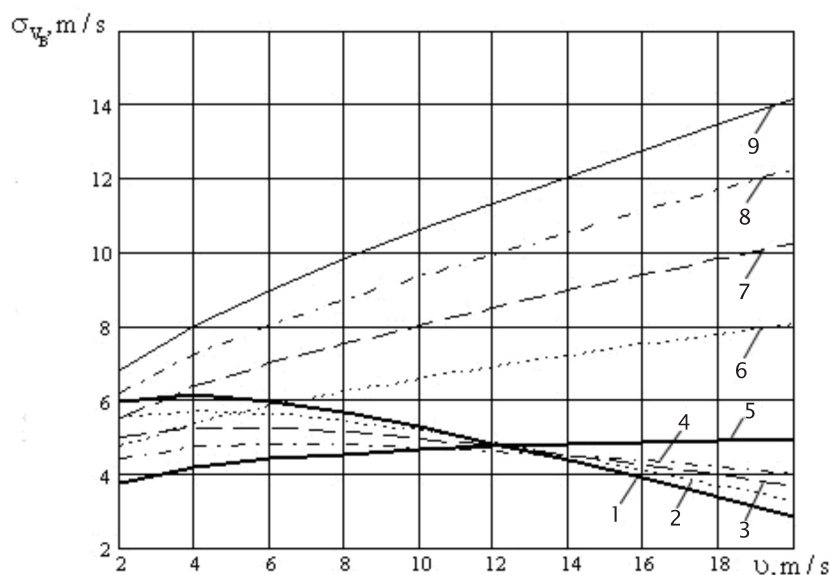


Рис. 1. Критерий σ_{V_B} для спектра Неймана при разных углах посадки:
1 – $\psi = 0^\circ$; 2 – $\psi = 30^\circ$; 3 – $\psi = 45^\circ$; 4 – $\psi = 60^\circ$; 5 – $\psi = 90^\circ$; 6 – $\psi = 120^\circ$;
7 – $\psi = 135^\circ$; 8 – $\psi = 150^\circ$; 9 – $\psi = 180^\circ$

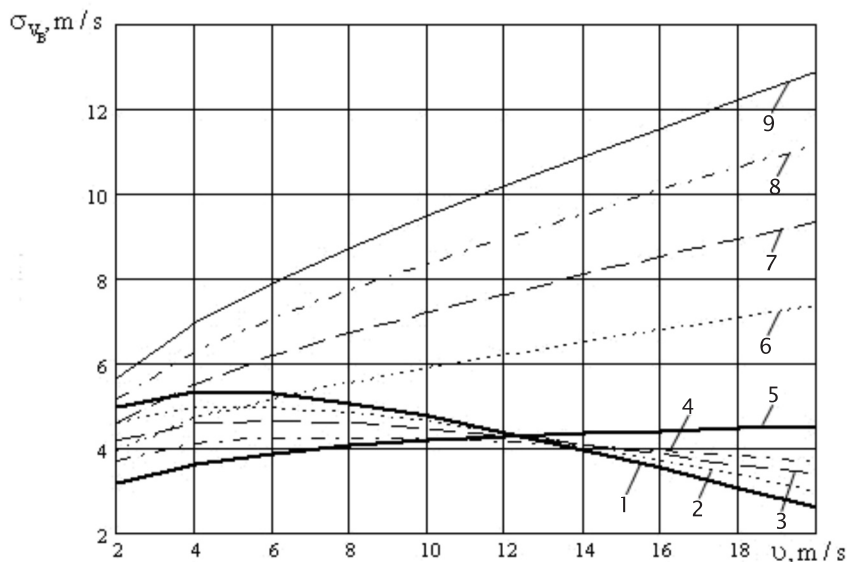


Рис. 2. Критерий $\sigma_{\text{в}}$ для спектра Пирсона–Мошковица при разных углах посадки:
1 – $\psi = 0^\circ$; 2 – $\psi = 30^\circ$; 3 – $\psi = 45^\circ$; 4 – $\psi = 60^\circ$; 5 – $\psi = 90^\circ$; 6 – $\psi = 120^\circ$;
7 – $\psi = 135^\circ$; 8 – $\psi = 150^\circ$; 9 – $\psi = 180^\circ$

ки при посадке снижаются примерно в два раза в случае выбора направления ψ равным 0° или 30° по сравнению со случаем 90° . При любой скорости ветра самое неблагоприятное направление – это 180° . Любое направление между 90° и 180° считается нежелательным из-за относительно больших механических нагрузок, приложенных к корпусу ЛА. Интересно, что направление $\psi = 60^\circ$ примерно одинаково благоприятно для любых скоростей ветра. Разница в нагрузках при благоприятном и неблагоприятном направлениях посадки может превышать один порядок.

Для реализации рекомендаций в отношении выбора направления посадки морского ЛА желательно иметь на борту комплекс приборных средств для определения интенсивности морского волнения (высоты морских волн) и генерального направления распространения морских волн. В последнее время в связи с быстрым совершенствованием цифровых фотокамер появилась возможность использования наиболее простого способа определения характеристик морской поверхности, заключающегося в обработке фотоизображений водной поверхности. Конечно, в условиях штилевого моря информативность даже высококачественного изображения водной поверхности невелика, но при этом не стоит проблема оптимизации захода на посадку. Указанная проблема возникает лишь при существенном морском волнении, когда структуру морских волн легко

проанализировать по фотографиям. Необходимо также учитывать некоторые другие сложности, которые могут возникнуть при фотографировании водной поверхности, такие, как солнечные блики, затуманенность, малая освещенность при ночной съемке и т. п.

При рассмотрении волновой поверхности как трехмерного случайного поля, анизотропного по направлению, генеральное направление может быть определено как такое, вдоль которого интервал пространственной корреляции между возвышениями волновой поверхности минимален. Соответственно, в перпендикулярном направлении интервал корреляции должен быть максимален.

Вместо определения интервала корреляции фактически можно подсчитывать число переходов n_0 черное-белое вдоль разных направлений при анализе черно-белого изображения взволнованной поверхности. Это число должно быть пропорционально среднеквадратической частоте пространственного спектра волновой поверхности $k_{\text{ср}}$ и, следовательно, обратно пропорционально интервалу пространственной корреляции. Для нормального случайного поля, которым являются возвышения волновой поверхности, величина n_0 при рассмотрении особенностей изображения волновой поверхности вдоль определенного направления выражается формулой:

$$n_0 = \frac{k_{ck}}{\pi} \exp\left(-\frac{C_0^2}{2D_\xi}\right),$$

где D_ξ – дисперсия волновой ординаты, а уровень C_0 зависит от адаптируемой контрастности изображения.

В общем виде алгоритм определения генерального направления распространения морских волн может быть реализован в форме следующей последовательности операций.

1. На входе получаем изображение морской поверхности, это может быть картинка в различных форматах (BMP, JPG, PNG, ...).

2. Превращаем входную картинку в битовый массив в цветовом пространстве RGB, где каждому пикселю соответствуют три байтовых значения.

3. Переходим от формата изображения RGB к формату YUV (цвет представляется как три компоненты – яркость Y и две цветоразностных – U и V); это делается с учетом того, что впоследствии предполагается перейти к одноканальному изображению. Переход осуществляется по формуле [8]:

$$\begin{aligned} Y &= 0,299 \times R + 0,587 \times G + 0,114 \times B, \\ U &= -0,14713 \times R - 0,28886 \times G + 0,436 \times B, \\ V &= 0,615 \times R - 0,51499 \times G - 0,10001 \times B. \end{aligned}$$

4. Отбрасываем цветовые компоненты, оставляя только массив Y .

5. Устанавливаем некий порог яркости и осуществляем переход к ч/б изображению. Возможны несколько вариантов выбора этого порога. Во-первых, пороговое значение может быть определено как среднее арифметическое значений яркости всех точек изображения. Во-вторых, находится минимум и максимум яркости на конкретной фотографии, и их средняя величина признается пороговой. Фактический интервал яркости полезно растянуть до максимально возможного интервала в 256 градаций путем масштабирования с плавающим адаптивным масштабным коэффициентом. При этом повышается качество ч/б изображения, что важно для последующей обработки. Превращаем изображение в битовый массив (только белые и черные пиксели без градаций)

6. Используя алгоритм Брезенхейма [8], строим прямые под нужным углом и, двигаясь вдоль

них, считаем количество переходов ч/б. При этом переходом считается такая комбинация пикселей, когда последовательно было не менее n пикселей одного цвета и далее не менее n пикселей. Значение n нужно выбрать такое, чтобы реакция алгоритма на шум была минимальной.

Значение n определялось следующим образом. Для одиннадцати значений n от нуля до десяти было смоделировано по 100 изображений морской поверхности с заведомо известным генеральным направлением распространения морских волн. Затем, с помощью данного алгоритма находилось генеральное направление распространения морских волн и его отклонение от истинного значения. Полученные данные приведены в таблице, из которой можно сделать вывод, что наиболее приемлемые значения, были получены при n равном четырем.

7. Изображение пошагово (шаг выбирается в зависимости от необходимой точности и быстродействия бортового компьютера, например, в 1°) поворачиваем для определения направления с максимальным числом ч/б переходов на отрезке выбранной длины. Определенное направление признается генеральным.

Посадочный режим должен включать следующие операции.

1. Автоматическая оценка генерального направления распространения морских волн в соответствии с разработанным алгоритмом, описанным выше. Собственно обработка каждого цифрового изображения может занимать только несколько секунд, но оптимальный период фотосъемки (временной интервал между соседними фотоизображениями) должен зависеть от скорости и высоты полета ЛА и балльности морского волнения. Оптимальный период должен быть настолько большим, чтобы корреляция между нерегулярными морскими волнами на двух соседних изображениях практически отсутствовала. На практике этот период может составлять порядка 3–5 с. При скорости порядка 150 м/с и интенсивности морского волнения 5 баллов за это время ЛА пролетит расстояние в 10–20 средних длин волн. При таких дистанциях значение пространственной корреляционной функции опускается практически до нуля. Для до-

Определение значения n

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta\psi$ ср	22	15	9	7	6	8	10	10	20	31	39

стоверной оценки генерального направления распространения морских волн требуется обработка порядка десяти фотоизображений, что в общей сложности занимает 30–50 с.

2. *Автоматическая выработка рекомендаций об оптимальном направлении захода на посадку* на основе результатов обработки по п. 1 с учетом оценок других характеристик морского волнения (в основном – интенсивности) и результатов исследования, изложенных выше. Указанная обработка может занимать порядка 3 с.

3. *Выполнение захода на посадку* с соответствующим изменением направления движения по отношению к генеральному направлению распространения морских волн.

4. *Выполнение посадки.*

Таким образом при оценке времени, необходимого для выполнения процедуры выбора оптимального направления захода на посадку и выполнения собственно посадки, можно рассматривать следующие этапы с различной длительностью. Получение десяти или более независимых (некоррелированных) фотографий морской поверхности займет порядка 30–50 с, собственно принятие решения об оптимальном выборе направления захода на посадку зависит от быстродействия бортового компьютера и может составлять порядка 3 с. Наибольшее время может занять изменение курса ЛА с целью захода на посадку в оптимальном направлении. Для верхней оценки этого времени можно рассмотреть разворот ЛА на 180°. Если нужно повернуть на меньший угол, это займет меньше времени. При определении этого времени можно учесть такую характеристику ЛА, как минимальный радиус разворота. Для из-

вестного экраноплана «Орленок» минимальный радиус разворота без крена (только за счет руля направления) составляет порядка 10 км, при скорости движения $V = 150$ м/с половина окружности будет пройдена за время $\pi R/V = 200$ с. В итоге полный цикл подготовки ЛА к посадке можно оценить примерно в 4 мин (наихудший вариант).

Проанализирован фактор влияния на безаварийность посадки. Основным фактором, который необходимо учитывать, является направление посадки по отношению к генеральному направлению распространения морских волн. Оценка этого направления позволит решить проблему минимизации волновых возмущений, направленных на корпус ЛА. Выбран критерий оптимизации захода на посадку, в качестве которого принято среднеквадратическое значение вертикальной скорости погружения нижней части корпуса ЛА в воду. Для критерия была получена расчетная формула. Рассчитаны значения критерия при разных направлениях посадки по отношению к направлению ветра, при заданной посадочной скорости и при различных скоростях ветра. Откуда следует, что оптимальное направление посадки зависит от скорости ветра, которая для полностью развитого ветрового морского волнения определяет все его характеристики.

В результате проведенных исследований разработан алгоритм оценки посадочного режима морского ЛА с целью обеспечения безаварийной посадки в условиях штормового моря. Реализация разработанного алгоритма позволяет повысить характеристики всепогодности морских летательных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков, Г. Основы гидроавиации [Текст] / Г. Волков. –М.: Военное изд. НКО СССР, 1940. –248 с.
2. Nebylov, A.V. Ekranoplane – Controlled Flight close to Surface [Текст] / A.V. Nebylov, P. Wilson. –UK, Southampton, WIT-Press, 2002. –220 p.
3. Ambrosovsky, V.M. Flight Parameters Monitoring System for Small WIG-Craft [Текст] / V.M. Ambrosovsky, A.V. Nebylov // III International Conf. on Ground-Effect Machines: The RSME, Russian Branch. –SPb, 2000. –P. 15–25.
4. Nebylov, A.V. Structural Optimization of Motion Control System Close to the Rough Sea [Текст] / A.V. Nebylov XXIII IFAC World Congress. –San Francisco, 1996. –Vol.Q. –P. 375–380.
5. Nebylov, A.V. Sea wave parameters, small altitudes and distances measurers design for motion control systems [Текст] / A.V. Nebylov [et al.] // AGARD-NATO CP-556, Dual Usage of Military and Commercial Technology on Guidance and Control. –Neuilly-sur-Seine, France, 1995. –P. 201–212.
6. Nebylov, A.V. WIG-craft Marine landing control at rough sea [Текст] / A.V. Nebylov, V.A. Nebylov, A.I. Panferov [et al.] // XXVII IFAC Symp. on Automatic Control in Aerospace. –Toulouse, 2007.
7. Nebylov, A.V. Seaplane Landing Control at Wave Disturbances. Automatic control in aerospace [Электронный ресурс] / A.V. Nebylov, V. A. Nebylov, A.I. Panferov [et al.]. –2008. –№ 2. –6 p.
8. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес. –М.: Техносфера, 2005. –1072 с.

