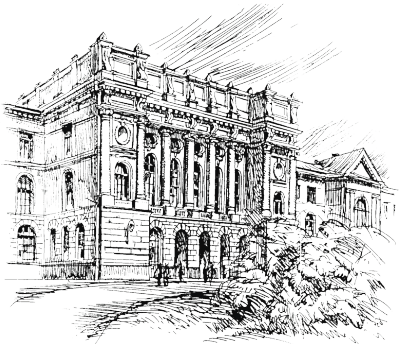
6(113)/2010



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;
Давыденко М.О., технический секретарь;
Карпов Ю.Г., д-р техн. наук, профессор;
Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор;
Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор;
Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор;
Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор;
Шабров Н.Н., д-р техн. наук, профессор.

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

Проблемы передачи и обработки информации

Токарев Ю.П. *Применение линии передачи данных для управления беспилотным летательным аппаратом.* 7

Бендерская Е.Н., Жукова С.В. *Анализ фрактальности в хаотической нейронной сети с фрагментарной синхронизацией.* 10

Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

Ветров Ю.В., Завьялов С.В. *Помехоустойчивость приема информационных символов, встроенных в цифровые изображения* 19

Мельников П.Н., Терпигорев М.А., Симонов С.Б. *Восстановление полиномиального сигнала с помощью фильтра, построенного на динамическом звене произвольного порядка* 27

Купцов В.Д., Валюхов В.П. *Чувствительность фотоприемных устройств волоконно-оптических линий связи* 31

Системный анализ и управление

Смольникова М.А. *Структура системы предотвращения столкновения воздушного судна с земной поверхностью* 37

Гузаиров М.Б., Костюкова А.П. *Система управления эксплуатационными рисками сложносвязных нагревательных объектов* 40

Ростов Н.В. *Последовательная многокритериальная параметрическая оптимизация регуляторов нелинейных систем автоматического управления* 44

Салангин А.А. *Об одном подходе к решению задач разработки и реализации проектов создания новой техники* 50

Токарев Ю.П., Макеев М.И., Юмаев К.Р. *Построение комплекса управления беспилотными летательными аппаратами с использованием стандартных компонент* 56

Тарасов С.Д. *Современные методы автоматического реферирования* 59

Фирсов А.Н. *Метод моментов в теории обобщенных функций и его приложения в задачах системного анализа и управления. Основы теории* 74

Бискуб К.Н., Писарев А.И. *Математическая модель охлаждения технологических газов плавильных электропечей* 81

Вычислительные машины и программное обеспечение

Соловьев В.И., Ильина Н.А. *Равновесие Штакельберга в модели взаимодействия производителей аппаратного и программного обеспечения* 87

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Матвеев А.В., Иванов М.В., Шевченко А.Б. *Аналитическая модель системы управления пожарной безопасностью АЭС* 92

Атрощенко В.А., Шевцов Ю.Д., Дьяченко Р.А., Брагин Н.А. *К вопросу диагностики двигателя ДЭС по параметрам частотных характеристик масляного очистителя* 96

Блохин Ю.В. *Модель системы технического зрения дистанционно управляемых подвижных объектов* 101

Букка Е.С., Кочкаров Р.А. *Параллельный алгоритм поиска внутреннего центра предфрактального графа* 106

Рубежная И.Н., Кочкаров Р.А. *Параллельный алгоритм раскраски предфрактального графа, порожденного множеством затравок* 109

Аникин И.В. *Технология интеллектуального анализа данных для выявления внутренних нарушителей в компьютерных системах* 112

Габдрахманов А.А., Габдрахманова Н.Т. *Нейросетевая прогнозная модель интенсивностей самоподобного трафика телекоммуникационной сети с пакетной передачей данных* 117

Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. *Коррекция погрешности решения дифференциальных уравнений второго порядка* 121

Прокопенко А.С., Тормасов А.Г. *Аксиоматический метод верификации на основе декомпозиции состояний в методе RGSEP* 127

Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. *Коррекция погрешности решения уравнения гармонического осциллятора методом последовательного интегрирования* 135

Приборы, информационно-измерительные системы

Купцов В.Д., Кянджециан Р.А., Кателевский В.Я., Валюхов В.П. *Газоанализаторы на основе эффекта молекулярных ядер конденсации* 145

Электроника, технологии производства материалов электронной техники

Чернышев А.Б., Антонов В.Ф., Шураков Д.Л. *Система стабилизации температурного поля в процессе утилизации тепла при контактной сварке* 151

Константинов Ю.А., Крюков И.И., Поскребышев М.М., Харламова Н.А. *Телевизионная система измерения размеров заготовки волоконных световодов в ходе процесса химического парофазного осаждения* 155

Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

Сороцкий В.А. *Активизация познавательной деятельности обучающихся средствами информационно-образовательной среды университета* 159

Ветринский Ю.А. *Использование средств электронного обучения в общеобразовательной школе* 164

Моисеев В.Б., Зубков А.Ф., Деркаченко В.Н. *Прогнозирование успеваемости студентов по общепрофессиональным и специальным дисциплинам на основе регрессионных моделей* 169

Сведения об авторах 174

Аннотации 178

Contents

Problems of transfer and information processing

Tokarev Y.P. *Application data link to control unmanned aerial vehicles* 7

Benderskaya E.N., Zhukova S.V. *Fractal analysis of fragmentary synchronization produced by chaotic neural network* 10

Radio engineering, aerials, SHF devices

Vetrov U.V., Zavyalov S.V. *Noise stability of reception of the information symbols which have been built in digital images* 19

Melnikov P.N., Terpigorev M.A., Simonov S.B. *Restoring polynomial signal using filter built on the dynamic element of arbitrary order* 27

Kuptsov V.D., Valjuchov V.P. *Sensitivity of photoreception devices fiber-optic communication lines* 31

The system analysis and management

Smolnikova M.A. *Structure of preventing collision of aircraft with the earth's surface* 37

Guzairov M.B., Kostyukova A.P. *Operating risk control system of multilinked heating objects* 40

Rostov N.V. *Sequential multiobjective parametrical optimization of controllers for nonlinear control system* 44

Salangin A.A. *About some approach to the problem solution development and realization of projects of creation new technology* 50

Tokarev Y.P., Makeyev, M.I., Yumaev K.R. *Construction sector management unmanned aerial vehicles with use of standard components* 56

Tarasov S.D. *Modern methods of automatic text summarization* 59

Firsov A.N. *Moments method in generalized functions theory and its applications to system analysis and control. Foundation of the theory* 74

Biskub K.N., Pisarev A.I. *Mathematical model of cooling of technological gases of melting electric furnaces* 81

Computers and the software

Soloviev V.I., Iliina N.A. *Stackelberg equilibrium in a model of hardware and software manufacturers' interaction* 87

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

Matveev A.V, Ivanov M.V, Shevchenko A.B. *Analytical model of a control system of fire safety on the atomic power stations* 92

Atroshchenko V.A, Shevtsov J.D., Djachenko R.A., Bragin H.A. *To the question of diagnostics of engine des on parameters of frequency characteristics of the oil cleaner* 96

Blokhin Y.V. *Model of system of technical sight remote control mobile objects* 101

Bukka E.S., Kochkarov R.A. *Parallel algorithm of searching prefractal graph's internal centre* 106

Rubegnaya I.N., Kochkarov R.A. *The parallel algorithm of coloring mops of prefractal graph, which was creation of many forms* 109

Anikin I.V. *Technology of intelligent data analysis for detecting insiders in computer systems* 112

Gabdrakhmanov A.A., Gabdrakhmanova N.T. *A modelling of intensity of self-similary traffic of telecommunication network with packet transmission of data* 117

Zhukov K.G., Butusov D.N. *Correction of the error of the decision of the differential equations of the second order* 121

Prokopenko A.S., Tormasov A.G. *Verification method based on decomposition of states in rely-guarantee/sep logic* 127

Zhukov K.G., Butusov D.N. *The method of correction of the classical solutions of the differential equation of harmonic oscillator* 135

Devices, information-measuring systems

Kuptsov V.D., Kjandzhetsian R.A., Katelevski V.J, Valjuchov V.P. *Gas analyzers based on molecular condensation nuclei effect* 145

Electronics, technologies of producing the materials of electronic technics

Chernyshev A.B., Antonov V.F., Schurakov D.L. *System of stabilisation of temperature field in the heat when the contact welding* 151

Konstantinov J.A., Kryukov I.I., Poskrebyshev M.M, Harlamova N.A. *Television system of measurement of the sizes of preparation of fiber optical paths during process of chemical vapor-phase sedimentation* ... 155

Information and telecommunication technologies in formation

Sorotsky V.A. *Intensification of learners cognitive function using facilities of university informational and educational environment* 159

Vetrinsky Y.A. *Use of e-learning means at high school* 164

Moiseev V.B., Zubkov A.F., Derkachenko V.N. *Forecasting of progress of students on the general professional and special disciplines on a basis regress models* 169

About the authors 174

Abstracts 178

УДК 608.4.

Ю.П. Токарев

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

При создании системы удаленного управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) в первую очередь возникает задача отыскания рационального решения, учитывающего, с одной стороны, параметры линии передачи данных (ЛПД) и, с другой, требования БПЛА к характеристикам сигналов управления, передаваемых по ЛПД. В настоящее время существует большое количество разнообразных классов БПЛА, различающихся областью их применения, динамическими характеристиками и способами управления [I]. Характеристики ЛПД режима 4 строго определены [2]. Отсюда следует, что для решения задачи из всего разнообразия необходимо выбрать тот класс БПЛА, для управления которым радиолиния АЗН-В режима 4 подходит по своим характеристикам.

Известно, что задержка в контуре управлении БПЛА может быть критичной для устойчивости управления. Поэтому необходимо уделить внимание именно этой характеристике линии передачи данных. Основные причины, вызывающие задержку прохождения сигнала через весь контур управления, − пропускная способность канала и квантование по времени сигналов управления.

Пропускная способность канала определяется пропускной способностью самого медленного сегмента в контуре управления. В случае радиоуправления объектом с использованием ЛПД режима 4 этим узким местом как раз и является радиолиния [2, 4]. Пропускная способность ЛВС в комплексе управления на порядки выше (десятки Мбит/с), сопряжение с ЛПД режима 4 на борту БПЛА происходит непосредственно в блоке радиостанции по высокоскоростной шине данных. Скорость передачи данных по радиолинии режима 4 составляет 19200 бит/с. Вследствие временного разделения канала (разбиения каждой секунды на слоты вещания) и необходимости оформления каждого слота в виде цифрового пакета с заголовком и контролем целостности данных, в каждом слоте вещания (а их в секунде 75) может быть передано порядка 200 бит полезной информации. Исходя из того, что в стандартном режиме работы ЛПД режима 4 каждому участнику радиообмена выделяется не более 1 слота/с, можно говорить об ограничении пропускной способности канала сверху скоростью 200 бит/с. Также следует обратить внимание на то, что данная скорость является усредненным значением, поскольку информационный пакет передается в течение 13,5 мс, а в остальное время радиоканал предоставляется для использования другими участниками радиообмена. Таким образом, при проектировании системы управления можно рассчитывать на быструю доставку коротких команд управления, быструю доставку коротких информационных пакетов, содержащих данные о состоянии управляемого объекта, с обязательным учетом такого ограничения, как невозможность одновременной непрерывной передачи большого объема данных.