УДК 545.81, 623.459.44

С.В. Дёмин, В.Д. Купцов, В.П. Валухов, В.Я. Кателевский

ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ НА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЯДРАХ КОНДЕНСАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОТРАВЛЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Газоанализаторы, основанные на детектировании молекулярных ядер конденсации (МоЯК), обладают наивысшей чувствительностью к определенным классам детектируемых веществ, в т. ч. к отравляющим веществам иприту и люизиту. Суть метода МоЯК состоит в ряде физико-химических воздействий (химические реакции, облучение, нагревание, охлаждение) на поток газа-носителя, содержащего детектируемые вещества. Результатом этих воздействий является образование достаточно крупных аэрозольных частиц, светорассеяние которых пропорционально концентрации детектируемого вещества [1]. Осуществление ука-

занных воздействий, прием и обработка сигнала светорассеяния требуют создания специального программно-аппаратного блока.

Цель настоящей работы – исследование и разработка программно-аппаратного блока управления, регистрации и обработки информации, включающего высокочувствительный фотометр для измерения фототока светорассеяния аэрозольными частицами на основе интегратора, для газоанализаторов отравляющих веществ иприта и люизита.

Функциональная схема автоматического управления параметрами и режимами блоков в га-

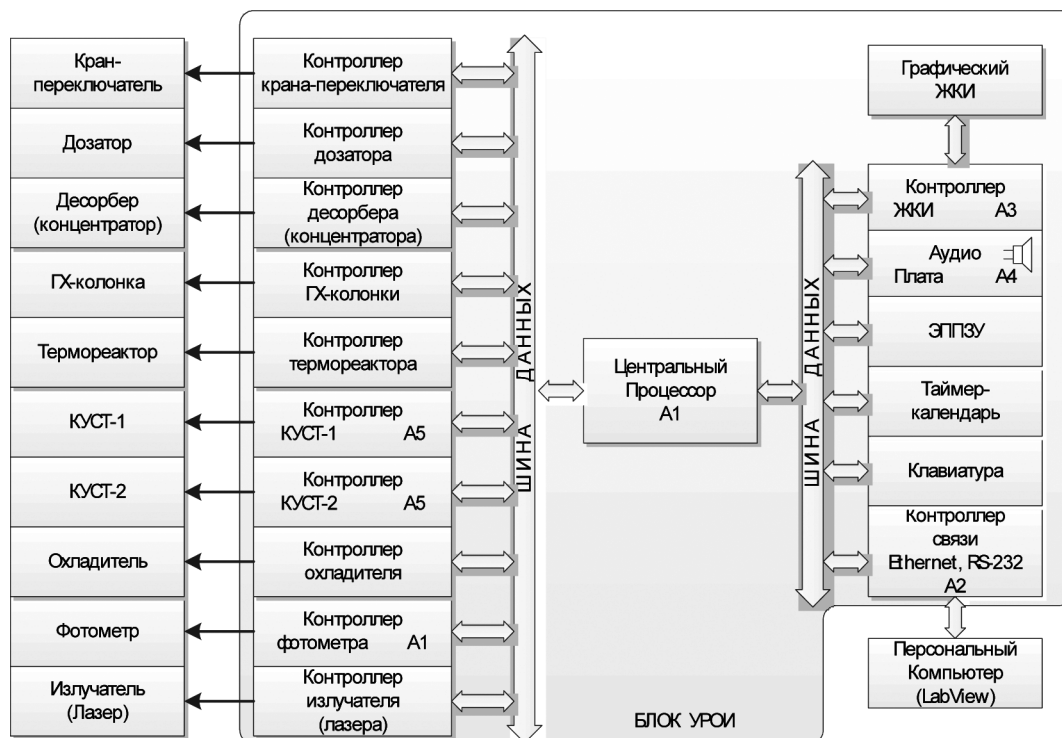


Рис. 1. Автоматическое управление в газоанализаторе

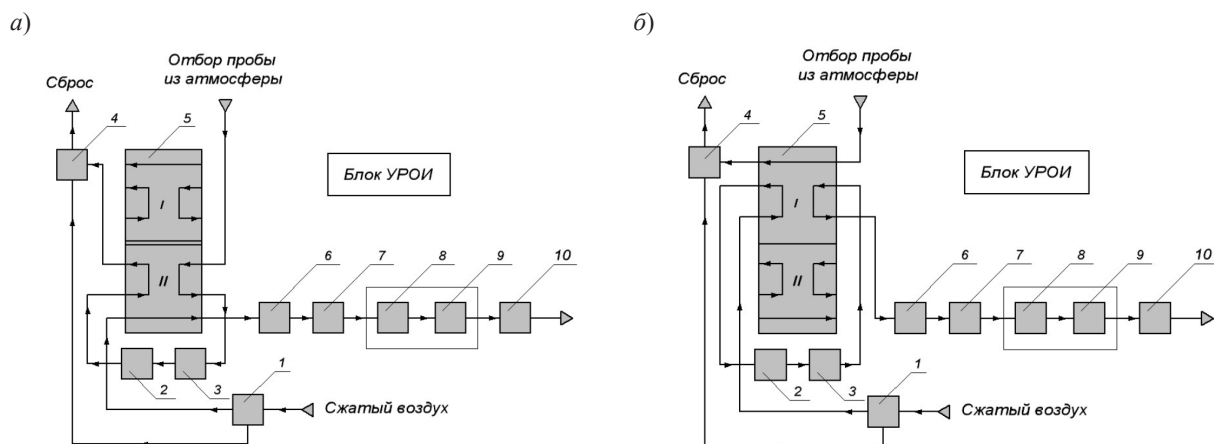


Рис. 2. Функциональная схема газоанализатора иприта:

а – Режим «отбора пробы» (положение кран-перек­лю­чателя II); б – Режим «анализа пробы» (положение кран-перек­лю­чателя I)
1 – блок подготовки газа-носителя (воздуха); 2 – диффузионный дозатор микроконцентрации иприта; 3 – концентратор;
4 – эжектор; 5 – кран-перек­лю­чатель потоков; 6 – газохроматографическая колонка; 7 – термореактор; 8 – проявляющее конденсационное устройство; 9 – укрупняющее конденсационное устройство; 10 – фотоэлектрический аэрозольный нефелометр

зоанализаторе, реализуемого блоком управления, регистрации и обработки информации (УРОИ), представлена на рис. 1.

Программно-аппаратный блок УРОИ управляет конденсационными устройствами, охладителем, ГХ-колонкой, термореактором, краном-перек­лю­чателем, дозатором, фотометром, устройством пробоотбора и десорбции, осветителем; контролирует основные параметры ГА. Блок УРОИ измеряет темновой ток фотоприемного устройства, фототок светорассеяния от фона спонтанного ядрообразования и фототок светорассеяния аэрозольными частицами в нефелометре, автоматически вычисляет измеряемую концентрацию иприта (люизита), в случае превышения ПДК_{р.з.} выдает звуковой и световой сигнал, управляет отображением информации и клавиатурой, с помощью которой задаются режимы работы прибора. Блок УРОИ осуществляет передачу данных на персональный компьютер по локальной сети Ethernet и протоколу RS-232. На персональном компьютере реализован экран­ный интерфейс для установки и контроля режимов, температур, параметров блоков газоанализатора и вывода на график фототока светорассеяния аэрозольными частицами.

Блок УРОИ задает в соответствии с алгоритмом работы газоанализатора два основных режима: «отбора пробы» (рис. 2 а) и «анализа пробы» (рис. 2 б) [2].

В режиме «отбора пробы» поток анализируемого воздуха проходит концентратор (3), где детектируемые примеси накапливаются, и покидает газоанализатор через эжектор (4). В режиме «анализа пробы» поток анализируемого воздуха сразу выводится из газоанализатора через эжектор (4), а блок УРОИ формирует импульс тока, быстро разогревающий концентратор до 500 °С, в результате чего осуществляется десорбция накопленной в концентраторе в режиме «отбора пробы» дозы отравляющего вещества. Десорбированная доза подхватывается газом-носителем (сжатый воздух) и последовательно проходит газохроматографическую колонку (6), термореактор (7), проявляющее (8) и укрупняющее (9) конденсационные устройства. Блок УРОИ задает температуры перечисленных устройств в диапазонах: 37–39 °С в газохроматографической колонке, 600–700 °С в термореакторе, 98–103 °С в испарителях конденсационных устройств, 15–20 °С в холодильнике конденсационного устройства и поддерживает заданные значения с отклонением менее 1 % в течение всего времени работы прибора. В результате молекулы отравляющего вещества образуют молекулами проявляющего (триэтаноламин) и укрупняющего (диизобутилфталат) веществ и преобразуются в частицы монодисперсного аэрозоля размером ~0,25 мкм.

Поток аэрозольных частиц поступает в нефелометрический фотометр (10), в котором происходит рассеяние света аэрозольными частицами. Конструкция фотометра представлена в [3].

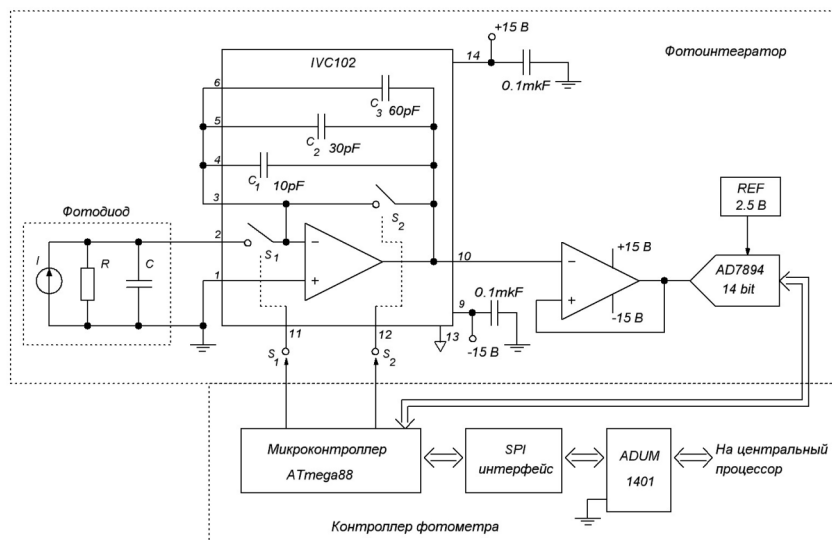


Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема фотоинтегратора с контроллером фотометра

В качестве облучающего источника света используется лазер с излучением в красной области видимого спектра. Светорассеяние в фотометре определяется размером аэрозольных частиц и спектральной характеристикой облучающего оптического излучателя. Поскольку размер аэрозольных частиц соизмерим с длиной волны оптического излучения, расчет мощности рассеянного поля, принимаемого фотоприемным устройством, проводится на основании теории Ми [4].

Для обеспечения высокой чувствительности по фототоку светорассеяния в фотометре применено фотоприемное устройство на основе интегратора входного тока (микросхема IVC102). Упрощенная принципиальная схема фотоинтегратора с контроллером приведена на рис. 3, временные рабочие диаграммы – на рис. 4.

Выходной сигнал интегратора определяется выражением $U_{OUT} = -\frac{1}{C_{INT}} \int I_{INT}(t) dt$. Для случая медленно меняющегося фототока за время интегрирования выражение для выходного напряжения упрощается $U_{OUT} = -\frac{I_{INT} \cdot T_{INT}}{C_{INT}}$. Контроллер, выполненный на основе микропроцессора ATmega88, формирует сигналы управления ключами S_1 и S_2 , принимает цифровой код фототока с АЦП и передает его по шине SPI на центральный процессор.

При малых концентрациях детектируемых веществ в пробе (рис. 4 а), соответствующих малым уровням рассеянной оптической мощности в не-

фелометре, за время измерения $T_{INT} = 1$ с выходной сигнал фотоинтегратора изменяется от нуля до уровня $\pm U_{OUT_MAX}$. Частота оцифровки фототока в АЦП установлена 100 кГц, соответственно, за время 1 с осуществляется 10^5 цифровых отсчетов. При поступлении в процессор цифрового кода, соответствующего $\pm U_{OUT_MAX}$, процессор сбрасывает фотоинтегратор в начальное (нулевое) состояние. Для больших значений концентраций в пробе (рис. 4 б), соответствующих значительным уровням рассеянной оптической мощности в нефелометре, цифровой код АЦП, соответствующий $\pm U_{OUT_MAX}$, формируется за время, значительно меньшее 1 с. Верхняя граница динамического диапазона измеряемого фототока соответствует минимальной длительности интегрирования $T_{INT} = 100$ мкс. За это время формируется всего $5 \div 6$ отсчетов, но зато количество измерений за 1 с достигнет значения 10^4 . Центральный процессор при получении каждого отсчета определяет тангенс угла наклона зависимости фототока от времени и рассчитывает фототок в соответствии с выражением $I_{IN} = -\frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta T_d} \cdot C_{INT}$, где ΔT_d – интервал дискретизации по времени, равный 10 мкс, ΔU_{OUT} – приращение выходного напряжения за один интервал дискретизации. Применение метода наименьших квадратов и определение накапливаемых сумм после каждого измерения позволяет существенно увеличить точность измерения. Максимальное значение измеряемого фототока определяется приращением выходного напряжения на

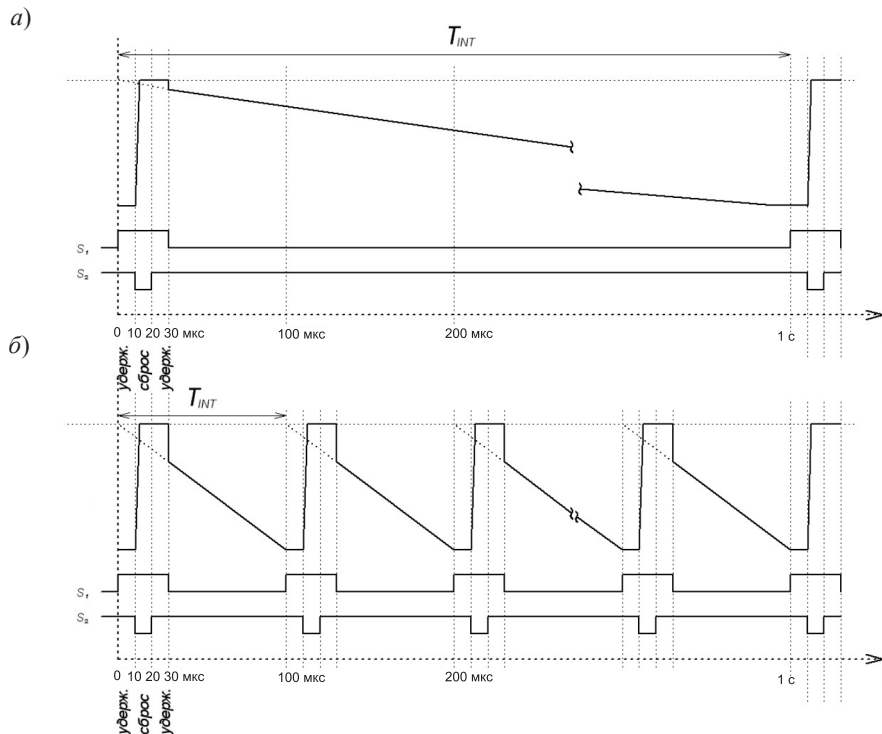


Рис. 4. Временные диаграммы фотоинтегратора

величину U_{OUT_MAX} за время 100 мкс и составляет
 $I_{IN_MAX} = -\frac{10 \text{ В}}{100 \text{ мкс}} \cdot 100 \text{ пф} = -10 \text{ нА}$. Минимальное значение измеряемого фототока определяется как приращение выходного напряжения в один уровень квантования АЦП за время 1 с и составляет $I_{IN_MIN} = -\frac{10 \text{ В}}{2^{N-1} \cdot 1 \text{ с}} \cdot 100 \text{ пф} \approx -60 \text{ фА}$,
 где N – разрядность АЦП, равная четырнадцати. Таким образом, динамический диапазон фотоинтегратора равен $D = \frac{I_{IN_MAX}}{I_{IN_MIN}} \approx 160 \cdot 10^6 \approx 160 \text{ дБ}$.