Все множество различных вариантов управления [3] БПЛА можно разделить на несколько основных классов. В контуре управления БПЛА сразу выделим два основных элемента. Первый − исполнительный, т. е. это сам планер с силовой установкой и рулевые механизмы. Второй − командный. Это тот элемент, который ставит задачу на полет, принимает решение в случае необходимости изменить программу полета, выполняет коррекцию движения летательного аппарата при его отклонениях от заданной траектории движения. В схеме классического управления пилотируемым летательным аппаратом этим элементом является пилот. Он непосредственно на борту летательного аппарата и в полном объеме полу-

чает информацию о параметрах полета и также непосредственно может воздействовать на исполнительный элемент (через органы управления летательным аппаратом). При построении комплекса управления БПЛА командный элемент или его часть выносится за пределы летательного аппарата и связывается с исполнительным элементом линией передачи. В зависимости от того, какая часть командного элемента отделяется от летательного аппарата, и образуется определенный класс управления БПЛА. Далее будем рассматривать расположение командного элемента на удаленном пункте управления. Обычно на нем располагается оператор управления и аппаратура для наблюдения за БПЛА и для передачи на БПЛА команд управления от оператора.

Первый способ управления − пилотажный. В этом случае управление идет непосредственно исполнительными механизмами планера. С пункта управления передаются заданные углы отклонения рулевых аэродинамических плоскостей и режимы работы силовой установки (тягового двигателя). Очевидно, что для БПЛА с высокоскоростными характеристиками и высокой маневренностью требуется очень быстрая доставка команд управления с пункта управления на борт, а также быстрая доставка информации о пространственном положении планера. Такое управление организовать при использовании ЛПД режима 4 весьма проблематично.

Второй способ управления подразумевает наличие на борту БПЛА пилотажно-навигационного комплекса (ПНК). В его задачу и входит пилотажное управление. ПНК летательного аппарата способен управлять рулями планера и тягой силовой установки для устойчивого полета аппарата в воздухе, а также для выполнения предопределенных маневров. Такая схема управления применима для решения определенного класса задач при помощи БПЛА. Далее будем рассматривать именно этот класс БПЛА. Возникает задача формирования команд для ПНК.

Требования к временным задержкам и пропускной способности командного канала в десятки раз меньше, чем к контуру пилотажного управления. При стабильном выдерживании ПНК заданных режимов полета время между управляющими командами в данном канале сравнимо с временем исполнения предопределенных маневров. Для рассматриваемого класса БПЛА время переходных процессов между устойчивыми режимами полета (например, горизонтальным полетом и разворотом или набором высоты и снижением) находится в пределах нескольких секунд (1−3 с). Соответственно, в управляющем командном канале для предсказуемого и устойчивого управления достаточно передавать команды не чаще, чем раз в несколько секунд. Данные требования по частоте передачи радиолиния режима 4 гарантированно удовлетворяет. Также ЛПД режима 4 удовлетворяет требованиям по пропускной способности канала. Управляющие команды кодируются короткими сообщениями. Достаточно одного байта для кодирования набора из 256 предопределенных команд управления ПНК.

Для передачи на пункт управления состояния летательного аппарата и его пространственного положения, также достаточно временных и скоростных характеристик ЛПД режима 4. Оператору управления не требуется совершать корректирующие действия чаще, чем раз в несколько секунд. Не требуется компенсировать отклонения летательного аппарата от заданного режима полета (эту задачу решает ПНК на борту БПЛА). Эксперименты как лабораторные, так и натурные показали, что в пилотажном канале проходят десятки команд в секунду, в то время как в командном канале фиксируется прохождение одной команды в 3−5 с. При этом удовлетворяются требования по выдерживанию допустимых отклонений от заданной траектории полета летательного аппарата. Становится очевидным, что радиолиния режима 4 пригодна для организации командного управления БПЛА.

Командное управление позволяет реализовать также и более сложную и эффективную схему по управлению БПЛА: программное управление. Для пояснения эффективности программного управления рассмотрим некоторые недостатки командного. Наглядным примером может служить выполнение аппаратом разворота. С наземного пункта управления для аппарата, выполняющего прямолинейный горизонтальный полет, передается команда на совершение разворота. ПНК устанавливает режим крена, и аппарат входит в разворот. Оператор контролирует местоположение и ориентацию аппарата и в нужный момент дает команду на выход в прямолинейный полет. Между фиксированием бортовой аппаратурой местоположения и углов ориентации планера и отображением этих параметров на экране пункта управления, а также

между выдачей оператором команды и приемом ее на борту, проходит некоторое время. Оно складывается как из фиксированной задержки (обусловленной квантованием по времени в канале и прочими систематическими задержками в контуре), так и из случайной задержки. Природа случайной задержки состоит, во-первых, в возможности пропадания в эфире информационного пакета. При пропадании одного пакета задержка увеличивается на 1 с (в стандартном режиме работы ЛГТД режима 4). Это возможно вследствие наличия помех в радиоэфире. Во-вторых, передача информационного пакета происходит хотя и с определенным периодом (раз в секунду), но положение его в пределах этого интервала времени оператору неизвестно (и оно в процессе работы канала может меняться). Таким образом, по этой причине разница во времени между двумя сгенерированными командами на комплексе управления и разница между этими же принятыми командами на борту БПЛА теоретически может различаться на время до 2 с в максимуме. При наличии помех в эфире это время случайным образом также может быть увеличено. Применительно к рассматриваемому классу БПЛА задержка в 2 с при совершении разворота приводит к погрешности в установке направления аппарата до 5–10°.

Задать фиксированное время между управляющими командами можно путем посылки этих команд с привязкой их к абсолютному времени. При генерации такого набора команд в установившемся режиме полета можно с достаточной точностью спрогнозировать положение летательного аппарата на время выполнения маневра и после него. Этот набор команд с привязкой ко времени и называется *программой*. При выработке таких задач для программного управления в комплексе должны учитываться задержки в канале АЗН при передаче данных. Иными словами, объекту не должна ставиться задача, которую он не сможет выполнить, т. к. момент для начала выполнения программы наступает раньше, чем данная программа будет принята. Из моделирования контура управления и из реальных полетов была установлена верхняя граница для времени упреждения генерации программы. При времени начала исполнения первой команды не ранее чем через 4 с после ее генерации па комплексе управления обеспечивается доставка программы на борт вовремя и выдерживаются заданные для данного класса БГТЛА отклонения от заданной траектории полета.

На пункте управления [4] известны характеристики движения БПЛА в каждом из режимов полета. Соответственно, появляется возможность прогнозировать его движение на некоторое время вперед. Это позволяет создавать программы, содержащие несколько команд управления протяженностью в несколько десятков секунд.

При случайном отклонении аппарата от заданной траектории (из-за воздушных возмущений), которые не могут быть скомпенсированы ПНК, комплекс управления способен выработать новую скорректированную программу управления для устранения отклонений. Данные коррекции также удовлетворяют требованиям по выдерживанию допустимых отклонений от заданной траектории полета.

Комплекс с программным управлением, реализованным на ЛПД режима 4, становится устойчивым в работе с достаточно зашумленным эфиром. Программное управление допускает несколько большее количество пропаданий информационных пакетов, поскольку в этом случае на борт передаются только корректирующие программы. При нормально работающем ПНК и допустимых атмосферных возмущениях достаточно передачи корректирующей программы на борт раз в 10–15 с. Становится очевидным, что ЛПД режима 4 позволяет осуществлять радиоуправление рассматриваемым классом БПЛА. К тому же, имеется возможность одновременного управление сразу несколькими аппаратами.

Помимо программного управления рассмотрим еще один способ управления, который назовем *навигационным*. В нем управление аппаратом осуществляется не передачей ему команд для исполнения маневров, а путем задания точек маршрута относительно земной поверхности. Данный способ управления требует переноса части вычислений с пункта управления на борт летательного аппарата. Все вычисления по обнаружению отклонений в движении от заданной траектории выполняются уже на борту. Соответственно, еще больше снимается нагрузка с радиолинии. По ней теперь передаются только изменения навигационной программы (изменение маршрута движения относительно ранее запланированного). В этом случае при возникновении каких-либо отклонений от заданной траектории навигационный вычислитель способен сам без участия внешнего пункта управления выработать набор команд для коррекции движения. Такой способ позволяет вы-

полнять и управление группой, т. к. коррекция местоположения в строю тоже будет выполняться бортовыми комплексами. Однако данное управление повышает требования к аппаратуре навигационного вычислителя (к памяти, производительности и сложности программного обеспечения).

Проведенный выше анализ показывает возможность использования радиолинии АЗН-В режима 4 в качестве командного канала для управления полетом определенным классом БПЛА. Существенное достоинство применения данной ЛПД – повышение безопасности полетов [4]. Действительно, принцип построения систем автоматического зависимого наблюдения вещательного режима позволяет на борту каждого летательного аппарата (пилотируемого и беспилотного), оснащенного ЛПД АЗН-В, и пунктов управления (БПЛА и УВД) получить полную информацию обо всех объектах, контролируемых в области полетов. Таким образом, применение ЛПД АЗН-В режима 4 позволяет сделать шаг к использованию БПЛА в зонах полетов авиации общего назначения, что существенно расширит круг выполняемых БПЛА задач при сохранении высокого уровня безопасности полетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сурков, А.М.** Беспилотные летательные аппараты [Текст]/А.М. Сурков//Aero Business. –1998. –№1. –С. 35–37

2. Minimum Aviation System Performance Standards For Automatic DependentSurveillance Broadcast (ADS-B). RTCA/DO-242A. [Текст]/RTCA, Inc. 2002. (Минимальные требования стандартов к характеристикам авиационных систем – автоматическое зависимое наблюдение в вещательном режиме (АЗН-В).

3. **Кулик, А.С.** Проблематика разработки перспективных малогабаритных летающих роботов [Текст]/А.С. Кулик, А.Г. Гордин, В.В. Нарожный [и др.]. –Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». –Украина, 2006. –33 с.