Устройство блока УРОИ и принцип его работы

На плате центрального процессора помимо центрального процессора А1 располагаются еще четыре микропроцессора А2÷А5 (см. рис. 1), обеспечивающих следующие функции: связь с удаленным компьютером по локальной сети Ethernet и каналу RS-232; вывод графической и алфавитно-цифровой информации на жидкокристаллический индикатор (ЖКИ); ввод параметров и команд управления в блок УРОИ с помощью специальной пленочной клавиатуры; обеспечение звукового сопровождения; управление рабо-

той КУСТов и исполнительных устройств.

Центральный процессор А1 ATmega103 управляет работой всего блока УРОИ. При этом связь со всеми микропроцессорами на плате осуществляется по интерфейсу SPI. По этому же интерфейсу осуществляется и программирование всех микропроцессоров, входящих в блок. Данный тип процессора включает в себя шесть 8-разрядных портов с возможностью программирования назначения каждого контакта соответствующего порта. Процессор имеет в своем составе FLASH память объемом 128 Кбайт, ОЗУ-512 байт, последовательный порт, порт SPI. Наличие памяти дает возможность хранить в ней не только рабочую программу, но и данные, получаемые во время измерения и управления блоком УРОИ.

Один из портов центрального процессора А1 представляет собой 8-канальный 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Один канал этого АЦП используется для ввода аналогового сигнала с фотометра. Остальные каналы АЦП используются для измерения и контроля напряжения источников питания через соответствующие преобразователи уровня.

Центральный процессор А1 по интерфейсу I²C имеет связь с таймером и электрически перепрограммируемым запоминающим устройством



(ЭППЗУ). Микросхема таймера – календаря имеет независимое питание от литиевой батареи, что позволяет вести отсчет реального времени и выдавать его в процессе измерения параметров системы и управления блоком УРОИ.

Электрически перепрограммируемое последовательное запоминающее устройство (ЭППЗУ) имеет объем 2 Кбайта. Оно предназначено для хранения индивидуальных параметров системы и текущих установочных данных. Записанные в микросхему данные не стираются при выключении питания и могут меняться оператором.

Один из портов центрального процессора А1 используется для считывания вводимой информации с пленочной клавиатуры, электрически организованной в матрицу 3х6.

Центральный процессор А1 по шине SPI управляет контроллером аудиосопровождения А4.

По интерфейсу SPI осуществляется управление контроллером графического жидкокристаллического индикатора А3. Этот контроллер выполнен на цифровом сигнальном процессоре типа ADSP2185, работающем на частоте 16 МГц. Процессор работает по программе, записанной в микросхеме собственного постоянного запоминающего устройства объемом 128 Кбайт; имеет встроенную оперативную память данных объемом 16К 16-разрядных слов и программ 16К 24-разрядных слов, что позволило создать многооконную систему отображения алфавитно-цифровой и графической информации. Этим же процессором А3 осуществляется управление контрастностью и электролюминесцентной подсветкой модуля ЖКИ.

Связь оператора с системой может быть организована с удаленного компьютера по сети Ethernet и RS-232. Для обслуживания интерфейса RS-232, выполненного на микросхеме ADM211, используется 8-разрядный порт микропроцессора А2 типа AT90S8515, созданный также на основе RISC архитектуры. Процессор имеет в своем составе четыре 8-разрядных порта с возможностью программирования назначения каждого контакта соответствующего порта, FLASH память объемом 8 Кбайт, ОЗУ-256 байт, последовательный порт, интерфейс SPI. Один из портов процессора А2 используется как регистр управления переключением диапазонов фотометра. Другой порт этого же процессора А2 предназначен для формирования и включения сигналов звуковой и световой сигнализации.

Для управления работой КУСТов используется процессор А5, выполненный на аналоговой микросхеме AT90S8515. К процессору А5 подключено четыре 16-разрядных дельта-сигма аналого-цифровых преобразователя AD7706, которые служат для измерения температуры. Датчиком температуры являются платиновые терморезисторы, обладающие высоким температурным коэффициентом сопротивления и высокой стойкостью к окислению. Используемые в данном блоке АЦП имеют высокоомный дифференциальный вход, что позволяет подключить датчик температуры непосредственно к АЦП без предварительного усилителя. Измерение входного сигнала происходит в диапазоне 0÷1,25 В, который задается программно в АЦП микропроцессором. При 16-разрядном преобразовании цена младшего разряда соответствует 19 мкВ. Наличие в АЦП цифрового фильтра и последующее усреднение получаемых данных микропроцессором за 1 с позволяет получить ошибку в определении температуры менее 0,1 градуса. Цифровой фильтр программируется на частоту среза 13,1 Гц (частота измерения 50 Гц).

Через один из портов этого же процессора А5 осуществляется и управление исполнительными механизмами газоанализатора: клапанами, дозатором, насосом и десорбером.

Графический модуль ЖКИ DG-24128 имеет габаритные размеры – 144×104×12,5 мм. При этом видимое поле для отображения информации – 114×64 мм, а размер точки – 0,4×0,4 мм. Для получения более высокого контраста выводимого графического изображения или текста используется электролюминесцентная подсветка.

Алгоритм работы ГА

Основной режим эксплуатации разработанных газоанализаторов – автоматический, с циклическим отбором и анализом пробы наружного воздуха. По истечении заданного времени подготовки (обычно 20 мин после включения прибора), газоанализатор переходит в режим автоматического анализа, при этом по командам блока УРОИ осуществляется ряд последовательных операций.

1. Контрольный нагрев концентратора для очистки его от случайных загрязнителей.

2. Отбор в концентратор пробы с «опорной» концентрацией из диффузионного дозатора. Количество адсорбированного в концентраторе вещества $M_1 = \Phi \cdot \tau_1$ (мг), где Φ – диффузионный по-

ток от дозатора, мг/мин; τ_1 – время поступления примеси в концентратор, мин.

3. Десорбция примеси из концентратора при нагревании в поток газа-носителя и хроматографический анализ десорбированной пробы. Хроматографический пик фиксируется детектором МоЯК. Процессор «считает» в заданном «окне» времени площадь пика S_1 , соответствующую массе примеси M_1 , и запоминает ее значение.

4. Отбор пробы из атмосферного воздуха.

5. Анализ пробы атмосферного воздуха. Проводится аналогично операции 3: кратковременный нагрев концентратора и запись хроматограммы.

В том же «окне» процессор «считает» площадь пика анализируемой примеси S_2 и вычисляет соответствующую ей массу вещества $M_2 = M_1 \frac{S_2}{S_1}$ (мг) и его концентрацию $C = \frac{M_2}{V \cdot \tau_2}$ (мг/дм³) в атмосфере, где V – скорость отбора пробы из атмосферы, дм³/мин; τ_2 – время пробоотбора, мин. Из этих выражений получим $C = \frac{\Phi \cdot \tau_1 \cdot S_2}{S_1 \cdot V \cdot \tau_2}$, причем величина диффузионного потока Φ от дозатора постоянна при данной температуре (определяется калибровкой независимым методом и вводится в память процессора).

Основные технические характеристики автоматических газоанализаторов люизита «Каскад-Г» и иприта «Каскад-5» на базе детектора МоЯК

Характеристика	«Каскад-Г»	«Каскад-5»
Предел обнаружения целевого компонента, мг/м ³	Не более 10^{-4} (0,5 ПДК _{р.з.})	10^{-4} (0,5 ПДК _{р.з.})
Диапазон измерения концентрации целевого компонента, мг/м ³	$2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$
Технологические примеси, не мешающие определению целевого компонента на уровне ПДК _{р.з.} (концентрация, мг/м ³)	Диэтиловый эфир (300) Монооксид углерода (20) Ацетилен (60 %) Диоксид азота (5) Диоксид серы (10) Диметилформамид (10) Монометакриловый эфир диэтиленгликоля (485)	Ацетилен (0,07) Диоксид азота (10) Диоксид серы (15) Моноэтаноламин (1) N-Метилпирролидон (110) Изобутиловый спирт (15) Хлористый водород (10)
Погрешность измерения, %, не более	25	25
Время выхода на рабочий режим, мин, не более	20	20
Время непрерывной работы, ч, не менее	8	8
Время одного цикла анализа, мин, не более		
с автокалибровкой	10	14
без автокалибровки	4	6
Периодичность автокалибровки, раз/ч	1	1
Расход газа-носителя (воздуха), дм ³ /мин	10 ± 1	$0,45 \pm 0,05$
Расход воздуха при пробоотборе, дм ³ /мин	10	5
Газовое питание	От сети сжатого воздуха (давление 2–6 кгс/см)	
Электропитание от сети переменного тока		
напряжение, В	220 ± 22	220 ± 22
частота, Гц	50 ± 1	50 ± 1
Потребляемая мощность, кВт, не более	0,2	0,2
Масса, кг, не более	90	45
Габаритные размеры, мм, не более		
длина	600	600
ширина	615	416
высота	1072	550

По окончании цикла анализа его результат выдается на встроенный дисплей. Более подробная информация об условиях анализа по локальной сети Ethernet, протоколов RS-232, RS-485 может передаваться на компьютер центра управления процессом уничтожения химического оружия. Далее, по команде процессора прибора повторяются циклы анализа проб из атмосферы (операции 4 и 5). Через определенные интервалы времени (один раз в час) процессор дает команду на калибровку газоанализатора (операции 2 и 3).

Газоанализатор для определения люизита работает аналогичным образом (за исключением того, что отсутствуют операции газохроматографического разделения и пиролиза пробы).

Газоанализаторы люизита «Каскад-Г» и иприта «Каскад-5»

ГОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ), ООО «НПО РИОС» Технопарк СПбГПУ и ОАО Электростальское НПО «НЕОРГАНИКА» в рамках выполнения ФЦП «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации» разработали и внедрили автоматические газоанализаторы люизита «Каскад-Г» и иприта «Каскад-5», предназначенные для санитарно-гигиенического контроля люизита и иприта в воздухе рабочей зоны объектов по уни-

чтожению химического оружия. Основные технические характеристики газоанализаторов приведены в таблице.

Внешний вид газоанализаторов люизита и иприта, основанных на детектировании молекулярных ядер конденсации, представлен на рис. 5.

Опытные образцы газоанализаторов люизита и иприта прошли государственные испытания (на базе войсковой части № 61469) и испытания на соответствие типа (на базе научно-исследовательской лаборатории Саратовского военного института радиационной, химической и биологической защиты) и внесены в государственный реестр. Газоанализаторы успешно эксплуатировались на объекте по уничтожению химического оружия в пос. Горный Саратовской области, в настоящее время работают на объектах в г. Камбарке Удмуртской Республики и в пос. Марадыковский Кировской области.

Особо следует отметить успешное создание приборов для санитарно-гигиенического контроля люизита. Это вещество необратимо сорбируется практически на всех материалах и поэтому не поддается хроматографическому определению. Впервые в мировой практике задачу удалось решить без применения хроматографического метода: люизит накапливается на проволочном сорбенте и далее термосорбируется с образованием производных, определяемых детектором МоЯК [1].

а)



б)



Рис.5. Внешний вид газоанализаторов:
а – люизита «Каскад-Г»; б – иприта «Каскад-5»

Интегратор фототока, основанный на измерении с последующим усреднением тангенса угла наклона зависимости фототока от времени, а также усреднении результатов измерений, позволяет регистрировать фототоки светорассеяния аэрозольными частицами на уровне десятков фА, что обеспечивает чувствительность детекторов МоЯК к детектируемым веществам ниже уровней предельно допустимой концентрации рабочей зоны.

Программно-аппаратный блок УРОИ, осуществляющий установку режимов, контроль температур и параметров блоков газоанализатора,

измерение, визуализацию и обработку фототока светорассеяния аэрозольными частицами, обеспечивает автоматическое определение концентрации отравляющих веществ.

Внедрение разработанных и серийно изготовленных газоанализаторов для измерения концентраций отравляющих веществ иприта и люизита создало инструментальную базу для мониторинга атмосферы на производствах по уничтожению химического оружия, что определяет успешное выполнение работ по ФЦП «Уничтожение химического оружия в Российской Федерации» в настоящее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кянджециан, Р.А.** Аналитические возможности детектора молекулярных ядер конденсации для мониторинга атмосферы производств по переработке и уничтожению химического оружия [Текст] / Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов, С.В. Демин [и др.] // Российский химический журнал. –2002. –Т. XLVI. –Вып.6. –С. 20–31.

2. **Кателевский, В.Я.** Автоматические газоанализаторы санитарно-гигиенического контроля содержания паров люизита и иприта [Текст] / В.Я. Кателевский, Р.А. Кянджециан, Д.А. Коньжев, С.Н. Соловьёв, В.П. Валюхов, С.В. Дёмин // Российский химический журнал. –2010. –Т. LIV. –Вып. 4. –С. 107–114.

3. **Купцов, В.Д.** Газоанализаторы на основе эффекта молекулярных ядер конденсации [Текст] /В.Д. Купцов, Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов//Научно-технические ведомости СПбГПУ. –Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –Т. 113. –Вып. 6. –С. 145–151.

4. **Купцов, В.Д.** Светорассеяние аэрозольными частицами в газоанализаторах на молекулярных ядрах конденсации [Текст]/В.Д. Купцов, Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов// Научно-технические ведомости СПбГПУ. –Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –Т. 115. –Вып. 1. –С.178–187.

УДК 368

А.Ф. Зубков, В.Н. Деркаченко, Д.Л. Анцев

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО РЫНКА СТРАХОВАНИЯ

Страхование – это стратегический сектор экономики, особенно в период развития рыночных отношений. Страхование повышает инвестиционный потенциал и дает возможность увеличить состояние и богатство нации.

В последние годы рынок страхования характеризуется снижением числа страховых организаций. Так, если в 2005 г. их было 983, то в 2007 г. – 849, а в 2009 г. – 693 [1].

Снижение числа страховых организаций сопровождалось ростом филиальной сети. Так, с 2005 по 2008 г. число филиалов страховых организаций увеличилось на 8,5 % (426 ед.).

По итогам 2009 г. совокупные страховые взносы составили 977,5 млрд руб., выплаты – 734,5 млрд руб. и, соответственно, коэффициент выплат составил 0,75. В 2008 г. коэффициент выплат составил 0,66.

Для Приволжского ФО и Пензенской области в 2008 г. этот коэффициент, соответственно, равен 0,73 и 0,67. Значение этого показателя все еще отстает от соответствующих величин для стран с

развитым рынком страховых услуг, в которых величина коэффициента приближается к 0,9.

В 2009 г. впервые темпы прироста реальных страховых премий на российском страховом рынке имели отрицательную динамику. По официальным данным объем полученных страховых взносов без учета платежей по ОМС упал на 7,5 %. При этом динамика страховой премии практически полностью отражала динамику ВВП (–7,5 и –7,9 % соответственно).

В результате объем российского страхового рынка в 2009 г. составил 513,6 млрд руб. (977,9 млрд руб. с учетом платежей по ОМС), по личным видам страхования (кроме страхования жизни) – 101,8 млрд руб., по имущественным видам страхования (с учетом страхования предпринимательских и финансовых рисков) – 277,3 млрд руб., по страхованию ответственности – 26,0 млрд руб.

На рисунке показана динамика страховых взносов с 1999 по 2009 г.

Важным вопросом в исследовании деятель-



ности страховых организаций является не только статистический анализ показателей, но и прогнозирование их на перспективу.

Прогноз роста российского страхового рынка должен опираться на общий прогноз экономического развития.

В настоящее время прогнозы, разрабатываемые аналитическими центрами, базируются, в основном, на экспертных оценках.

Наряду с экспертными методами целесообразно использовать математические методы прогнозирования. Одним из таких методов является регрессионный однофакторный и многофакторный анализ [2, 3].

Многофакторная линейная регрессионная модель имеет вид:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_k \cdot x_k, \quad (1)$$

где y – показатель, характеризующий систему страхования; $x_1, x_2, \dots, x_k$ – факторы, влияющие на величину показателя.

Построение статистических моделей проводится с использованием пакета прикладных программ «Stadia 6.2» и, в частности, модуля «Множественная линейная регрессия». Он позволяет получить:

коэффициенты регрессионной модели, их стандартные ошибки;

сумму квадратов регрессионной, остаточной и общей дисперсий;

множественный коэффициент корреляции и детерминации;

приведенный коэффициент детерминации;

стандартную ошибку модели;

расчетные значения критерия Фишера и другие характеристики.

Значимость модели оценивается по критерию Фишера. Расчетное значение критерия Фишера определяется по формуле:

$$F = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_\varepsilon^2}, \quad (2)$$

где σ_y^2 – факторная дисперсия; σ_ε^2 – остаточная дисперсия.

Качество модели в целом оценивается через коэффициент детерминации:

$$R^2 = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_y^2}, \quad (3)$$

где σ_y^2 – общая дисперсия.

Наряду с множественным коэффициентом детерминации определяется приведенный коэффициент детерминации:

$$R_{np}^2 = \frac{R^2 \cdot (n-1) - k}{n-1-k}, \quad (4)$$

где n – объем выборки; k – число факторов.

Стандартная ошибка модели определяется по формуле:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n-1-k}}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$; y_i – реальное i -е значение показателя; $\hat{y}_i$ – прогнозная оценка i -го значения показателя, полученная по модели.

По минимуму этой ошибки может быть выбрана лучшая модель.

Для прогнозирования показателя во времени могут быть использованы линейные или нелинейные однофакторные модели.

Однофакторная линейная модель имеет вид:

$$y = a_0 + a_1 \cdot t, \quad (6)$$

где t – время (год, месяц и т. п.).

Примерами нелинейных моделей являются:

$$y = a_0 + a_1 \cdot \ln t; \quad (7)$$

$$y = e^{a_0 + a_1 \cdot t}; \quad (8)$$

$$y = a_0 + a_1 \cdot \frac{1}{t}; \quad (9)$$

$$y = \frac{1}{a_0 + a_1 \cdot \frac{1}{t}}. \quad (10)$$

По статистическим данным, указанным на рисунке (динамика страховых взносов), построена следующая нелинейная модель:

$$y = \frac{1}{0,0007018 + 0,01227 \cdot \frac{1}{t}}. \quad (11)$$

Характеристики модели:

$R = 0,99$; $R^2 = 0,98$; $\sigma_\varepsilon = 0,0003561$; $F = 865,9$.

Сравнение расчетного значения критерия Фишера с табличным показало, что модель является значимой.

По этой модели получен прогноз страховых взносов: 2010 г. – 577,9 млрд руб.; 2011 г. – 605,4 млрд руб.

Основные факторы, оказавшие влияние на динамику взносов в различных видах страхования в 2009 г.:

падение производства и снижение объемов кредитования;

сокращение доходов населения;

Таблица 1

Данные по страховым премиям на душу населения и значения факторов по РФ

Федеральный округ	y/z	x_1 , тыс. руб.	x_2 , тыс. руб.	x_3 , тыс. руб.
Центральный	1,726	19,116	20,665	4,518
Приволжский	0,561	12,350	13,209	4,298
Северо-Западный	0,835	15,052	19,936	5,197
Южный	0,321	10,874	11,733	4,119
Уральский	1,083	18,725	21,826	4,827
Сибирский	0,581	12,856	15,381	4,542
Дальневосточный	0,472	15,622	20,778	5,389

ослабление курса рубля и инфляция;
изменения в законодательстве, касающиеся
обязательных и вмененных видов страхования [4].

Логический и корреляционный анализ показал, что на такие виды страхования, как страхование жизни (y_1) и личное страхование (y_2) существенное влияние оказывают факторы:

среднедушевые денежные доходы населения в месяц – x_1 ;

среднемесячная номинальная начисленная за-

работная плата – x_2 ;

средний размер назначенных пенсий – x_3 .

Для построения многофакторной модели с целью прогнозирования страховых премий по страхованию жизни и личному страхованию ($y = y_1 + y_2$) по РФ и регионам Приволжского ФО использовались статистические данные, приведенные в табл. 1 и 2.

При этом, в качестве показателя рассматривалось отношение y/z , где z – численность на-

Таблица 2

Данные по страховым премиям на душу населения и значения факторов по Приволжскому ФО

Регион	y/z	x_1 , тыс. руб.	x_2 , тыс. руб.	x_3 , тыс. руб.
Республика Башкортостан	0,490	14,252	14,084	4,232
Республика Марий Эл	0,191	7,843	10,534	4,046
Республика Мордовия	0,249	8,384	10,530	4,090
Республика Татарстан	0,860	14,180	14,904	4,316
Удмуртская Республика	0,580	9,581	12,153	4,401
Чувашская Республика	0,254	8,593	11,146	4,057
Пермский край	0,788	16,119	14,774	4,464
Кировская область	0,343	10,112	10,971	4,401
Нижегородская область	0,705	13,090	13,467	4,436
Оренбургская область	0,446	10,184	12,087	4,152
Пензенская область	0,178	10,172	11,723	4,195
Самарская область	0,714	15,805	14,674	4,435
Саратовская область	0,537	9,061	12,008	4,191
Ульяновская область	0,238	9,756	10,895	4,191

Таблица 3

**Модели и прогнозные значения концентрации объема страхования
премий ТОП компаний**

Компании	Модели	σ_{ε}	Прогноз, %	
			2010 г.	2011 г.
ТОП 5	$y_1 = 23,25 + 1,35t$	1,1214	31,4	32,7
ТОП 10	$y_2 = 33,45 + 1,83t$	0,3626	44,4	46,3
ТОП 20	$y_3 = 46,80 + 2,41t$	0,4621	61,3	63,7

селения, т. е. использовались страховые премии на душу населения в 2008 г.

По данным табл. 1 получена следующая многофакторная модель:

$$y/z = 0,9363 + 0,1296x_1 + 0,0311x_2 - 0,5586x_3. \quad (12)$$

Характеристики модели:

$$R = 0,93; R^2 = 0,87; R^2_{\text{пр}} = 0,71; \sigma_{\varepsilon} = 0,2481; F = 6,478.$$

Математическая модель значима, и ее можно использовать в практических целях.

По данным табл. 2 получена математическая модель вида:

$$y/z = -4,2200 - 0,0763x_1 + 0,2139x_2 + 0,6783x_3. \quad (13)$$

Характеристики модели:

$$R = 0,96; R^2 = 0,92; R^2_{\text{пр}} = 0,89; \sigma_{\varepsilon} = 0,0768; F = 37,05$$

Модель значима и ее можно использовать для прогнозирования страховых премий (страхование жизни и личное страхование) в зависимости

от денежных доходов, заработной платы и назначенных пенсий населения.

Прогнозирование страховых премий и выплат может осуществляться по временным моделям.

В табл. 3 приведены статистические модели для прогнозирования концентрации по объему страховых премий (без ОМС) ТОП 5, ТОП 10, ТОП 20 страховых компаний и прогноз на 2010 и 2011 гг.

В табл. 4 представлены модели для прогнозирования количества страховых организаций, страховых премий (млн руб.) и выплат (млн руб.) по РФ и Приволжскому ФО.

Страховые премии в РФ и Приволжском ФО в 2011 г. по сравнению с 2008 г., соответственно, увеличиваются на 24,4 и 32,9 %, а выплата – на 34,2 и 33,4 %.

Таким образом, темпы роста прогнозных страховых премий и выплат (сравнение 2011 г. с 2010-м) для РФ и Приволжского ФО будут, соответственно, равны 9,4 %; 10,1 %; 17,1 %; 10,4 %.

В перспективе можно ожидать реальный рост страхового рынка в России.

Таблица 4

**Модели и прогнозные значения количества страховых организаций,
страховых премий и выплат**

Виды	РФ и ФО	Модели*	σ_{ε}	Прогноз, млн руб.	
				2010 г.	2011 г.
Количество	РФ	$y_4 = e^{7,215-0,0563t}$	0,0594	732	692
Премии	РФ	$y_5 = 271750 + 101750t$	0,7052	1085750	1187500
	ПФО	$y_6 = 122300 + 63620t$	0,1876	631260	694880
Выплаты	РФ	$y_7 = e^{12,29+0,1579t}$	0,1306	769000	900600
	ПФО	$y_8 = 77760 + 47800t$	0,2475	460160	507960

* Для прогнозирования показателя y_4 на 2010 г. в модель необходимо подставлять $t = 11$; для $y_5 \dots y_8 - t = 8$ и т. д.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский статистический ежегодник 2010 [Текст]/Статистический сборник. – М.: Росстат, 2010. –С. 626–633.
2. Деркаченко, В.Н. Методы социально-экономического прогнозирования: Учебник [Текст]/ В.Н. Деркаченко, А.Ф. Зубков. –Пенза: ПГТА, 2008. –С. 31–51.
3. Зубков, А.Ф. Методология построения прогнозных моделей, кластерные технологии в социально-экономических исследованиях: Монография [Текст]/ А.Ф. Зубков, В.Н. Деркаченко. –Пенза: ПГТА, 2005. –С. 53–91.

УДК 339.146

В.А. Богомолов, А.В. Сурина

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗНАНИЙ**

В настоящее время наблюдается тенденция, в соответствии с которой многие организации, выбирая инновационный путь развития, организуют свою деятельность с использованием новых, современных технологий и за счет внедрения различных нововведений существенно повышают свою конкурентоспособность. Любое нововведение базируется на получении, использовании и распространении информационно-интеллектуальных активов (знаний и информации). В связи с этим возникает проблема эффективности внутриорганизационного управления знаниями и необходимость разработки управленческих методов и механизмов для формирования, аккумулирования и использования знаний. Результативные способы управления знаниями – существенное конкурентное преимущество современной организации.

Этап передачи и распространения (как возможность использовать накопленные знания и информацию во всей организации) определяет конечный успех в процессе управления знаниями.

Известно несколько моделей распространения знаний, прежде всего это эпидемические и диффузные модели. Как правило, такие модели используются для описания процесса передачи и распространения знаний на макроуровне, основной источник знаний и информации находится вне организации. Модели процесса передачи и распространения знаний на микроуровне (между подразделениями одной организации) в настоящее время не получили широкого распространения, хотя доля внутриорганизационных знаний существенно превышает объем знаний, полученных извне. Поэтому

разработка моделей процесса передачи и распространения знаний является актуальной задачей.

Предлагается использовать гравитационную модель для оценки уровня распространения знаний в организации (далее – модель распространения знаний). Под уровнем распространения знаний будем понимать совокупный объем усвоенных персоналом организации данных, информации, ноу-хау, знаний, полученных из внутренних источников.

Из физики известно, что гравитационная сила (сила взаимодействия) между двумя телами прямо пропорциональна их массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами. Формально это можно представить как

$$F_{ij} = G \frac{M_i M_j}{D^2}, \quad (1)$$

где G – гравитационная постоянная, D – расстояние между телами, M_i и M_j – масса соответствующих тел i и j .

В макроэкономических исследованиях гравитационная модель (модель торговой гравитации) первоначально использовалась для анализа уровня внешней торговли между странами. Сейчас гравитационная модель широко используется для анализа потоков различных типов, например, миграционных, импорт и экспорт, прямых иностранных инвестиций и т. п. [1, 2, 4, 6].

Основными параметрами, характеризующими уровень распространения знаний в организации, являются уровень инновационности подразделений организации, интенсивность взаимодействия и уровень занятости персонала в научно-исследовательских проектах.

Адаптируем (1) для оценки уровня распространения знаний, тогда:

$$Z_{ij} = \frac{Y_i Y_j N_i N_j}{D} \quad (2)$$

Уровень распространения знаний между подразделениями показывает объем знаний, переданных из подразделения i в подразделение j и усвоенный персоналом подразделения j . Этот показатель можно определить по формуле:

$$Z_{ij} = \sum_{p=1}^3 \beta_p L_p, \quad \forall i, j, \quad (3)$$

где i, j – порядковые номера подразделений организации; $i, j = 1, \dots, n$; Z_{ij} – объем знаний, переданных из подразделения i в подразделение j и усвоенных персоналом подразделения j , $i \neq j$; L_1 – число сотрудников, занятых в общих проектах подразделений i и j , в % от общего числа сотрудников в подразделениях; L_2 – отношение количества общих проектов, выполняемых подразделениями i и j к общему числу проектов; L_3 – доля добавленной ценности подразделений i, j в конечной продукции организации; β_p – весовые коэффициенты.