4. **Ахмедов, Р.М.** Автоматизированные системы управления воздушным движением. Новые информационные технологии в авиации: Учеб. пособие[Текст]/Р.М.Ахмедов, А.А.Бибутов, А.В.Васильев [и др.]; Под ред. С.Г.Тятко, А.И.Красова.–СПб.:Политехника, 2004.–444 с.

УДК 004.8.032.26, 681.513.8

Е.Н. Бендерская, С.В. Жукова

АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНОСТИ В ХАОТИЧЕСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ФРАГМЕНТАРНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

Феноменология хаотических нейронных сетей все чаще становится объектом исследования. Выявление условий возникновения коллективной динамики в системе взаимосвязанных хаотических осцилляторов, проявляющейся в форме внутренней синхронизации отдельных элементов в отсутствии внешнего управляющего воздействия, является актуальной задачей. Ее решению посвящены многие научные междисциплинарные проекты ведущих университетов мира, т. к. эффект сохранения стабильности синхронных кластеров при условии нестабильности динамики каждого из нейронов может быть использован во множестве приложений при решении различных задач кластеризации [1, 2]. Поскольку колебательные кластеры по своему составу не зависят от начальных условий, то под странным аттрактором понимается синхронный кластер [3, 4].

В подавляющем большинстве научных работ рассматриваются гомогенные хаотические сети с одинаковой силой связи между нейронами. Такое структурное упрощение позволяет значительно снизить сложность исследования динамики сотен взаимосвязанных хаотических элементов в системе. При этом задача решается методами компьютерного моделирования и сводится к установлению факта перехода колебательной системы в тот или иной синхронный режим в зависимости от силы связи между нейронами. Однако при таком подходе практическая значимость частных

решений остается под вопросом. Более ценным оказывается обобщение результатов имитационного моделирования гетерогенных хаотических нейронных сетей [3–6].

В данной статье рассматривается фрагментарная синхронизация фрактальных волн, генерируемых гетерогенной хаотической нейронной сетью большой размерности; обнаружена фрактальность структуры синхронных кластеров. Предлагается использовать фрактальность колебательной динамики для снижения вычислительной сложности предложенного в [7, 8] алгоритма кластеризации.

Обнаружение макроскопического аттрактора

Исследуемая хаотическая нейронная сеть (ХНС) представляет собой однослойную рекуррентную сеть, в которой элементы связаны «каждый с каждым», без образования связи «сам на себя»:

$$y_i(t+1) = \frac{1}{C_i}\sum_{i\neq j}^{N} w_{ij} f(y_i(t)),\ t = 1...T, \qquad (1)$$

$$f(y(t)) = 1 - 2y^2(t), \qquad (2)$$

$$w_{ij} = \exp(-|x_i - x_j|^2 / 2a^2), \qquad (3)$$

где $C_i = \sum_{i\neq j} w_{ij}$, $i, j = \overline{1, N}$, a – масштабирующая константа, вычисляемая по алгоритму, представленному в [8]; W_{ij} – сила связи (весовой коэффициент) между i и j нейронами; N – число нейронов (число точек-объектов во входном изображении); T – время моделирования. После переходного периода выделяется некоторый период наблюдения Tn, в течение которого накапливается статистика об активности сети для дальнейшего выявления колебательных кластеров.

Независимость состава колебательных кластеров от начальных условий в установившемся режиме – основа многочисленных применений этого явления, в т. ч., и в будущих приложениях.

На рис. 1 представлена визуализация выходов ХНС, образующих в установившемся режиме идентичные колебательные кластеры, несмотря на то, что отдельные траектории остаются хаотическими. Возникновение одного из типов синхронизации (полная, фазовая, фрагментарная) предопределяется свойствами входного образа, подлежащего кластеризации:

в ответ на простой образ (рис. 1 *а*), состоящий из компактных, разнесенных в пространстве кластеров, ХНС генерирует три кластера, в пределах каждого из которых нейроны полностью синхронно изменяют свои состояния (рис. 1 *б*, *в*);

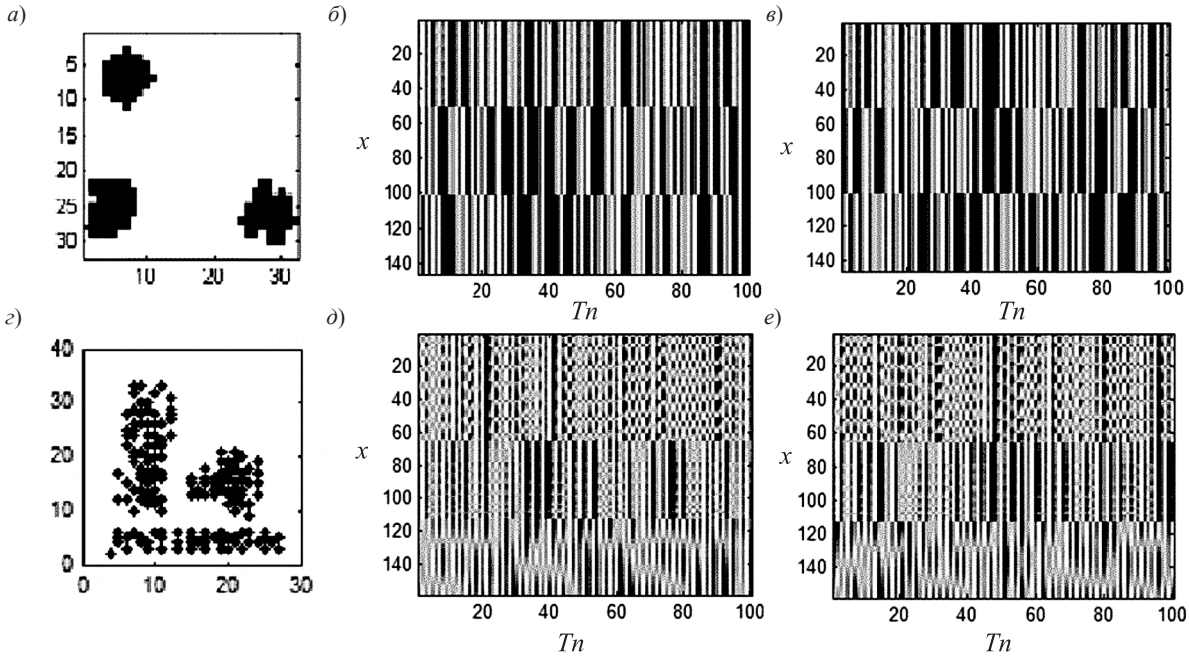


Рис. 1. Визуализация выходов ХНС:
а – простой образ из 146 объектов; *б-в* – 146 выходов ХНС образуют три полностью синхронно колеблющихся кластера в течение периода наблюдения, равного 100 дискретным отсчетам; *г* – сложный входной образ, созданный 158 входными точками; *д-е* – 158 выходов ХНС, образующих три идентичных по составу фрагментарно колеблющихся кластера от различных начальных условий

в случае, если объекты во входном изображении менее компактны и располагаются в непосредственной близости друг от друга (рис. 1 *г*), имеет место фрагментарная синхронизация (рис. 1 *д*, *е*) [7, 8].

Несмотря на различия в мгновенных значениях выходов нейронов в зависимости от начальных условий, интегральное состояние траекторий нейронов друг относительно друга является инвариантным, что позволяет говорить о существовании макроскопического аттрактора системы в целом.

Факт перехода ХНС в установившийся режим фиксируется на основании совпадения результатов кластеризации по методу голосования [9] на различных периодах наблюдения и от разных начальных условий. Однако сравнение результатов кластеризации значительно превышает по трудоемкости решение самой задачи кластеризации хаотической нейронной сетью, что препятствует широкому применению метода, несмотря на очевидные его преимущества по сравнению с аналогами [7, 8]. Предлагается использовать другой способ, основывающийся на выявлении фрактальности колебаний в системе в целом, а не в ее отдельных частях.

Феномен фрагментарной синхронизации пока не поддается строгому математическому анализу [7]. Противоречивые результаты статистического анализа колебательной динамики выходов ХНС не позволяют сделать однозначные выводы о повышении качества кластеризации за счет увеличения периода наблюдения. Экстенсивное увеличение объема статистической информации (Tn = 100000) о колебательной активности ХНС приводит порой к получению менее качественных результатов кластеризации, чем на выборках небольшого размера (Tn =100).

Фрактальная структура кластеров

Понятие фрактал объединяет как пространственные, так и временные структуры, характеризуемые свойством самоподобия на различных масштабах рассмотрения [10]. В случае ХНС мы сталкиваемся не только с пространственной, но и с временной фрактальностью структуры многомерных временных рядов, наблюдаемых на разных уровнях детализации. Выявленная в ХНС фрагментарная синхронизация [7, 8], при которой синхронизированы отдельные фрагменты из всего множества наблюдений многомерного выхода ХНС, по всей видимости имеет фрактальную природу, что перекликается со словом «фрагмент» (лат. «fractus»). Появилась необходимость экспериментального подтверждения предположения о масштабируемости статистической выборки выходов ХНС.

Для выявления самоподобия колебаний внимание было сфокусировано на анализе выходов ХНС, представленных в различных масштабах, что позволяет увидеть фрактальную структуру многомерных временных рядов, составленных из последовательности временных отсчетов выходных значений всей сети. Временная фрактальность, так же как и пространственная, подразумевает наличие самоподобия – повторяемости структуры при увеличении и при уменьшении масштаба рассмотрения. Для временной структуры это равносильно уменьшению масштаба представления за счет прореживания (просеивания) временной последовательности с разным коэффициентом. Таким образом, мы получаем разную степень детализации, как если бы при моделировании был взят шаг времени отличный от единичного.

На рис. 2 *а* представлены исходные временные последовательности, подлежащие анализу на периоде наблюдения Tn = 2000, далее, на рис. 2 *б–д* детально представлены первые 500, 250, 100, 50 отсчетов соответственно. На рис. 2 *е–и* представлены временные последовательности выходов с разными коэффициентами просеивания и соответствующими масштабами рассмотрения: 1:4 на рис. 2 *е*, 1:8 на рис. 2 *ж*, 1:20 на рис. 2 *з*, 1:40 на рис. 2 *и*.

Сопоставление результатов, представленных на рис. 2 *б* и *е*, 2 *в* и *ж*, 2 *г* и *з*, 2 *д* и *и*, соответственно, позволяет обнаружить квазипериодические повторения одного и того же многомерного ряда не только в пределах одного кластера, но и в ХНС в целом. Подобие колебаний во времени свидетельствует о фрактальности колебательной динамики. Необходимо заметить, что если за первоначальную взять последовательность с шагом отображения 40 (рис. 2 *и*), то следующие в обратном порядке последовательности (рис. 2 *з*, *ж*) можно считать рассмотрением той же последовательности с коэффициентами увеличения относительно исходной в два, пять, десять раз.