Уровень инновационности подразделения характеризует степень его научно-технического развития и представляет собой свертку 9 адаптированных показателей «European Innovation Scoreboard» [5]. Этот показатель можно определить по формуле:

$$Y_i = \sum_{p=1}^9 \chi_p G_p, \quad \forall i, \quad (4)$$

где Y_i – уровень инновационности подразделения i ; G_{i1} – процент сотрудников с высшим образованием в подразделении i ; G_{i2} – процент сотрудников с ученой степенью в подразделении i ; G_{i3} – процент сотрудников со степенью MBA в подразделении i ; G_{i4} – процент сотрудников, прошедших дополнительные профессиональные курсы обучения в течение трех лет; G_{i5} – процент затрат на развитие ИТ инфраструктуры (от общих затрат) в подразделении i ; G_{i6} – процент затрат на тренинг и развитие сотрудников в подразделении i ; G_{i7} – процент затрат на технологические инновации в подразделении i ; G_{i8} – процент новых продуктов или услуг к общим продажам в подразделении i ; G_{i9} – процент отношения инновационных затрат к общему обороту в подразделении i ; χ_p – весовые коэффициенты.

Интенсивность взаимодействия между подразделениями измеряется как отношение объема информации, переданной из подразделения i в подразделение j по существующим каналам связи (интранет, электронная почта, сотовая связь),

к общему внутреннему трафику (выраженному в килобайтах) в организации. Вычисляется по следующей формуле:

$$D_{ij} = \frac{V_{ij}}{\sum_{i,j=1}^n V_{ij}}, \quad \forall i, \quad (5)$$

где D_{ij} – интенсивность взаимодействия между подразделениями i и j ; V_{ij} – количество информации, переданной из подразделения i в подразделение j ; $\sum_{i,j=1}^n V_{ij}$ – общее количество информации, переданное внутри всей организации.

Уровень занятости персонала в научно-исследовательских проектах измеряется как отношение числа сотрудников, занятых в научно-исследовательских проектах в подразделении i к общей численности персонала подразделения i . Вычисляется по следующей формуле:

$$N_i = \frac{N_{im}}{N_i}, \quad \forall i, \quad (6)$$

где N_i – уровень занятости персонала в научно-исследовательских проектах подразделения i ; N_{im} – общее число сотрудников подразделения i занятых в научно-исследовательских проектах; N_i – общая численность персонала подразделения i .

Линеаризуя (2), получим уравнение (7), представляющее собой множественную линейную регрессию:

$$\ln(Z_{ij}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(Y_i \times Y_j) + \alpha_2 \ln(N_i \times N_j) + \alpha_3 \ln(D_{ij}) + e_{ij}, \quad (7)$$

где j и i – порядковые номера подразделений организации, $i, j = 1, \dots, n$; Z_{ij} – уровень распространения знаний между подразделениями i и j ; Y_i – уровень инновационности подразделения i ; Y_j – уровень инновационности подразделения j ; N_i – уровень занятости персонала в научно-исследовательских проектах в подразделении i ; N_j – уровень занятости персонала в научно-исследовательских проектах в подразделении j ; D_{ij} – интенсивность взаимодействия между подразделениями i и j ; e_{ij} – стандартная ошибка регрессии; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты регрессии, получаемые методом наименьших квадратов.

Уравнение (7) используется для оценки влияния параметров модели на уровень распространения знаний и прогнозирования динамики его изменений. Корректность уравнения (7) была проверена с использованием информации о деятельности компании ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия» и российского представительства NORPEKE Ltd. В расчете были использованы дан-



ные о составе персонала (штатное расписание, база данных сотрудников) в организациях, отчетные документы различного типа (акты передачи сырья, материалов, продукции, анализ затрат и др.), данные IT подразделений о количестве переданной информации по различным коммуникационным каналам (отчет провайдеров связи МТС и МГТС).

В обеих компаниях рассматривались следующие структурные подразделения: подразделение Бизнес-планирования и развития, занимающееся разработкой стратегии развития, анализом, выводом новых продуктов и услуг; Корпоративный университет, занимающийся обучением и развитием сотрудников; подразделение R&D, занимающееся НИОКР; Проектное подразделение, занимающееся ведением проектов, направленных на развитие бизнеса и вывод новых продуктов на рынок.

По экспериментальным данным, полученным в ходе исследования для каждой организации, с использованием MS Excel были рассчитаны коэффициенты регрессии [3]. В итоге были получены два уравнения, которые позволяют оценить степень влияния каждого параметра на уровень распространения знаний.

Для ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия»

$$\ln(Z_{ij}) = -10,51 + 1,07 \ln(Y_i \times Y_j) + 0,95 \ln(N_i \times N_j) + 1,08 \ln(D_{ij}). \quad (8)$$

Для НОРРЕКЕ Ltd.

$$\ln(Z_{ij}) = -8,87 + 1,04 \ln(Y_i \times Y_j) + 0,91 \ln(N_i \times N_j) + 1,17 \ln(D_{ij}). \quad (9)$$

Используя уравнения (8) и (9), находим уровень распространения знаний между подразделениями в каждой организации (см. табл.).

Полученные значения уровня распространения знаний между подразделениями, представленные в 3 и 4 столбцах таблицы используются для оценки уровня распространения знаний между подразделениями. Уровень распространения знаний в компании ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия» между подразделением Бизнес-планирования и Корпоративным университетом (отдел обучения) равен 0,68. Следовательно, 68 % от совокупного объема знаний, переданных из подразделения Бизнес-планирования, были усвоены сотрудниками подразделения Корпоративный университет (отдел обучения), т. е. получили распространение в данном подразделении. Аналогичным образом можно интерпретировать и остальные значения Z_{ij} таблицы.

Уровень распространения знаний Z_{ij} может принимать значения от нуля до единицы. Если зна-

чение близко к нулю, то знания не распространяются между конкретными подразделениями, т. е. возникает ситуация, при которой подразделения имеют очень высокую степень автономности. Если значение близко к единице, то подразделения являются сильно взаимозависимыми, фактически граница между подразделениями условная. В общем случае, чем выше значение уровня распространения знаний Z_{ij} , тем интенсивнее происходит обмен знаниями между подразделениями внутри организации.

Используя уравнения (8) и (9), можно определить наиболее существенный параметр, влияющий на уровень распространения знаний. В нашем случае – это интенсивность взаимодействия между подразделениями.

Кроме того, уравнения (8) и (9) можно использовать для прогноза изменения или динамики уровня распространения знаний при целенаправленном изменении параметров. Например, это может быть организация дополнительного обучения сотрудников, целевой отбор персонала, изменение бизнес-процессов и структуры, улучшение внутренней коммуникации.

Чем выше средний уровень (avr) взаимодействия между подразделениями внутри одной организации, тем интенсивнее происходит процесс распространения знаний внутри организации. Отклонение (div) характеризует равномерность процесса распространения знаний. Чем оно ближе к нулю, тем более равномерный процесс распространения знаний в организации.

Количественно оценить равномерность распространения знаний можно, введя соответствующий показатель:

$$\text{Ind} = \text{div}^2 / \text{avr}, \quad (10)$$

где Ind – показатель равномерности распространения знаний внутри организации; div – стандартное отклонение Z_{ij} ; avr – среднее значение Z_{ij} .

Показатель равномерности распределения может принимать значения от нуля до единицы. Если значение близко к нулю, то знания распространяются равномерно между подразделениями внутри организации. Если значение близко к единице, то знания сконцентрированы в одном/двух подразделениях. Сгруппируем значения показателя следующим образом:

если значение Ind от 0 до 0,40, то знания распространяются равномерно;

если значение Ind от 0,40 до 0,60, то знания распространяются неравномерно;

если значение Ind от 0,60 до 1, то знания распространяются с высокой степенью неравномерности.

Значение уровня распространения знаний между подразделениями каждой из организаций

Подразделение i	Подразделение j	ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия» (Z_{ij})	HORPEKE Ltd. (Z_{ij})
Бизнес-планирования и развития	Корпоративный университет	0,68	0,69
Бизнес-планирования и развития	Подразделение R&D	0,61	0,63
Бизнес-планирования и развития	Проектное подразделение	0,71	0,68
Корпоративный университет	Бизнес-планирования и развития	0,37	0,35
Корпоративный университет	Подразделение R&D	0,32	0,13
Корпоративный университет	Проектное подразделение	0,11	0,27
Подразделение R&D	Бизнес-планирования и развития	0,74	0,72
Подразделение R&D	Корпоративный университет	0,44	0,37
Подразделение R&D	Проектное подразделение	0,75	0,62
Проектное подразделение	Бизнес-планирования и развития	0,27	0,31
Проектное подразделение	Корпоративный университет	0,34	0,37
Проектное подразделение	Подразделение R&D	0,42	0,48
Среднее значение (avr)		0,48	0,47
Стандартное отклонение (div)		0,49	0,42

Значение показателя равномерности распространения знаний Ind соответственно для ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия» равно 0,51, для HORPEKE Ltd. – 0,37. Такие значения свидетельствуют о равномерности распределения знаний внутри HORPEKE Ltd. и о неравномерности в ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия». Это объясняется обособленностью подразделений R&D в организациях по производству потребительских товаров. Если обнаружена высокая степень неравномерности (Ind более 0,6), то необходимо принимать управленческие решения, направленные на увеличение интенсивности взаимодействия между всеми элементами внутри организации. В противном случае знания и информация останутся «законсервированными» внутри одного подразделения, что

негативно отразится на коммерциализации новых продуктов и использовании ноу-хау.

Таким образом, для оценки уровня распространения знаний внутри организации была предложена модель, основными параметрами которой являются уровень инновационности подразделений организации, интенсивность взаимодействия и уровень занятости персонала в научно-исследовательских проектах. Модель можно использовать для прогноза изменения или динамики уровня распространения знаний при целенаправленном изменении параметров. Возможность использования предложенной модели была показана на примере двух организаций ООО «Кока-Кола ЭйчБиСи Евразия» и российского представительства HORPEKE Ltd.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабецкая-Кухарчук, О.А.** Переход к рынку в России и его влияние на международную интеграцию [Текст] / О.А. Бабецкая-Кухарчук, М. Морель. –М.: ГУ ВШЭ, 2003. –№ 2. –С 197–224.
2. **Косикова, Л.С.** Интеграционные проекты России на постсоветском пространстве: идеи и практика [Текст] / Л.С. Косикова// Ин-т экономики РАН. –М.: Наука, 2008. –С. 39.
3. **Себер, Дж.** Линейный регрессионный анализ [Текст] / Дж. Себер. –М.: Мир, 1980. –С. 456.
4. **Староверов, О.В.** Отдельные модели экономической социологии [Текст] / О.В. Староверов // Центральный экономико-математический институт РАН. –М.: Наука, 2006. –С. 232.
5. European Innovation Scoreboard 2009 [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ec.europa.eu/> (ссылка действительна на 30.03.2011)
6. **Helpman, E.** Market Structure and Foreign Trade [Текст] / E. Helpman, P. Krugman. –MIT Press, 1985. –P. 248.



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АБРАМОВ Николай Васильевич – доцент кафедры прикладной математики и вычислительной техники Самарского государственного архитектурно-строительного университета, кандидат физико-математических наук.

443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 194.
Тел. (846) 339-14-24, e-mail: abramoff@mail.ru

АНЦЕВ Денис Леонидович – аспирант кафедры прикладной математики и исследования операций в экономике Пензенской государственной технологической академии.

440605, г. Пенза, проезд Байдукова/ул.Гагарина, д. 1а/11. E-mail: zubkov@pgta.ru

БАБКИН Александр Васильевич – директор научного комплекса Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук, доктор экономических наук, профессор.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-18-21

БАБКОВА Елена Васильевна – доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики ГОУ ВПО Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 273-79-67, e-mail: evressim@yandex.ru

БОГОМОЛОВ Виктор Александрович – аспирант кафедры управления проектами Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: Vitek23011985@rambler.ru

БОРОДИН Андрей Михайлович – аспирант кафедры автоматики и информационных технологий Уральского федерального университета.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. Тел. (343) 375-37-53, e-mail: amborodin@acm.org

БУТЕНКО Игорь Всеволодович – ассистент кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета. ООО «Деловые консультации, Санкт-Петербург», начальник сектора.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812)702-41-69, e-mail: igor_boutenko@mail.ru

ВАЛЮХОВ Владимир Петрович – профессор кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: kuptsov@radio.rphf.spbstu.ru

ВАСИЛЬЕВ Андрей Юрьевич – ассистент, аспирант кафедры САиУ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-42-14, e-mail: vasyliev.tau@gmail.com

ВЕРЗИЛИН Дмитрий Николаевич – ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, кандидат технических наук, доктор экономических наук, профессор.

199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 39. E-mail: modusponens@mail.ru

ВОСТРОВ Алексей Владимирович – аспирант кафедры интегрированных компьютерных технологий в промышленности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп. 4, к. 306. Тел. (812) 552-65-21, e-mail: alex.sinkriver@gmail.com

ГОЛЛАНДЦЕВ Юрий Алексеевич – заведующий кафедрой интегрированных компьютерных технологий в промышленности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-61-77, e-mail: gollandzev@ipi.neva.ru

ДЕМУРИН Владимир Борисович – аспирант кафедры вычислительной техники и АСУ Кубанского государственного технологического университета.

350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. Тел. (861) 255-03-91

ДЕРКАЧЕНКО Валентин Николаевич – профессор кафедры прикладной математики и исследования операций в экономике Пензенской государственной технологической академии.

440605, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11. E-mail: zubkov@pgta.ru

ДЁМИН Сергей Васильевич – заведующий лабораторией НТЦ микроэлектроники РАН.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп. 2, оф. 224

ДУБЕНЕЦКИЙ Владислав Алексеевич – доцент кафедры интегрированных компьютерных технологий в промышленности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ДУДНИК Людмила Николаевна – старший преподаватель кафедры информатики факультета компьютерных технологий и автоматизированных систем (КТАС) Кубанского государственного технологического университета, соискатель.

350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. Тел. (861) 255-03-91, e-mail: lududnik@mail.ru

ЗУБКОВ Александр Фёдорович – декан факультета Института промышленной экономики, информатики и сервиса Пензенской государственной технологической академии, кандидат технических наук, профессор.

440605, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11. E-mail: zubkov@pgta.ru

ИВАНОВ Андрей Анатольевич – начальник кафедры Военной академии связи, кандидат технических наук.

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3. E-mail: komissare@yandex.ru

ИВАНОВ Марат Валерьевич – соискатель кафедры национальной безопасности факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: imv@gce.ru

КАЛИНИН Тимур Сергеевич – аспирант кафедры прикладной математики и вычислительной техники Ростовского государственного строительного университета.

344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162

КАТЕЛЕВСКИЙ Вадим Яковлевич – заведующий лабораторией ОАО «ЭНПО «Неорганика», кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп. 2, оф. 224

КОРОТКОВ Александр Станиславович – заведующий кафедрой прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-76-39, e-mail: korotkov@rphf.spbstu.ru

КРАСИЙ Надежда Павловна – доцент кафедры прикладной математики и вычислительной техники Ростовского государственного строительного университета, кандидат физико-математических наук.

344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162

КУПЦОВ Владимир Дмитриевич – докторант кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук, доцент.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: kuptsov@radio.rphf.spbstu.ru

КУРОЧКИН Михаил Александрович – профессор кафедры интегрированных компьютерных технологий в промышленности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп. 4, к. 306. Тел. (812) 552-65-21

МАГОМЕДОВ Абдулкарим Магомедович – заведующий кафедрой дискретной математики и информатики Дагестанского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент

367025, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 43А. Тел. (8722) 67-27-06, e-mail: magomedtagir1@yandex.ru

МАКАРОВА Елена Анатольевна – доцент кафедры технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук, докторант.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 273-78-35, e-mail: ea-makarova@mail.ru



МАКСИМОВА Татьяна Геннадьевна – заведующий кафедрой статистики ГОУ ВПО Санкт-Петербургского торгово-экономического института, кандидат технических наук, доктор экономических наук, профессор.

194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50. E-mail: maximovatg@gmail.com

МАТВЕЕВ Александр Владимирович – доцент кафедры национальной безопасности факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: fevega_10@mail.ru

МИЛОСЛАВСКАЯ Вера Дмитриевна – студентка кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: vrmilos@gmail.com

МУХАРЛЯМОВ Роберт Гарабшевич – заведующий кафедрой теоретической механики Российского университета дружбы народов, доктор физико-математических наук, профессор.

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. Тел. (495) 955-07-58, e-mail: robgar@mail.ru

НАСЫРОВ Ильдар Искандарович – аспирант кафедры автоматизации и информационных технологий Камской государственной инженерно-экономической академии.

423810, г. Набережные Челны, пр. Мира, д. 68/19. Тел. (8552) 30-44-44, e-mail: ildarec@mail.ru

НЕБЫЛОВ Владимир Александрович – научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, д. 67. E-mail: vladnebylov@rambler.ru

НЕСТЕРОВА Елена Ивановна – заведующий кафедрой прецизионных технологий и сертификации киновидеотехники Санкт-Петербургского государственного университета кино и телевидения, кандидат технических наук, доцент.

191119, Санкт-Петербург, ул. Правды, д. 13. Тел. (812) 315-64-54, e-mail: nesterovaei@rambler.ru

НИКУЛЬСКИЙ Игорь Евгеньевич – начальник лаборатории перспективных исследований и разработки программно-аппаратных средств телекоммуникационных систем и сетей на основе оптических технологий Санкт-Петербургского филиала ФГУП ЦНИИС – ЛО ЦНИИС, кандидат технических наук, доцент.

196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, д. 11. Тел. (812) 387-75-73, e-mail: nikul@loniis.org

ОСАДЧИЙ Александр Иванович – директор Санкт-Петербургского филиала ФГУП ЦНИИС – ЛО ЦНИИС, доктор технических наук, профессор.

196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, д. 11.

ПЕТРИЧЕНКО Григорий Семенович – заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов факультета компьютерных технологий и автоматизированных систем (КТАС) Кубанского государственного технологического университета, кандидат технических наук, доцент.

350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. Тел. (861) 255-03-91, e-mail: petry_gr@mail.ru

ПОРШНЕВ Сергей Владимирович – заведующий кафедрой автоматики и информационных технологий Уральского федерального университета, доктор технических наук, профессор.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. Тел. (343) 375-37-53, e-mail: sergey_porshnev@mail.ru

ПОТАПЕНКО Евгений Анатольевич – профессор кафедры организации и безопасности движения Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова, кандидат технических наук, доцент.

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Тел. (4722) 30-99-65, e-mail: potapenko@intbel.ru

РУБАНОВ Дмитрий Николаевич – старший преподаватель кафедры Военной академии связи.

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3. E-mail: rdn111@mail.ru

РУМЯНЦЕВ Иван Александрович – студент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: rumyancevvanya@ua.ru

СИМОНОВА Лариса Анатольевна – заведующий кафедрой автоматизации и информационных технологий Камской государственной инженерно-экономической академии, доктор технических наук, профессор.

423810, г. Набережные Челны, пр. Мира, д. 68/19. Тел. (8552) 58-96-17, e-mail: lasimonova@mail.ru

СМИРНОВ Андрей Александрович – преподаватель кафедры Военной академии связи, кандидат технических наук.

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.
E-mail: komissare@yandex.ru

СОЛДАТЕНКО Тамара Николаевна – старший преподаватель кафедры технологии, организации и экономики строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: soldatenko_tn@bk.ru

СОЛДАТЕНКОВ Алексей Сергеевич – старший преподаватель кафедры электротехники и автоматики Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова.

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Тел. (4722) 30-99-65, e-mail: aser@pisem.net

СРУР Мохаммад Юсеф – аспирант Кубанского государственного технологического университета.

350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. Тел. (861) 255-03-91

СУРИНА Алла Валентиновна – доцент кафедры управления проектами Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: avs@acea.neva.ru

СУШНИКОВ Виктор Александрович – аспирант кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. (812) 297-60-01, e-mail: sushnikov_v@mail.ru

ТИТОВ Алексей Владимирович – аспирант кафедры № 12 компьютерных систем и технологии национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

115409, Москва, Каширское ш., д. 31. E-mail: m-p-r@inbox.ru

ТРИФОНОВ Пётр Владимирович – доцент кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-06-29

УСТИНОВ Сергей Михайлович – профессор кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, член редколлегии журнала Научно-технические ведомости СПбГПУ серии «Информатика. Телекоммуникации. Управление».

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: usm50@yandex.ru

ФИЛИЧЕВ Евгений Валентинович – аспирант кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. 297-16-00, e-mail: e.filichev@gmail.com

ФИРСОВ Андрей Николаевич – заместитель заведующего кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: anfirs@yandex.ru

ХАРЬКОВОЙ Анатолий Анатольевич – аспирант кафедры № 12 компьютерных систем и технологии национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

115409, Москва, Каширское ш., д. 31. E-mail: m-p-r@inbox.ru

ХИСАМУТДИНОВ Равиль Миргалимович – главный технолог ОАО «КАМАЗ», директор Технологического центра, кандидат технических наук.

423827, г. Набережные Челны, пр. Автозаводской, д. 2. Тел. (8552) 37-28-15, 55-11-29, e-mail: sunnywind@list.ru

ХОЛОДНЫХ Павел Владимирович – ассистент кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, магистр техники и технологии, аспирант.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-4214, e-mail: pavel.kholodnykh@gmail.com

ЧЕРНОВ Андрей Владимирович – заведующий кафедрой прикладной математики и вычислительной техники Ростовского государственного строительного университета, доктор технических наук, доцент.

344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162. Тел. (863) 263-10-82



ЧУКАНОВ Всеволод Озирисович – профессор кафедры № 12 компьютерных систем и технологии национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», доктор технических наук.

115409, Москва, Каширское ш., д. 31, E-mail: m-p-r@inbox.ru

ШЕВЧЕНКО Андрей Борисович – соискатель кафедры национальной безопасности факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ЭЙСМОНТ Дмитрий Валерьевич – аспирант кафедры программного обеспечения ЭВМ Череповецкого государственного университета.

162600, г. Череповец, пр. Луначарского, д. 5. E-mail: torvald64@gmail.com

ЯКОВЛЕВ Алексей Олегович – старший преподаватель кафедры электроэнергетики Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова.

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Тел. (4722) 30-99-65, e-mail: aoalexey@gmail.com

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Иванов А.А., Рубанов Д.Н., Смирнов А.А. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСАХ РАДИОМОНИТОРИНГА.

Предложена усовершенствованная методика разработки электронного документооборота, учитывающая потребности информирования руководства о результатах радиомониторинга и особенности ведения радиомониторинга.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТООБОРОТ. РАДИОМОНИТОРИНГ. ЗАЩИТА ДОКУМЕНТООБОРОТА.

Симонова Л.А., Насыров И.И. ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ПРЕЦЕДЕНТОВ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ СЛОЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

Исследован метод создания экспертной системы, база знаний которой, состоящая из прецедентов, разделена на несколько уровней. Описаны правила создания базы прецедентов при диагностировании сложного оборудования АСУП и алгоритм предварительной кластеризации, необходимой для создания правил.

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА. БАЗА ЗНАНИЙ. ПРЕЦЕДЕНТ. КЛАСТЕРИЗАЦИЯ. ДИАГНОСТИКА. АЛГОРИТМ.

Петриченко Г.С., Дудник Л.Н., Срур М.Ю. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ФИНАНСОВОГО РИСКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И МОНТАЖЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ.

Предложена методика оценки финансового риска при проектировании и монтаже компьютерной сети предприятия. Для расчета риска этапов работ использованы методы экспертных оценок, анализа иерархий и теории случайных величин. Для повышения точности расчета использован подход, основанный на декомпозиции по уровням и работам.

ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ИСПОЛНИТЕЛЕЙ. ЭКСПЕРТНЫЕ ОЦЕНКИ. МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИНАНСОВОГО РИСКА.

Востров А.В., Курочкин М.А. ОБНАРУЖЕНИЕ КОНФЛИКТОВ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ НА ОНТОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ.

Дано формальное определение конфликта на основе шести пунктов классификации противоречий. Введены уровни определения конфликта, на основании которых осуществляется поиск конфликта. Разработан метод использования онтологического подхода для решения задачи выявления противоречий на знаниях, позволяющих ввести качественную и количественную оценку глубины противоречий.

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ. ОНТОЛОГИЯ. КОНФЛИКТ НА ЗНАНИЯХ. ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ КОНФЛИКТА.

Бутенко И.В. ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ОТЧЕТОВ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МЕТАДАННЫХ.

Предложена методика построения репозитория метаданных для уже существующей информационной системы. Дана оценка эффективности рассматриваемой методики на нескольких реальных задачах построения аналитических отчетов.

МЕТАДАННЫЕ. МЕТАСИСТЕМА. БАЗА ДАННЫХ. КЛАССИФИКАТОРЫ. СУБД. РЕПОЗИТОРИЙ.

Демуринов В.Б. ЭТАПЫ РАНЖИРОВАНИЯ ПОТРЕБНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА ЭКСПЕРТНЫМ МЕТОДОМ (НА ПРИМЕРЕ СФЕРЫ ГОСТЕПРИИМСТВА).

Приведены этапы ранжирования потребностей человека экспертным методом. Определена система множеств потребностей человека, реализуемых в различных видах деятельности для сферы гостеприимства, и выполнено ранжирование потребностей клиента гостиничного комплекса в зависимости от цели поселения. Предложена матрица потребностей человека для сферы гостеприимства, основанная на взаимозависимости между потребностями и видами деятельности человека.

МАТРИЦА. СФЕРА ГОСТЕПРИИМСТВА. ВИД ДЕЯТЕЛЬНОСТИ. ПОТРЕБНОСТЬ.

Купцов В.Д. ШУМЫ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ.

Исследовано шумовое согласование акустоэлектронных устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) с усилительными каскадами с учетом собственных шумов пьезоплаты. Предложен метод оптимизации радиоэлектронного тракта с использованием акустоэлектронных устройств на ПАВ.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ШУМОВАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА НА ПАВ. ПРОТИВОШУМОВАЯ КОРРЕКЦИЯ. КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА УСТРОЙСТВА НА ПАВ. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОПЛАТЫ И УСИЛИТЕЛЯ. МИНИМИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ФУНКЦИОНАЛА ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ.

Румянцев И.А., Коротков А.С. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МИКРОЭЛЕКТРОННОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ КЛАССА Е С УЧЕТОМ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ.

Представлена методика расчета микроэлектронного усилителя мощности класса Е с учетом паразитных параметров элементов. Рассмотрены особенности построения микроэлектронных усилителей мощности абонентских станций мобильных систем связи третьего поколения.

УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ. КЛАСС Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ. МЕТОДИКА РАСЧЕТА. МОП-ТЕХНОЛОГИЯ.

Эйсмонт Д.В. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫМ КРОВООБРАЩЕНИЕМ С АДАПТАЦИЕЙ ПО ФОРМЕ ПЕРФУЗИОННОГО ИМПУЛЬСА.

Рассмотрена структура системы вспомогательного кровообращения, основанной на подаче крови в организм человека посредством роликового насоса с электрическим приводом и гибкой магистрали.

ИСКУССТВЕННОЕ КРОВООБРАЩЕНИЕ. КОНТРПУЛЬСАЦИЯ. ПЕРФУЗИЯ. РОЛИКОВЫЙ НАСОС. АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ.

Абрамов Н.В. Мухарлямов Р.Г. Мотовилов Н.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЧАПЛЫГИНА.

Исследована задача моделирования динамики неголономных систем Чаплыгина с программными связями. Приведен метод решения обратной задачи качественной теории дифференциальных уравнений и применение его для составления уравнений неголономных программных связей.

ЗАДАЧА МОДЕЛИРОВАНИЯ. НЕГОЛОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ. СИСТЕМА ЧАПЛЫГИНА. ПРОГРАММНЫЕ СВЯЗИ. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ. УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ.

Потапенко Е.А., Солдатенков А.С., Яковлев А.О. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЯ С ЗАВИСИМЫМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ.

Рассмотрены проблемы избыточного теплopotребления зданий с автоматизированными индивидуальными тепловыми пунктами. Исследованы энергосберегающие алгоритмы управления процессом отопления здания по схеме зависимого присоединения на основе разработанной математической модели.

ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ТЕПЛОВОЙ ПУНКТ. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Фирсов А.Н. О СВОЙСТВАХ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ «МЯГКИХ» ПОТЕНЦИАЛОВ.

Исследованы свойства решений кинетического уравнения Больцмана в случае степенного потенциала межмолекулярного взаимодействия с показателем степени меньше четырех.

УРАВНЕНИЕ БОЛЬЦМАНА. МЯГКИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ. НАЧАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ. АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ РЕШЕНИЙ.