Для исследования регулярности сложных и многомерных динамических систем часто используется рекуррентный анализ с построением наглядной рекуррентный диаграммы [11]. Обнаружение рекуррентности в двух различных по-

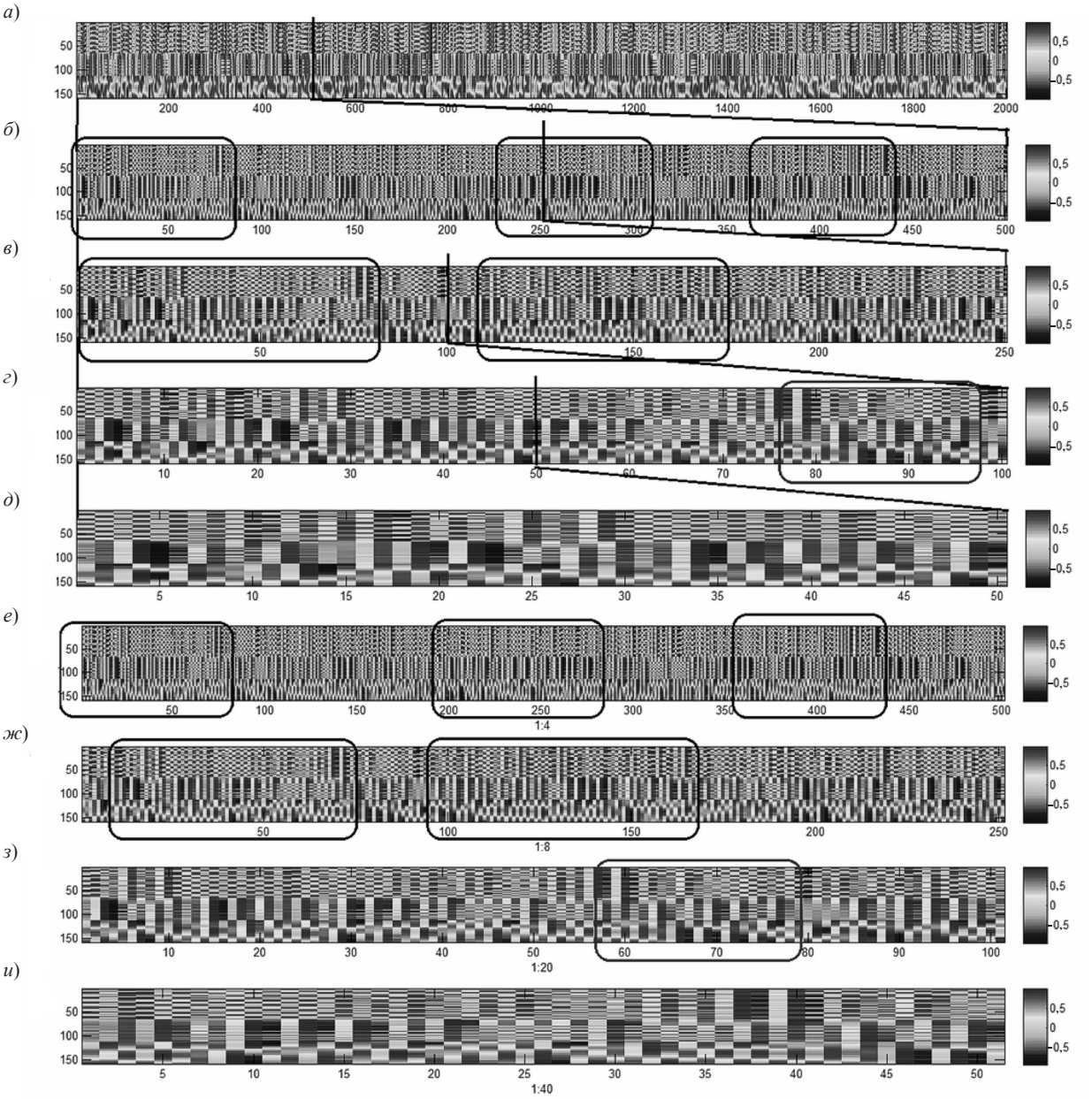


Рис. 2. Анализ фрагментарной синхронизации на примере естественного порядка следования состояний сети и порядка с прореживанием:

а – исходные последовательности выходов ХНС; *б* – первые 500 отсчетов в выборке; *в* – первые 250 отсчетов; *г* – первые 100 отсчетов; *д* – первые 50 отсчетов; *е* – выборка, состоящая из каждого 4-го отсчета из исходной выборки (всего 500 отсчетов, масштаб рассмотрения 1:4); *ж* – выборка, состоящая из каждого 8-го отсчета из исходной выборки (всего 250 отсчетов, масштаб рассмотрения 1:8); *з* – выборка 1:20 (всего 100 отсчетов, масштаб рассмотрения 1:20); *и* – выборка 1:40 (всего 50 отсчетов)

следовательностях (кросс-рекуррентный анализ) свидетельствует о наличии синхронизации между ними, а при обнаружении рекуррентности между самой последовательностью и ее уменьшенным или увеличенным представлением, может использоваться для более наглядного изучения фрактальности (самоподобия).

Рекуррентный анализ и фрактальность колебательных кластеров

Применение фазовых портретов как инструмента визуализации сложной динамики многомерных систем ограничено в связи с необходимостью построения различных проекций. Это

препятствует комплексному анализу активности системы в целом. Для отображения m-мерной фазовой траектории состояний системы $x(t)$ длиной N на двумерную квадратную двоичную матрицу размером $N \times N$ в [12] было предложено фиксировать на рекуррентной диаграмме информацию о поведении системы во времени в соответствии с соотношением:

$$R(i, j) = \Theta(\mathrm{E} - \|x_i - x_j\|), \; i, j = 1...N, \qquad (4)$$

где N – количество рассматриваемых состояний x_i; E – граничное расстояние; $\|*\|$ – норма, Θ – функция Хэвисайда. Рекуррентная диаграмма позволяет выявлять временные структуры в виде горизонтальных, вертикальных (замирание колебаний) и диагональных (повторения колебаний) отрезков, визуализирующих 1 в матрице R.

Поскольку состояния хаотической системы не повторяются полностью, но находятся в непосредственной близости от предыдущих состояний, то рекуррентность определяется как достаточная близость состояния x_j к состоянию x_i. Иными словами, рекуррентными являются состояния x_j, попадающие в m-мерную окрестность с радиусом E и центром x_i. Эти точки x_j называются *рекуррентными точками*.

Поскольку $R(i, j) = 1$, $i = 1...N$ по определению, то рекуррентная диаграмма всегда содержит черную диагональную линию – линию идентичности, под углом $\pi/4$ к осям координат. Произвольно взятая рекуррентная точка (i, j) не несет какой-либо полезной информации о состояниях в отсчетах времени i и j. Только вся совокупность рекуррентных точек позволяет восстановить свойства системы. Внешний вид рекуррентной диаграммы позволяет судить о характере протекающих в системе процессов, наличии и влиянии шума, наличии состояний повторения и замирания в ходе эволюции системы.

При построении рекуррентной диаграммы анализируется взаимная близость точек одной траектории x_i. Аналогичное сравнение можно провести для двух временных рядов, если добавить в то же фазовое пространство траекторию y_i. Графическое отображение сравнения близости точек первой траектории с точками второй траектории называется *кросс-рекуррентной диаграммой*:

$$\mathrm{CR}(i, j) = \Theta(\mathrm{E} - \|x_i - y_j\|), \quad i, j = 1...N. \qquad (5)$$

Это выражение полностью аналогично выражению для рекуррентной диаграммы. Если состояние второй траектории во время j близко состоянию первой траектории во время i, то 1 (черная точка) будет установлена в матрице CR в положении (i, j). Такая ситуация не означает «повторение» состояния и, таким образом, матрица отображает не повторяемость, а соответствие траекторий.

Аналогичным образом обобщается понятие количественного анализа.

Так как значения $\mathrm{CR}(i, i)$ не обязательно отличны от нуля, то, как правило, главная диагональ размывается. Сказанное выше относительно толкования топологии рекуррентных диаграмм, справедливо и для кросс-рекуррентных диаграмм, причем диагональные линии в данном случае представляют больший интерес, т. к. указывают на проходящие близко участки траекторий двух разных процессов. Частота и длины этих линий очевидным образом указывают на подобие динамики исследуемых систем. Увеличивающееся со временем подобие рассматриваемых траекторий приводит к увеличению плотности рекуррентных точек вдоль главной диагонали до появления на ней сплошной черной линии (которая, фактически, является линией идентичности, а кросс-рекуррентная диаграмма в области старших индексов превращается в обычную рекуррентную).

В данной статье предлагается использовать рекуррентные и кросс-рекуррентные диаграммы для анализа фрактальных свойств фрагментарно синхронизированных нейронов с колебательной активностью. Предпосылкой применения служит предположение о том, что, если структуры рекуррентной диаграммы и кросс-рекуррентной диаграммы окажутся схожими, то можно говорить о фрактальности фрагментарной синхронизации. Здесь под рекуррентной диаграммой подразумевается отображение динамики нейронов из исходной выборки в себя, а под кросс-рекуррентной диаграммой – отображение динамики состояний, следующих по порядку, в динамику, образованную отмасштабированной выборкой.