Солдатенко Т.Н. ПРОГРАММА ОБСЛУЖИВАНИЯ КОМПЛЕКСА ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗДАНИЯ, ОПТИМАЛЬНАЯ ПО НЕКОЛЬКИМ КРИТЕРИЯМ.

Предложены модели и алгоритм построения программы обслуживания комплекса систем жизнеобеспечения здания при совместном использовании двух критериев оптимальности: максимальной надежности и максимальной экономической эффективности функционирования комплекса. Применена относительная шкала для критериевых функций и метод минимального отклонения от идеальной точки.

ПРОГРАММА ОБСЛУЖИВАНИЯ. СИСТЕМА ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Филичев Е.В., Устинов С.М. РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ВЫСОКОГО УРОВНЯ АБСТРАКЦИИ.

Приведены проблемы наиболее актуальных подходов к разработке ПО с помощью механизмов моделирования. Предложена методика автоматизированной разработки веб-приложений, базирующаяся на использовании моделей высокого уровня абстракции.

РАЗРАБОТКА ПО. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ. CASE СИСТЕМЫ. МЕТА-МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Бородин А.М., Поршнева С.В. АНАЛИТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИНДЕКСОВ В OLAP-СИСТЕМАХ.

Рассмотрены модели эффективности применения пространственных индексов для организации доступа к данным OLAP-систем. Предложены модели эффективности R*-дерева, Ra*-дерева и KDB-дерева. Проведено экспериментальное тестирование модели эффективности R*-дерева на реальных данных.

МНОГОМЕРНЫЕ ДАННЫЕ. OLAP-СИСТЕМЫ. ИНДЕКСИРОВАНИЕ.

Бабкова Е.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ.

Рассмотрено сетевое моделирование, используемое для оценки времени освоения и производства сложных изделий машиностроения.

СЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ГРАФЫ С ВОЗВРАТАМИ. ПАРАМЕТРЫ ГРАФОВ С ВОЗВРАТАМИ. ОСВОЕНИЕ НОВЫХ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ.

Макарова Е.А. МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ.

Предложен метод формирования правил классификации макроэкономических ситуаций и принятия решений при управлении макроэкономической системой (МЭС). Представлены примеры формирования правил классификации ситуаций и принятия решений при управлении МЭС.

МАКРОЭКОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ. САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ КАРТЫ. НЕРАВНОВЕСНЫЕ СИТУАЦИИ. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ.

Сушников В.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОЙ АСИММЕТРИИ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ РАМОЧНОГО ТИПА.

Приведены результаты моделирования степени асимметрии поля механических деформаций в зонах установки тензорезисторов для конструкции упругого элемента типа двойная консольная балка. Дана количественная оценка влияния паразитных моментов на степень асимметрии пиковых значений деформаций.

ДЕФОРМАЦИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ДВОЙНАЯ КОНСОЛЬНАЯ БАЛКА. СТЕПЕНЬ АСИММЕТРИИ.

Васильев А.Ю. РЕДУКЦИЯ МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСОВ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ.

Известно, что применение методов редукции по сингулярным числам Ганкеля к системам с несколькими входами и выходами иногда приводит к неудовлетворительному поведению некоторых аппроксимированных сигналов системы. Для решения этой задачи предложен метод распределения весов.

РЕДУКЦИЯ. СИНГУЛЯРНЫЕ ЧИСЛА ГАНКЕЛЯ. МНОГОМЕРНАЯ СИСТЕМА.

Титов А.В., Харьковской А.А., Чуканов В.О. МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ.

Рассмотрены проблемы оценки параметров надежности в случае редких отказов. Предложена комбинированная модель надежности программного обеспечения ответственного назначения.

НАДЕЖНОСТЬ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ. РЕДКИЕ ОТКАЗЫ. МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ.

Никульский И.Е., Осадчий А.И. ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ IP-ТРАФИКА В КОЛЬЦЕВОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ ДОСТУПА.

Рассмотрена математическая модель IP-ориентированной кольцевой оптической сети доступа на основе оригинального оборудования. Изложены основные результаты исследования характеристик качества обслуживания для речи и данных.

ОПТИЧЕСКАЯ СЕТЬ ДОСТУПА. ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА. СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ.

Нестерова Е.И., Бабкин А.В. МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ).

Цель управления кинематографической системой заключается в таком выборе оптимальных значений частных, обобщенных характеристик и интегральных показателей из соответствующих допустимых множеств, чтобы критерий качества кинопоказа, обеспечиваемый системой в целом, принимал наилучшее значение. Предложены два варианта централизованного управления системой.

КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. КВАЛИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ. ЭКСПЕРТНАЯ КВАЛИМЕТРИЯ.

Верзилин Д.Н., Максимова Т.Г. МОДЕЛИ РЕАКЦИИ СОЦИАЛЬНЫХ СУБЪЕКТОВ НА ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ.

Взаимосвязи между эндогенными переменными, описывающими состояние социальных субъектов, представлены в терминах знаковых графов. Предложен подход к определению зависимостей между переменными на основе факторного и регрессионного анализа. Выполнена интеграция графовых моделей и моделей, описывающих количественные зависимости между переменными.

ЗНАКОВЫЕ ГРАФЫ. МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ СУБЪЕКТОВ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ.

Калинин Т.С., Красий Н.П., Чернов А.В. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА КОНЕЧНЫХ ПОЛЕЙ.

Исследованы дифференциально-логические модели дискретных динамических систем над конечными полями. Предложены новые методы аналитического и численного решений с помощью логических дифференциальных уравнений.

МОДЕЛИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ. ДИСКРЕТНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. КОНЕЧНЫЕ ПОЛЯ. ДИАГНОСТИКА.

Холодных П.В. ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРНО-СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ.

Предложен новый метод конструирования корректных моделей структурно-сложных технических систем в форме логических уравнений, описывающих все функциональные и ресурсные связи в системе. Изложен формализованный метод решения логических уравнений с целью получения функций работоспособности системы для дальнейшего их использования при решении задач анализа качества ее структуры и синтеза алгоритмов реконфигурации при заранее непредсказуемых комбинациях отказов элементов и связей.

СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ. ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ. КРАТЧАЙШИЕ ПУТИ УСПЕШНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ. МИНИМАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ ОТКАЗОВ.

Магомедов А.М. ОБ ОДНОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ РЕБЕРНОЙ 2-РАСКРАСКЕ ДВУДОЛЬНОГО ГРАФА. Рассмотрены условия существования реберной раскраски специального типа для двудольного графа. РЕБЕРНАЯ РАСКРАСКА. ИНТЕРВАЛ. ДВУДОЛЬНЫЙ. ЭЙЛЕР. ГРАФ.

Голландцев Ю.А., Дубенецкий В.А. РАСШИРЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКТА ФУНКЦИЯМИ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.

Статья посвящена рассмотрению архитектуры информационной системы управления проектами, основу которой составляет ресурсная модель управления производственной деятельностью. Обсуждены специальные требования к информационной системе управления, обусловленные особенностями проектирования мехатронных модулей. Предложен архитектурный каркас системы управления проектами.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ. ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЗДЕЛИЯ. АРХИТЕКТУРНЫЙ КАРКАС ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ. ТОЧКИ РАСШИРЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.

Хисамутдинов Р.М. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ИНСТРУМЕНТОВ ЧЕРВАЧНОГО ТИПА ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ.

Рассмотрен один из методов повышения качества механической обработки зубчатых колес. Значительную часть удельных погрешностей зубообработки составляют погрешности, имеющие систематический характер. Существует реальная возможность компенсировать систематическую составляющую технологической погрешности профиля зуба колеса за счет выбора оптимальных конструктивных параметров червяка и параметров его установки относительно зубчатого колеса.

ИНСТРУМЕНТ. ЗУБООБРАБОТКА. ЭВОЛЬВЕНТА. ПОГРЕШНОСТЬ. КОМПЕНСАЦИЯ.

Милославская В.Д., Трифонов П.В. ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ МЯГКОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ КОДОВ РИДА–СОЛОМОНА.

Представлен новый алгоритм мягкого декодирования кодов Рида–Соломона. Предложенный подход представляет собой комбинацию послойного алгоритма, предназначенного для эффективной реализации интерполяционного шага метода Кёттера–Варди и метода Чейза.

КОДЫ РИДА–СОЛОМОНА. ИНТЕРПОЛЯЦИЯ. МЯГКОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ. МЕТОД КЁТТЕРА–ВАРДИ. МЕТОД ЧЕЙЗА. ПЕРЕКОДИРОВАНИЕ.

Матвеев А.В., Иванов М.В., Шевченко А.Б. АЛГОРИТМ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.

Предложен подход экономической оценки при построении системы обеспечения пожарной безопасности. Выявлена закономерность между ресурсами, затраченными на систему пожарной безопасности, и уровнем пожарной опасности на объектах.

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА. УРОВЕНЬ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ. СРЕДСТВА ОПОВЕЩЕНИЯ.

Небылов В.А. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РЕЖИМА ПОСАДКИ МОРСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА.

Предложен алгоритм оптимизации посадочного режима движения гидросамолета или экраноплана в условиях интенсивного морского волнения, обеспечивающий минимальные механические нагрузки при гидродинамическом торможении.

МОРСКОЙ ЛА. КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПОСАДКИ. МОРСКОЕ ВОЛНЕНИЕ.

Дёмин С.В., Купцов В.Д., Валухов В.П., Кателевский В.Я. ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ НА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЯДРАХ КОНДЕНСАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОТРАВЛЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ.

Исследованы особенности газоанализаторов на МоЯК для детектирования отравляющих веществ типа иприт и люизит, вопросы автоматизации газоанализаторов и создания высокочувствительного фотометра для измерения фототока светорассеяния аэрозольными частицами на основе интегратора. Приведены технические характеристики созданных газоанализаторов.

ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ НА МОЯК. ОТРАВЛЯЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА ИПРИТ И ЛЮИЗИТ. МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРЫ ОБЪЕКТОВ ПО УНИЧТОЖЕНИЮ ХИМИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ. КОНДЕНСАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО. ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОБЫ. ИНТЕГРАТОР ФОТОТОКА СВЕТОРАССЕЯНИЯ.

Зубков А.Ф., Деркаченко В.Н., Анцев Д.Л. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО РЫНКА.

Выполнен статистический анализ развития российского рынка страхования. Рассмотрена динамика страховых взносов и построены экономико-математические модели для прогнозирования показателей страхового рынка. Получены прогнозные оценки количества страховых организаций и премий по страхованию.

СТРАХОВАНИЕ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ. АНАЛИЗ.

Богомоллов В.А., Сурина А.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗНАНИЙ.

Рассмотрены модели распространения знаний в организационно-технических системах. Предложено использовать гравитационную модель для оценки уровня распространения знаний в организации.

УПРАВЛЕНИЕ. ЗНАНИЯ. КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ. ОРГАНИЗАЦИЯ. ИННОВАЦИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

ANNOTATION

KEYWORDS

Ivanov A.A., Rubanov D.N., Smirnov A.A. TECHNIQUE OF ELECTRONIC DOCUMENTS CIRCULATION DEVELOPMENT IN AUTOMATED RADIOMONITORING COMPLEXES.

Technique of electronic documents circulation development is offered. Offered technique takes into account the necessities in authority informing about radiomonitoring results and the radiomonitoring conducting specificities.

ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT. RADIOMONITORING. PROTECTION OF DOCUMENTS.

Simonova L.A., Nasyrov I.I. FORMATION OF EXPERT SYSTEM PRECEDENTS BASE AT DIAGNOSING OF COMPLEX EQUIPMENT.

The method of the expert system creation, that knowledge base, consisting of precedents, divided into some levels, is investigated. Rules of precedents base creation are described at diagnosing of ERP complex equipment. The algorithm preliminary clusterization, necessary for creation of rules, is described.

EXPERT SYSTEM. THE KNOWLEDGE BASE. PRECEDENT. CLUSTERIZATION. DIAGNOSTICS. ALGORITHM.

Petrichenko G.S., Dudnik L.N., Sroun M.Y. METHOD OF ASSESSING THE FINANCIAL RISK AT DESIGNING AND INSTALLATION OF THE ENTERPRISE COMPUTER NETWORK.

The article offers a technique of financial risk estimation method at designing and installation of an enterprise computer network. The expert estimation method, hierarchy analysis method and theory of random values are used for stage of works risk calculation. For increase of accuracy of calculation the approach based on decomposition on levels and works is used.

DESIGN STAGES OF THE COMPUTER NETWORK. CRITERIA OF THE CHOICE OF EXECUTORS. EXPERT ESTIMATIONS. HIERARCHY ANALYSIS METHOD. FORECASTING OF FINANCIAL RISK.

Vostrov A.V., Kurochkin M.A. CONFLICT DETECTION IN INTEGRATION OF KNOWLEDGE SYSTEMS IN ONTOLOGY MODELS.

The article proposes a formal definition of a conflict on the basis of 6 items of contradiction classification. The levels of conflict is defined on the basis of which the search of conflict is realized. The proposed method based on using ontology approach for solving the task of knowledge contradiction revealing allows to introduce quality and quantity assessment of conflict depth.

KNOWLEDGE SYSTEMS. ONTOLOGY. CONFLICT IN KNOWLEDGE. ASSESSMENT OF CONFLICT DEPTH.

Butenko I.V. CONSTRUCTION OF ANALYTICAL REPORTS IN INFORMATION SYSTEMS ON THE BASIS OF METADATA.

Described the method of design of Metadata repository for existing Information System and contains appraisal of effectiveness of the strategy applied to some real tasks considering developing analytical reports.

METADATA. METASYSTEM. DATA BASE. CLASSIFIER. DBMS. REPOSITORY.

Demurin V.B. THE STAGES OF RANKING OF HUMAN NEEDS BY EXPERT METHOD (ON THE EXAMPLE OF HOSPITALITY SERVICES).

This article describes the stages of ranking of human needs by expert method. There is offered the system of sets of human needs that are implemented in various activities for hospitality services. The ranking of human needs of the hotel complex's client is done the depending on the purpose of stay at the hotel. The author proposes matrix of human needs for hospitality services. This matrix is based on the relationship between needs and human activities.

MATRIX. HOSPITALITY SERVICES. HUMAN ACTIVITIES. HUMAN NEEDS.

Kuptsov V.D. THE NOISE OF RECEIVING SURFACE ACOUSTIC WAVES ACOUSTOELECTRONIC DEVICES.

The noise matching of surface acoustic waves (SAW) devices with amplifiers subject to own noise piezoelectric substrate is investigated. The optimization method of radioelectronic channel using surface acoustic waves devices.

SURFACE ACOUSTIC WAVES (SAW) DEVICES EQUIVALENT NOISE CIRCUIT. ANTINOISE CORRECTION. SURFACE ACOUSTIC WAVES DEVICES NOISE FIGURE. OPTIMIZATION OF PIEZOELECTRIC SUBSTRATE AND AMPLIFIER PARAMETERS. NONLINEAR FUNCTIONAL MINIMIZATION WITH LIMITATION.

Rumyancev I.A., Korotkov A.S. MICROELECTRONIC CLASS E POWER AMPLIFIER DESIGN PROCEDURE with ALLOWANCE for PARASITIC ELEMENT PARAMETERS.

This paper proposes microelectronic class E power amplifier design procedure with allowance for parasitic element parameters. Peculiarity of microelectronic power amplifiers for 3G communication systems mobile stations is considered. POWER AMPLIFIER. CLASS E. SIMULATION. DESIGN PROCEDURE. MOS-TECHNOLOGY.

Ejsmont D.V. CONTROL SYSTEM OF CARDIOPULMONARY BYPASS WITH ADAPTATION BY BLOOD PULSE FORM.

The article considers a structure of an assist circulation system, based on blood feed to human organism by means of a roller pump with electric drive and flexible tube.

CARDIOPULMONARY BYPASS. CONTRAPULSATION. PERFUSION. ROLLER PUMP. ADAPTIVE CONTROL SYSTEM.

Abramov N.V., Mukharlyamov R.G., Motovilov N.V. PROCESS MODELING OF CONTROL IN THE CHAPLYGIN'S SYSTEM.

The article deals with the problem dynamics modeling of the Chaplygin's non-holonomic systems with programming ties. The inverse problem solving technique of qualitative theory of differential equations and its use for equate of non-holonomic programming ties are performed.

A MODELING PROBLEM. NON-HOLONOMIC SYSTEMS. THE CHAPLYGIN'S SYSTEM. PROGRAM TIES. DIFFERENTIAL EQUATIONS. A MOTION EQUATION.

Potapenko E.A., Soldatenkov A.S., Yakovlev A.O. POWER SAVING ALGORITHMS RESEARCH FOR MANAGEMENT BY HEATING PROCESS OF THE BUILDING WITH THE DEPENDENT HEAT SUPPLY.

In article are considered problems superfluous heat consumption by buildings with the automated individual thermal points. The power saving algorithms of the management heating process by a building are investigated under the dependent joining scheme based on the developed mathematical model.

THE INDIVIDUAL THERMAL POINT. THE AUTOMATIC CONTROL. THE MATHEMATICAL MODELLING.

Firsov A.N. ON SOME PROPERTIES OF SOLUTIONS OF THE BOLTZMANN EQUATION IN THE CASE OF «SOFT» POTENTIALS.

It is shown, that in the case of «soft» potentials the Cauchy problem for the Boltzmann equation of the kinetic theory of gases permits, as opposed to the case of the «hard» potentials, the existence of «long living» initial perturbations.

BOLTZMANN EQUATION. SOFT POTENTIALS. INITIAL PERTURBATIONS. ASIMPTOTIC BEHAVIOR OF SOLUTIONS.

Soldatenko T.N. THE PROGRAM OF THE COMPLEX OF LIFE-SUPPORT OF THE BUILDING, OPTIMUM BY SEVERAL CRITERIA.

In article models and algorithm of construction of the maintenance program of a complex of life-support systems of a building are offered at sharing of two criteria of an optimality: the maximum reliability and the maximum economic efficiency of functioning of a complex. Feature of work is application of a relative scale for criterion functions and a method of the minimum deviation from an ideal point.

MAINTENANCE PROGRAM. LIFE-SUPPORT SYSTEM. SIMULATION. OPTIMIZATION.

Filichev E.V., Ustinov S.M. DEVELOPING WEB APPLICATIONS USING HIGH-LEVEL ABSTRACTION MODELS.

This article briefly describes problems of most actual technologies of software development based on modeling mechanisms. The result of this analysis is new methodic of automated web application development using high-level abstraction models.

SOFTWARE DEVELOPMENT. MODELING. WEB APPLICATIONS. CASE SYSTEMS. META-MODELING.

Borodin A.M., Porshnev S.V. ANALYTICAL METHODS FOR ESTIMATING AGGREGATING QUERY COST IN OLAP-SYSTEMS BASED ON SPATIAL INDEXING.

This paper overviews performance models of spatial indexing in OLAP-systems. Proposed models for estimating R*-tree, Ra*-tree and KDB-tree query performance. R*-tree model is tested on real data to proof concept of models.

MULTIDIMENSIONAL DATA. OLAP-SYSTEMS. INDEXING.

Babkova E.V. MODELING MANUFACTURE'S COMPLICATED PRODUCTS PARAMETERS BY NETWORK'S TECHNOLOGY.

The paper regards the network's modeling for manufacture's complicated products parameters of machine-building.

NETWORK'S MODELING. RETURN GRAFS. PARAMETERS OF RETURN GRAFS. PRODUCED THE NEW MANUFACTURE'S PRODUCTS.

Makarova E.A. THE METHOD OF FORMATION OF INTELLECTUAL ALGORITHMS FOR MACROECONOMIC SYSTEM MANAGEMENT WITH SIMULATION MODELS APPLICATION.

Method of formation of macroeconomic situation classification rules and decision making rules for macroeconomic system management is presented in the article. Examples of formation of classification and decision making rules for macroeconomic system management are presented.

MACROECONOMIC SYSTEM. NEURAL NETWORKS. SELF-ORGANIZING MAPS. NON-EQUILIBRIUM SITUATION. SIMULATION MODEL.

Sushnikov V.A. MODELLING OF ELASTIC ASYMMETRY OF THE WEIGHT MEASURING CELL OF FRAME TYPE.

In article results of modeling of degree of asymmetry of a field of mechanical deformations, in installation zones electrical resistance strain gage, for a design of an elastic element of type a double console beam are resulted. The quantitative estimation of influence of the parasitic moments on degree of asymmetry of peak values of deformations is given.

DEFORMATION. MODELLING. THE DOUBLE CONSOLE BEAM. ASYMMETRY DEGREE.

Vasilyev A.Y. MIMO SYSTEM REDUCTION BASED ON INPUT AND OUTPUT WEIGHT DISTRIBUTION.

It is known that application of model reduction methods based on Hankel singular values to MIMO systems sometimes results in inadequate behavior of some approximated system signals. In order to solve this problem the weight distribution method is proposed.

REDUCTION. HANKEL SINGULAR VALUES. MIMO SYSTEM.

Titov A.V., Kharkovoy A.A., Chukanov V.O. RELIABILITY MODELS OF HIGH-DUTY SOFTWARE SYSTEMS.

The article covers problems of the reliability parameters estimation in case of rare events. Combined reliability model of high-duty software systems was also proposed here.

SOFTWARE RELIABILITY. RARE EVENTS. RELIABILITY MODELS.

Nikulsky I.E. Osadchy A.I. ESTIMATION OF THE CHARACTERISTICS OF QUALITY OF SERVICE OF THE IP-TRAFFIC IN A RING OPTICAL ACCESS NETWORK.

In clause the access model on the basis of the original equipment is considered. The basic results of research of the characteristics of quality of service for voice and data are stated.

OPTICAL ACCESS NETWORK. CHARACTERISTICS OF QUALITY OF SERVICE OF THE TRAFFIC. QUEUNING SYSTEMS. ANALYTICAL AND IMITATING MODELS.

Nesterova E.I., Babkin A.V. MODELS AND ALGORITHMS FOR QUALITY MANAGEMENT OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEM (FOR EXAMPLE OF CINEMATOGRAPHIC SYSTEMS).

The purpose of cinematic system management is a choice of such optimal values of partial, generalized characteristics and integral parameters of the respective feasible sets to test the quality of cinema by the system as a whole, taking the best value.

CINEMATIC SYSTEM. QUALITATIVE CHARACTERISTICS. INTEGRAL PARAMETERS. EXPERT QUALIMETRY.

Verzilin D.N., Maximova T.G. MODELS OF SOCIAL ACTORS' REACTION ON EXTERNAL IMPACTS.

The interrelations between endogenous variables describing the state of social actors were presented in the terms of a signed graph notion. An approach to establishing quantitative inter-variable dependence via regression and factor analysis was proposed. The integration of graph and quantitative models was fulfilled.

SIGNED GRAPHS. SOCIAL ACTORS BEHAVIOR. STATISTICAL ANALYSIS.

Kalinin T.S., Krsiy N.P., Chernov A.V. DIFFERENTIAL-LOGIC FAULT MODELS OF DISCRETE SYSTEMS OVER FINITE FIELDS.

In article it is researched is differential-logic models of the discrete dynamic systems over finite fields. New methods of analytical and numerical decisions by means of logical differential equations are offered.

FAULT MODELS. DISCRETE DYNAMIC SYSTEMS. FINITE FIELDS. DIAGNOSIS.

Kholodnykh P.V. LOGICAL-MATHEMATICAL MODEL OF STRUCTURAL-COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS AND IT'S APPLICATION.

A new method for constructing correct models of structurally complex technical systems in the form of logical equations that describe all the functional and resource links in the system is proposed. It is presented a formalized method of solving logical equations to obtain the functions of the system performance for their further use in solving problems of quality analysis of its structure and synthesis of algorithms for reconfiguration in advance of unpredictable combinations of failures of elements and links.

STRUCTURALLY COMPLEX SYSTEMS. LOGICAL-MATHEMATICAL MODEL. LOGICAL CONDITIONS OF EFFICIENCY. SHORTEST PATH OF SUCCESSFUL FUNCTIONING. MINIMUM CUT OF FAILURES.

Magomedov A.M. ON SPECIAL EDGE 2-COLORING OF BIPARTITE GRAP.

For bipartite graph $G = (X, Y, E)$, where the degree of any vertex in X is equal to 2, the conditions for the existence of special type edge-coloring are considered.

EDGE COLORING. INTERVAL. BIPARTITE. EULER. GRAPH.

Gollandzev Y.A., Dubeneckii V.A. INFORMATION MODEL EXTENSION USING STATE MANAGEMENT OF ENGINEERING OBJECTS.

This article reviews project management information system architecture, which is based on resource model for managing production activity. Management information system special requirements are being discussed, due to mechatronic modules development particular features. Project management system's architectural carcass is being suggested.

PROJECT MANAGEMENT INFORMATION SYSTEMS. PRODUCT LIFECYCLE. PROJECT MANAGEMENT SYSTEM'S ARCHITECTURAL CARCASS. MANAGEMENT SYSTEM'S EXTENSION POINTS.

Khisamutdinov R.M. AUTOMATION ACCOUNT IN DETERMINING OF PARAMETRES OF «WORM» TYPE TOOL FOR SYSTEMATIC COMPONENT EQUALIZATION.

Considered one of the methods to improve the quality of machining gear. A significant proportion of errors are errors of gear treatment with systemic and there is a real opportunity to compensate for the systematic component technology tooth profile error of the wheel due to the choice of optimal design parameters of the worm and its setup parameters concerning gear.

TOOL. GEAR PROCESSING. EVOLVENT. MEASURE OF INACCURACY. EQUALIZATION.

Miloslavskaya V.D., Trifonov P.V. HYBRID SOFT DECISION DECODING ALGORITHM FOR REED-SOLOMON CODES.

A novel soft-decision decoding algorithm for Reed-Solomon codes is presented. Its error-correction capability is shown to be higher than the one of Koetter-Vardy algorithm. The proposed algorithm is based on a combination of the layered algorithm, which provides efficient implementation of the interpolation step of the Koetter-Vardy method, and Chase method.

REED-SOLOMON CODE. INTERPOLATION. SOFT DECISION DECODING. KOETTER-VARDY METHOD. CHASE-TYPE DECODING. REENCODING.

Matveev A.V., Ivanov M.V., Shevchenko A.B. ALGORITHM OF TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS FOR SUPPORT SYSTEM OF FIRE SAFETY.

In this article authors propose the calculation's methods of an economic estimation for construction variants of support system of fire safety. Functional dependence between the resources spent for system of fire safety and level of fire danger is received.

FIRE SAFETY. ECONOMIC ESTIMATION. LEVEL OF FIRE DANGER. NOTIFICATION MEANS.

Nebylov V.A. ALGORITHM OF ASSESSMENT FOR SEAPLANE LANDING DIRECTION.

Seaplane or ekranoplane landing direction optimization criteria is suggested which takes into account the rough sea conditions and provides the minimal mechanical strain at hydrodynamic braking.

SEAPLANE. OPTIMIZATION CRITERIA OF LANDING DIRECTION. SEA CONDITIONS.

Demin S.V., Kuptsov V.D., Valjukhov V.P., Katelevski V.J. THE MOLECULAR CONDENSATION NUCLEUS GAS ANALYZERS FOR DETERMINATION OF TOXIC SUBSTANCES CONCENTRATION.

The features of molecular condensation nucleus (MCN) gas analyzers for toxic yperite and lewisite substances determination are investigated in the article. The questions of gas analyzers automation and creation of highly sensitive photometer for aerosol particles lights scattering photocurrent measurement based on integrator are described. The technical characteristics of MCN gas analyzers are described in the article.

MOLECULAR CONDENSATION NUCLEUS (MCN) GAS ANALYZERS. TOXIC SUBSTANCES YPERITE AND LEWISITE. AIR MONITORING OF CHEMICAL WEAPON STOCKPILES DESTRUCTION OBJECTS. CONDENSATION DEVICE. SAMPLE SEPARATION BY GAS CHROMATOGRAPHY. INTEGRATOR OF LIGHT SCATTERING PHOTOCURRENT.

Zubkov A.F., Derkachenko V.N., Antsev D.L. STATISTICAL THE ANALYSIS AND FORECASTING OF DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN MARKET.

A statistical analysis of the Russian insurance market was made. The dynamics of the insurance payments was considered and an economic-mathematical models to predict the performance of the insurance market were build. Forecasting estimations of the number of insurance companies and insurance premiums were received.

INSURANCE. FORECASTING. REGRESSION THE ANALYSIS. THE ANALYSIS.

Bogomolov V.A., Surina A.V. USING OF MODEL IN KNOWLEDGE DISTRIBUTION ASSESSMENT.

Some models of knowledge distribution in an organization are considered in the article. Gravity model are proposed for modeling and management the process of knowledge distribution.

MANAGEMENT. KNOWLEDGE. COMPETITIVENESS. ORGANIZATION. INNOVATION. MODELLING.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГУ

№ 2 (120) 2011

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция журнала

д.э.н., профессор, канд. техн. наук *А.В. Бабкин* – научный редактор

Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор

Т.А. Борисова – 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 27.04.2011. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 27,0. Уч.-изд. л. 27,0. 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.