Анализ фрактальности колебательных кластеров

Совместное представление рекуррентных диаграмм выборки из первых 500 отсчетов (рис. 3 *а*) и отмасштабированной выборки 1:4 (рис. 3 *б*); рекуррентных диаграмм выборки из первых 250 отсчетов (рис. 3 *в*) и отмасштабированной выборки 1:8 (рис. 3 *г*); рекуррентных диаграмм

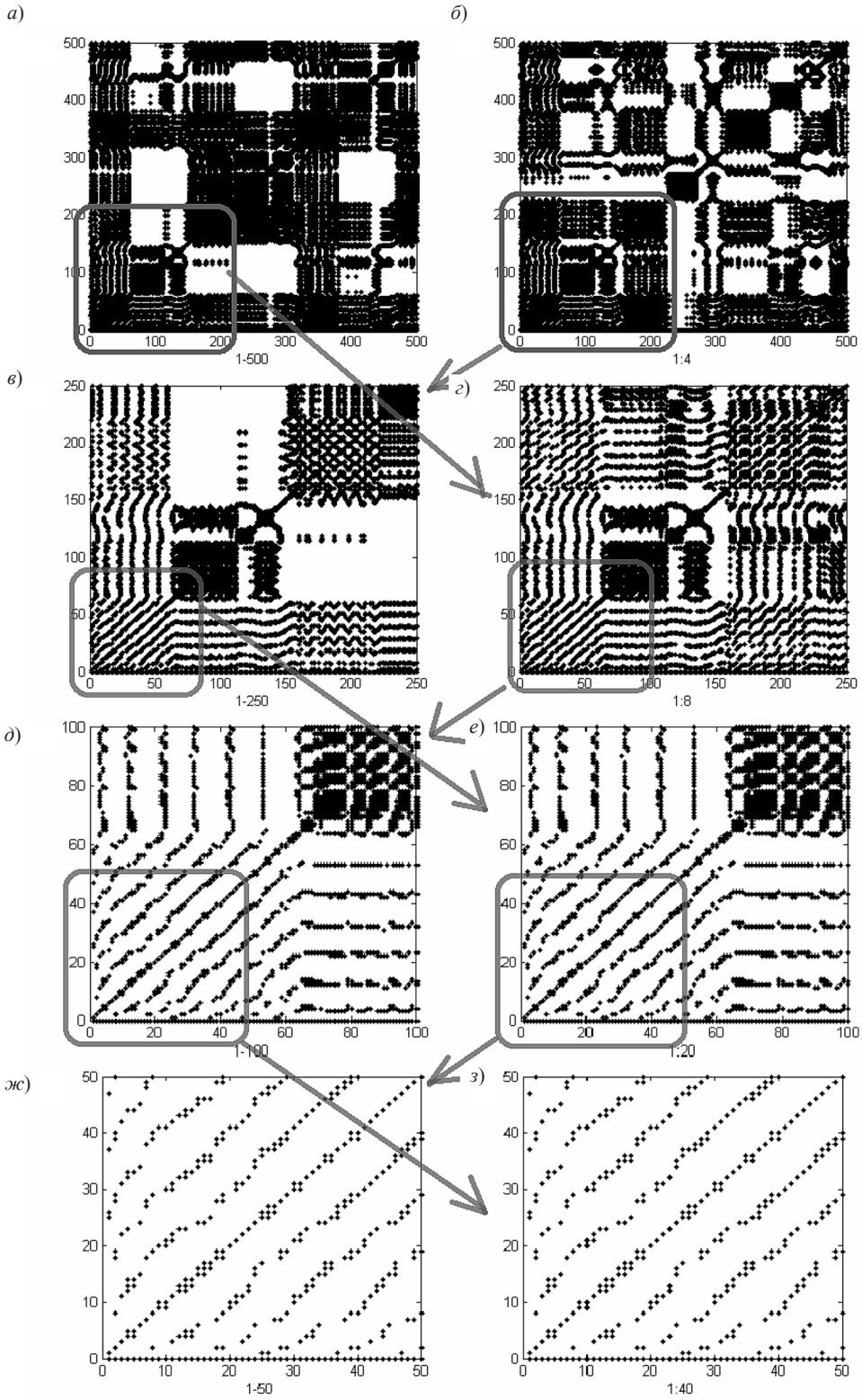


Рис. 3. Рекуррентные диаграммы динамики ХНС:

а – самоотражение первых 500 отсчетов; *б* – самоотражение отмасштабированной выборки 1:4; *в* – самоотражение первых 250 отсчетов; *г* – самоотражение отмасштабированной выборки 1:8; *д* – самоотражение первых 100 отсчетов; *е* – самоотражение отмасштабированной выборки 1:20; *ж* – самоотражение первых 50 отсчетов; *з* – самоотражение отмасштабированной выборки 1:40

выборки из первых 100 отсчетов (рис. 3 *д*) и отмасштабированной выборки 1:20 (рис. 3 *е*); рекуррентных диаграмм выборки из первых 50 отсчетов (рис. 3 *ж*) и отмасштабированной выборки 1:40 (рис. 3 *з*) дает возможность провести их сравнение и анализ. Кроме того, что из рис. 3 видна явная схожесть общей структуры диаграмм, можно сделать следующие выводы:

наличие диагональных линий и узоров в шахматном порядке в рекуррентных диаграммах на рис. 3 свидетельствует о наличии периодичности осциллирующей динамики;

диаграмма на рис. 3 *б* повторяет фрагмент диаграммы 3 *а* и является более подробным его представлением;

диаграмма на рис. 3 *в* повторяет фрагмент диаграммы 3 *б*;

диаграмма на рис. 3 *д* повторяет фрагмент диаграммы 3 *г*;

диаграмма на рис. 3 *е* повторяет фрагмент диаграммы 3 *в*;

нерегулярность диагональных линий свидетельствует о наличии хаотической динамики, что объясняет некоторое различие в рекуррентных диаграммах в соответствующих масштабах (рис. 3 *а* и *б*; рис. 3 *в* и *д*).

Разная детализация нерегулярности диагональных линий, представленная на рис. 3, является следствием высокой требовательности к точности совпадения состояний системы. Как известно, при рассмотрении многомерных динамических систем с хаотической динамикой назначается допустимая погрешность на точность повторения траектории движения системы, и от нее также зависит структура рекуррентных диаграмм.

Проверка сохранения фрактальных свойств для последовательностей с большими коэффициентами уменьшения степени детальности

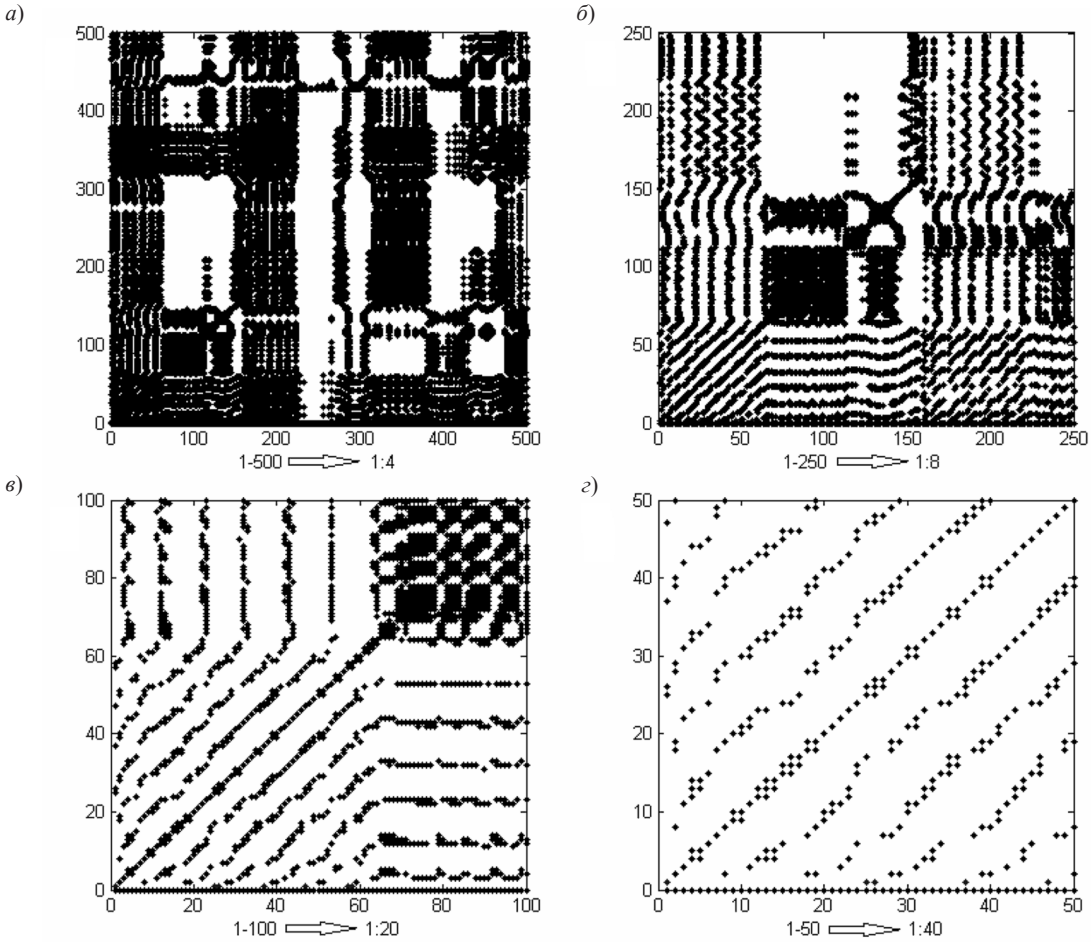


Рис. 4. Кросс-рекуррентные диаграммы динамики выходов ХНС:
а – отображение исходных 500 отсчетов в масштабированные 1:4 отсчеты; *б* – отображение исходных 250 отсчетов в масштабированные 1:8 отсчеты; *в* – отображение исходных 100 отсчетов в масштабированные 1:20 отсчеты; *г* – отображение исходных 50 отсчетов в масштабированные 1:40 отсчеты

представления временной последовательности выходных значений ХНС показала, что выводы, сделанные для первых 500 отсчетов и первых 250 с масштабами 1:4 и 1:8 соответственно, справедливы и для первых 100, и для первых 50 отсчетов (более детальное рассмотрение исходной последовательности) и для масштабов 1:20 и 1:40.

Исследование самоподобия колебательных фрагментов в разных масштабах рассмотрения показало, что кросс-рекуррентные диаграммы аналогичны для исходной последовательности и последовательностей с масштабами рассмотрения 1:4, 1:8, 1:20, 1:40. Из их совместного рассмотрения можно констатировать, что свойство взаимного соответствия между ними сохраняется, несмотря на разные масштабы представления исходной последовательности. Это подтверждает наличие фрактальности в хаотической нейронной сети с фрагментарной синхронизацией.

Рекуррентные диаграммы и кросс-рекуррентные диаграммы для анализа самоподобия между исходными и масштабированными последовательностями представлены на рис. 4. Как и для рекуррентной диаграммы исходной последовательности (рис. 3 *б* и рис. 4 *а;* рис. 3 *в* и рис. 4 *б*) и кросс-рекуррентных диаграмм масштабированных последовательностей видна схожесть с точностью до мелких фрагментов. Это также подтверждает необходимость введения в метод выявления фрагментарной синхронизации, кроме порога точности совпадения значений выходов ХНС, еще и некоторого дополнительного загрубения – процента совпадающих фрагментов. Кросс-рекуррентные диаграммы масштабированных последовательностей с различными коэффициентами масштабирования также подтверждают ранее сделанные выводы относительно фрактальности выходных последовательностей ХНС. Проверка общности самоподобия для ХНС была выполнена и на других входных образах.

Внутренняя структура фракталов

В данной статье исследована фрактальность структуры фрагментарной синхронизации выходов ХНС. Для выявления самоподобия были применены методы рекуррентного и кросс-рекуррентного анализа многомерных временных рядов. Результаты, аналогичные представленным на рис. 2–3, были получены на всем множестве широко используемых тестовых задач кластеризации.

Понимание механизмов образования колебательных кластеров со сложной внутренней структурой ведет к уменьшению ресурсоемкости метода кластеризации на основе ХНС.

Дальнейшее исследование фрактальности ХНС может быть направлено на получение множества числовых характеристик и выявление тонкой внутренней структуры фазового пространства и определение режимов синхронизации с помощью средств автоматического анализа рекуррентных диаграмм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Politi, A.** Stable chaos in Nonlinear Dynamics and Chaos: Advances and Perspectives [Текст]/A. Politi, A. Torcini//Understanding Complex Systems. –2010. –P. 103–129.

2. **Pikovsky, A.** Synchronization: Theory and Application [Текст]/A. Pikovsky, Y. Maistrenko//NATO Science. –Ser. II: Mathematics, Physics and Chemistry.–Springer, 2008.

3. **Junji, Ito** Spontaneous structure formation in a network of dynamic elements [Текст]/Ito Junji, K. Kaneko// Phys. Rev. E.–2003.–№ 67(14).–P. 119–129.

4. **Anishchenko, V.** Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems: Tutorial and Modern Developments. [Текст]/V. Anishchenko, V. Astakhov, A. Neiman [et al.]–Springer-Verlag, 2007.

5. **Inoue, M** Dynamics of Coupled Adaptive Elements: Bursting and Intermitteny Oscillations Generated by Frustration in the Network [Текст]/M Inoue, K. Kaneko// Phys. Rev. E.–2010.–№81.–P. 126–203.

6. **Li, S.** Synchronization in coupled map lattices with small-world delayed interactions [Текст]/S. Li, X. Liao, J. Yu//Physica A.–2004.–№ 335.–P. 365–370.

7. **Бендерская, Е.Н.** Использование фрагментарной хаотической синхронизации для моделирования межмолекулярных взаимодействий и процессов образования наноструктур [Текст]/Е.Н. Бендерская, С.В. Жукова//Научно-технические ведомости СПбГТУ.–2008.–№ 3.–С. 126–130.

8. **Benderskaya, E.N.** Clustering by chaotic neural networks with mean field calculated via Delaunay triangulation [Текст]/E.N. Benderskaya, S.V. Zhukova// Lecture Notes in Artificial Intelligence.–2008.–Vol. 5271.–Springer,–P. 400–416.

9. **Журавлев, Ю.И.** Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения [Текст]/Ю.И. Журавлев, В.В. Рязанов, О.В. Сенько. –М.: Фазис, 2006.

10. **Mandelbrot, B.** The Fractal Geometry of Nature,

[Текст]/B. Mandelbrot W.H. –Freeman and Co, N. Y., 1983

11. **Marwan, N.** Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems [Текст]/N. Marwan, M.C. Romano, M. Thiel [et al.]//Physics Reports, 2007.–№ 438(5-6).–P. 237–329.

12. **Eckmann, J.-P.** Recurrence Plots of Dynamical Systems [Текст]/J.-P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle//Europhysics Letters.–1987.–№ 5.–P. 973–977.

УДК 004.942

Ю.В. Ветров, С.В. Завьялов

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИМВОЛОВ, ВСТРОЕННЫХ В ЦИФРОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Алгоритмы встраивания информационных символов в цифровые изображения основаны на методах стеганографии, использующей методы и достижения криптографии, цифровой обработки сигналов, теории связи и информации. Методы стеганографии позволяют не только скрытно передавать данные, но и решать задачи помехоустойчивой аутентификации, защиты информации от несанкционированного копирования, отслеживания распространения информации по сетям связи, поиска информации в мультимедийных базах данных.

Цель статьи − исследование алгоритмов встраивания информационных символов в цифровые изображения с оценкой помехоустойчивости приема информации и качества принимаемого изображения.

Алгоритмы встраивания информационных символов

Алгоритм встраивания символов на уровне пространства изображений (попиксельное встраивание символов). В этом алгоритме с целью повышения степени незаметности передачи скрытой информации встраивание осуществляется только в канал синего цвета. Выбор канала синего цвета связан с особенностями восприятия человеческим зрением различных цветов. Наименее восприимчивым человеческое зрение оказывается к синему цвету [1, 2].

Пусть $p = (x, y)$ являются координатами пикселя изображения, в который выполняется встраивание; $b(p)$ – значение синего канала изображения в текущей позиции p; s_i – текущий передаваемый бит; q – константа, определяющая энергию передаваемого бита. Тогда модифицированное значение синего канала:

$$b'(p) = \begin{cases} b(p) + q, & \text{если } s_i = 1; \\ b(p) - q, & \text{если } s_i = 0. \end{cases}$$

После прохождения канала с шумом полученное значение пикселя канала синего цвета будет искажено:

$$b''(p) = b'(p) + n(p).$$

Извлечение передаваемой информации получателем может осуществляется как при известных значениях $b(p)$, т. е. при наличии исходного изображения на приемнике, так и при неизвестном приемнику переданном изображении. Получение значения переданного бита (s_i') осуществляется по следующему правилу:

$$s_i' = \begin{cases} 1, b''(p) - b(p) > 0; \\ 0, b''(p) - b(p) < 0. \end{cases}$$

Алгоритмы встраивания символов на уровне коэффициентов преобразования. Отличительная особенность алгоритмов данного типа − использование для встраивания коэффициентов дискретного косинусного преобразования или дискретного вейвлет-преобразования (ДВП). После прямого преобразования выбираются коэффициенты для аддитивного встраивания символов. Для уменьшения степени заметности встраивания символов обычно используется только один коэффициент. Далее производится обратное преобразование. В качестве ДВП используются преобразования Лэйзи и Хаара [1, 3]. Алгоритм встраивания символов на уровне коэффициентов преобразования обеспечивает меньшие объемы встраиваемой информации, чем алгоритм встраивания символов на уровне пространства изображений. Например, встраивание на уровне коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП) ввиду использования одного

коэффициента из 64 уменьшает максимальное количество передаваемых данных в 64 раза.

При встраивании символов в передаваемое цифровое изображение используется замена каждого передаваемого бита встраиваемой информации на псевдослучайную последовательность (ПСП) различной длины. Это делается для обеспечения более равномерного распределения погрешностей изменения цветового рисунка из-за встраивания символов на площади одного кадра.

Длина применяемых ПСП (L_{psp}) для различных алгоритмов встраивания символов различна:

алгоритм встраивания символов на уровне пространства изображения:

$$L_{psp} = \frac{X_{MAX} \times Y_{MAX}}{N_{bits}},$$

где L_{psp} – длина ПСП; N_{bits} – количество передаваемой информации (в битах); X_{MAX}, Y_{MAX} – размеры изображения;

алгоритм встраивания символов на уровне пространства коэффициентов преобразования:

$$L_{psp} = \frac{\frac{X_{MAX} \times Y_{MAX}}{N_{bits}}}{T_p},$$

где T_P – параметр преобразования.

Для дискретного косинусного преобразования (ДКП) параметр преобразования равен 64 (встраивание в один коэффициент из 64 возможных), а для дискретного вейвлет-преобразования Лейзи и Хаара параметр преобразования равен 2.

Обобщенная модель системы передачи цифровых изображений с использованием алгоритмов встраивания символов

Алгоритмы встраивания символов в цифровые изображения реализованы в модели, представленной на рис. 1. Основные элементы модели: передающий блок; канал передачи; приемный блок.

В передающем блоке (блок «Алгоритмы встраивания символов») выполняются функции замены передаваемой последовательности символов на ПСП и встраивания информации в контейнер (изображение). Если текущий встраиваемый символ (бит) равен нулю, то используется неинвертированная псевдослучайная последовательность, а при значении символа равном единице – инвертированная. Длина ПСП выбирается исходя из размеров контейнера (изображения), количества передаваемых данных и требуемой помехоустойчивости приема встраиваемых символов. После заполнения контейнер передается в канале с аддитивным белым гауссовским шумом.

Смесь цифрового изображения, встроенных символов и аддитивного шума поступает на приемный блок. В приемном блоке исходный незаполненный контейнер (изображение) может быть как известным, так и неизвестным. После блока «Алгоритм выделения символов» результат преобразования поступает на два цифровых коррелятора и решающее устройство, которое выполняет функцию определения значения переданного

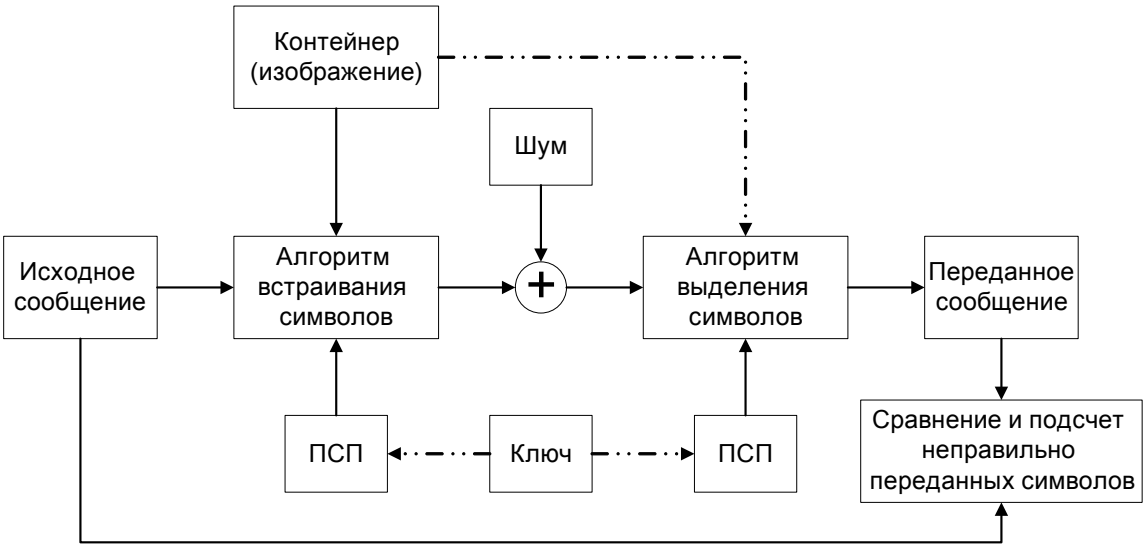


Рис. 1. Обобщенная модель системы передачи цифровых изображений с использованием алгоритмов встраивания символов

информационного символа. Для синхронизации ПСП на приемнике и передатчике используются ключи.

В модели реализована возможность модификации следующих параметров:

количество передаваемых символов в одном контейнере (скорость передачи информации, которая измеряется в количестве передаваемых бит в одном пикселе изображения или во всем контейнере);

энергия встраиваемого символа (сигнала);

уровень шума в канале передачи;

степень образующих многочленов, формирующих псевдослучайную последовательность для последующей замены передаваемых символов;

тип и параметры применяемого алгоритма встраивания символов.

Искажения цифрового изображения при наличии встроенных символов

Для исследования степени искажений цифрового изображения из-за наличия встраиваемых символов были рассмотрены различные изображения (фотографии). В качестве алгоритма встраивания символов использовался алгоритм встраивания символов на уровне пространства изображений (попиксельное встраивание символов). При этом применялись следующие методы сравнения:

встраивание регулярной последовательности символов (последовательности единичных бит) без использования псевдослучайной последовательности;

встраивание символов с использованием псевдослучайной последовательности (длина ПСП равна 480).

Для изменения отношения сигнал/шум в канале передачи использовались различные мощности передаваемых встроенных символов (сигналов).

Как показали результаты анализа, применение псевдослучайной последовательности позволяет значительно увеличить степень незаметности встраивания символов, т. к. передача регулярной последовательности без использования ПСП приводит к равномерному изменению цвета всего изображения. Искажения, вызванные встраиванием с использованием ПСП, близки к искажениям, вызванным добавлением аддитивного шума к цифровому изображению.

Для сравнения искажений видеоизображения для различных алгоритмов встраивания символов проведена экспертная оценка различия между исходным и заполненным контейнером. При выполнении экспертной оценки опыты проводились с десятью экспертами.

Критерии для оценки степени различия между контейнерами, предложенные для экспертной оценки:

0. Искажений изображения нет.

1. Искажение отдельных пикселей.

2. Небольшое искажение отдельных фрагментов.

3. Сильное искажение отдельных фрагментов.

4. Сильное искажение всего изображения.

На рис. 2 представлены результаты экспертной оценки для алгоритма встраивания на уровне

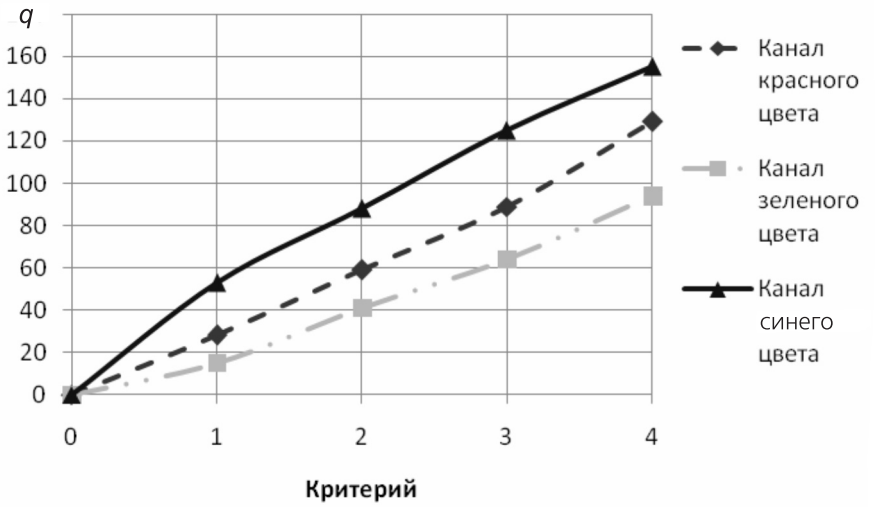


Рис. 2. Результаты экспертной оценки для алгоритма встраивания на уровне пространства изображений

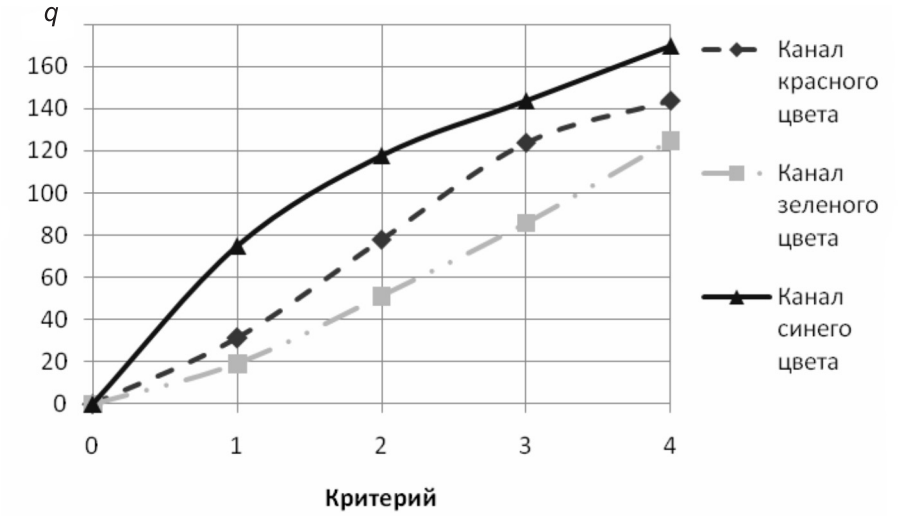


Рис. 3. Результаты экспертной оценки для алгоритма встраивания на уровне коэффициентов ДВП Лэйзи

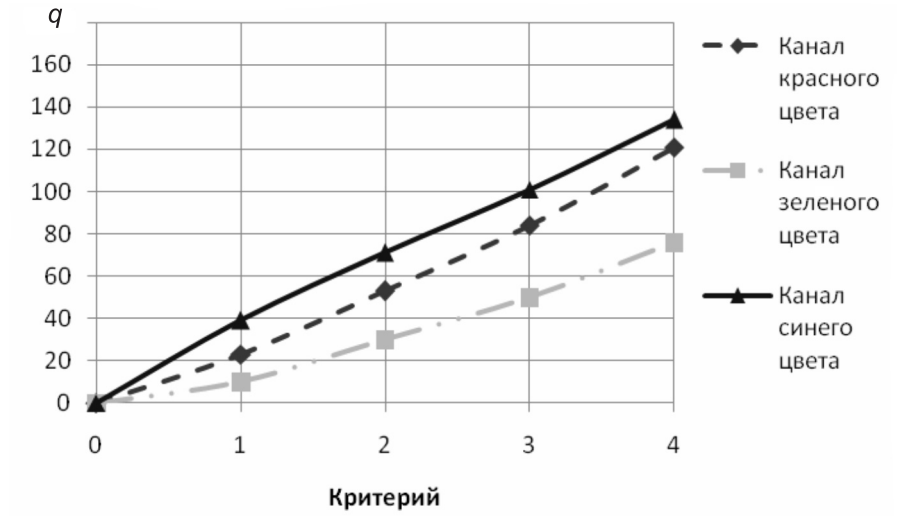


Рис. 4. Результаты экспертной оценки для алгоритма встраивания на уровне коэффициентов ДВП Хаара

пространства изображений. Оценка выполнялась для встраивания в различные цветовые каналы с целью выбора цвета, имеющего минимальное влияние на искажение изображения. На рисунке по оси ординат отложены значения амплитуд встраиваемых сигналов, соответствующие начальной границе использования определенного критерия. Так, при задании критерия незаметного встраивания (например, № 1 – искажение отдельных пикселей) для красного канала максимально допустимая амплитуда встраивания (q) соответствует значению 22, для зеленого – 9, для синего – 38. Как видно, данные результаты согласуются с теоретическими данными, в соответствии с которыми восприимчивость системы человеческого зрения наименьшая для синего канала и встраивание необходимо выполнять именно в синий цветовой канал изображения.

При изменении критерия до критерия № 2 (небольшое искажение отдельных фрагментов) максимально допустимая амплитуда встраивания увеличивается (для красного канала – 52, для зеленого – 29, для синего – 71).

На рис. 3–5 представлены результаты экспертных оценок для алгоритмов встраивания символов на уровне коэффициентов ДВП Лэйзи (рис. 3) и Хаара (рис. 4) и ДКП (рис. 5). Из анализа кривых на этих рисунках видно, что так же,

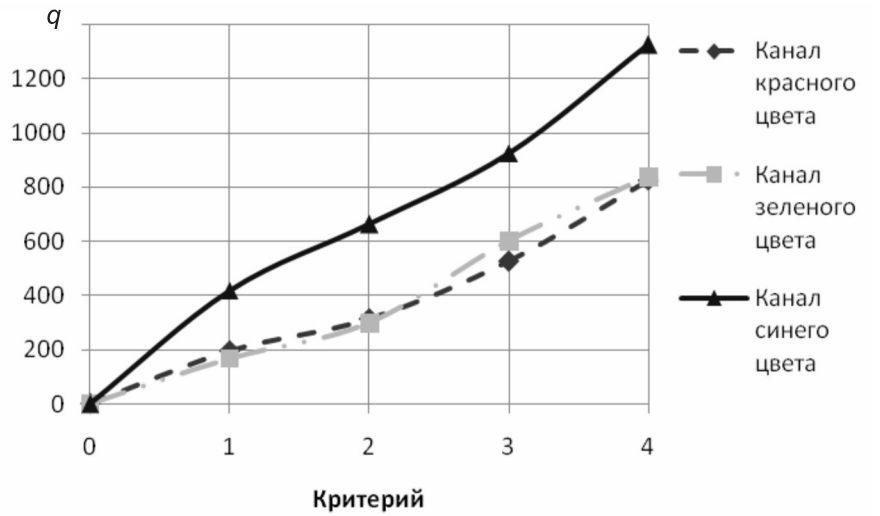


Рис. 5. Результаты экспертной оценки для алгоритма встраивания на уровне коэффициентов ДКП

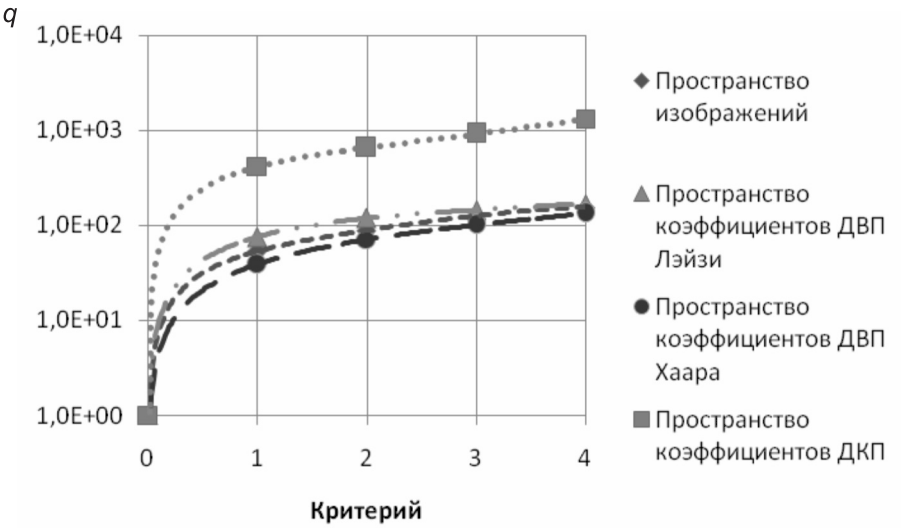


Рис. 6. Результаты экспертной оценки для различных алгоритмов

как и в рассмотренном выше случае, встраивание символов в канал синего цвета показывает наилучшие результаты с точки зрения незаметности факта встраивания.

При сравнении различных алгоритмов встраивания символов (рис. 6) видно, что максимально допустимая амплитуда встраиваемых символов (сигналов) минимальна для встраивания на уровне коэффициентов ДВП Хаара и максимальна для встраивания на уровне коэффициентов ДКП. Таким образом, при требовании максимальной незаметности факта встраивания символов при фиксированной энергии встраиваемого бита требуется использовать встраивание на уровне коэффициентов ДКП.

Помехоустойчивость приема информационных символов, встроенных в цифровые изображения

Исследование помехоустойчивости приема встроенных символов проведено при условии одинаковой длины ПСП. При этом в качестве сигналов использованы противоположные сигналы ФМ-2 и применен оптимальный когерентный алгоритм их приема. Вероятность ошибки для противоположных сигналов равна:

$$P_{\text{ош}} = \frac{1 - \Phi\left(h \cdot \sqrt{2}\right)}{2},$$

где $\Phi\left(h \cdot \sqrt{2}\right)$ – функция Крампа; $h^2 = \frac{E_0}{N_0}$; E_0 –

энергия сигнала; N_0 – спектральная плотность мощности канального шума.

При применении ПСП энергия передаваемого сигнала (бита сообщения) увеличивается:

$$E_{psp} = L_{psp} \cdot E_{bit},$$

где L_{psp} – длина ПСП, $E_{bit} = q^2 \cdot T_{bit}$ – энергия элементарного сигнала (бита); T_{bit} – время передачи элементарного сигнала (бита).

Отношение сигнал/шум (дБ) при использовании ПСП равно:

$$h^2 = 10 \cdot \lg\left(\frac{E_{psp}}{N_0}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{E_{bit}}{N_0}\right) + 10 \cdot \lg\left(L_{psp}\right),$$

где $10 \cdot \lg\left(\frac{E_{bit}}{N_0}\right)$ – отношение энергии передаваемого бита к уровню шума в канале передачи (в дБ).

Рассмотрим случай известного в приемном блоке контейнера (изображений) (см. рис.1). При использовании различных алгоритмов встраивания символов изменяется количество передаваемой информации из-за изменения параметра преобразования. При фиксированной длине ПСП максимальный объем передаваемых данных соответствует случаю применения алгоритма встраивания на уровне пространства изображений, минимальный – для случая встраивания на уровне пространства коэффициентов ДКП. При использовании изображения размером 1600×1200 пикселей и длины ПСП 120 достигается следующий объем передаваемых данных при вероятности ошибочного приема, равной 10^{-2}, и отношении энергии встраиваемого бита к уровню шума в канале передачи −16,5 дБ:

встраивание на уровне пространства изображений – 16 000 бит, что соответствует скорости передачи 0,0083 бит/пиксель;

встраивание на уровне пространства коэффициентов ДВП Лейзи – 8 000 бит, что соответствует скорости передачи 0,00415 бит/пиксель;

встраивание на уровне пространства коэффициентов ДВП Хаара – 8 000 бит, что соответствует скорости передачи 0,00415 бит/пиксель;

встраивание на уровне пространства коэффициентов ДКП – 250 бит, что соответствует скорости передачи 0,00013 бит/пиксель.

В случае неизвестного в приемном блоке контейнера (изображений) изображение рассматривается как дополнительное шумовое воздействие на встроенные символы. Представим цифровое изображение в качестве гауссовского контейнера с заданным математическим ожиданием и дисперсией. При использовании изображений для кодирования цветовых компонент часто используется 24 бита (по 8 бит на красный, зеленый и синий цвет). То есть каждая цветовая компонента каждого пикселя представляется числом от 0 до 255. Наиболее естественным является выбор математического ожидания гауссовского контейнера равным половине количества градаций цветовых компонент, т. е. 128.

На рис. 7 и 8 представлены результаты исследования помехоустойчивости приема встроенных символов при использовании алгоритмов встраивания информации на уровне пространства изо-

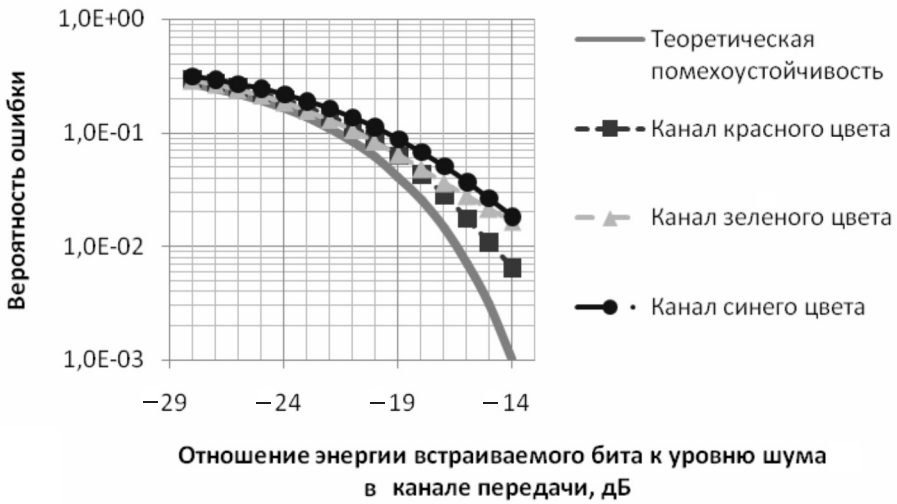


Рис. 7. Помехоустойчивость приема символов при использовании алгоритмов встраивания информации на уровне пространства изображений для $q = 20$

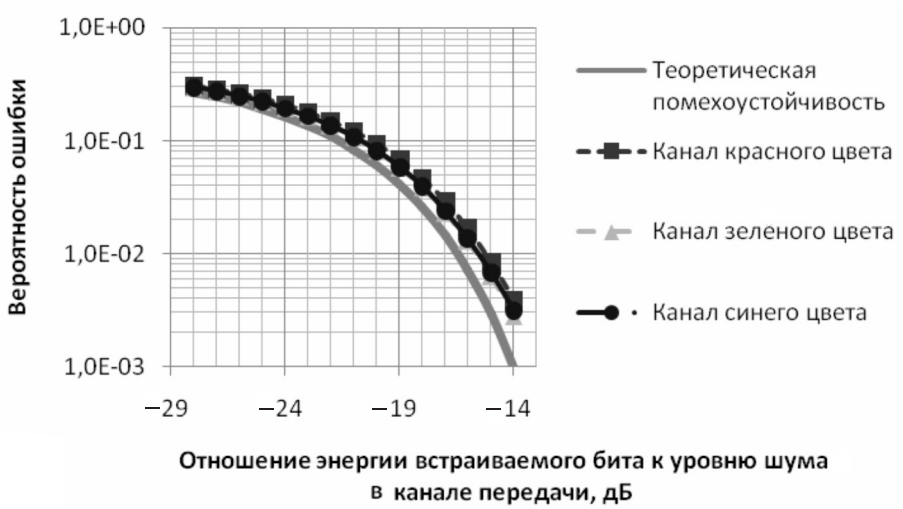


Рис. 8. Помехоустойчивость приема символов при использовании алгоритмов встраивания информации на уровне пространства изображений для $q = 40$

бражений для случая неизвестного в приемном блоке при встраивании информации в различные цветовые каналы. На рис. 7 амплитуда (q) встраиваемых символов (сигналов) равна 20, а на рис. 8 амплитуда сигналов равна 40.

При рассмотрении представленных на рисунках зависимостей видно, что увеличение амплитуды сигналов (q) с 20 до 40 позволяет уменьшить вероятность ошибки до предела, определяемого дисперсией компоненты шума в канале передачи и дисперсией гауссовского контейнера (изображений). Для заданной вероятности ошибки (10^{-2}) энергетический проигрыш по отношению энергии встраиваемого бита к уровню шума в канале передачи составляет около 1 дБ. Однако увеличение амплитуды встраивания ведет к ухудшению незаметности факта встраивания. Если для синего канала амплитуда встраивания 40 еще не приводит к видимому появлению искажений, то для красного и зеленого канала будет превышено граничное значение, соответствующее переходу к критерию различия исходного и заполненного контейнера № 2 (небольшие искажения отдельных фрагментов).

На рис. 9–11 приведены результаты исследования помехоустойчивости приема встроенных символов при использовании алгоритмов встраивания информации на уровне пространства коэф-

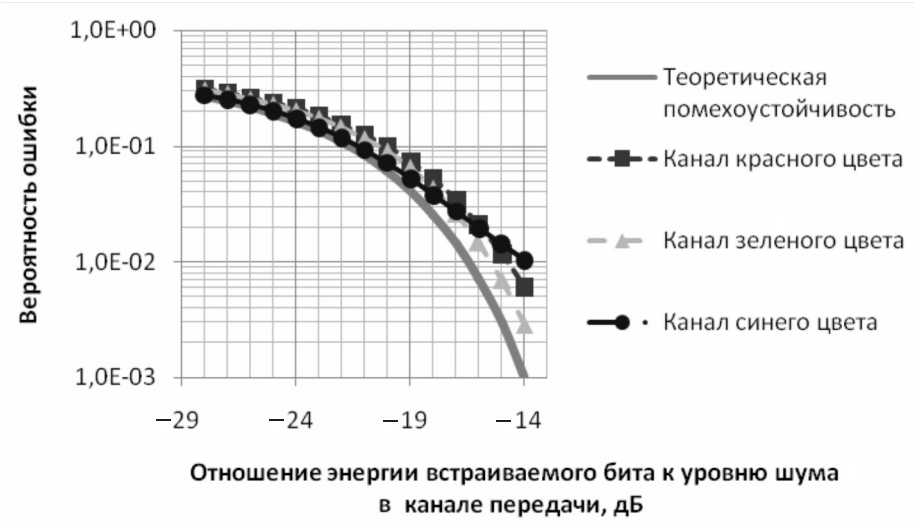


Рис. 9. Помехоустойчивость приема символов при использовании алгоритмов встраивания информации на уровне коэффициентов ДВП Лейзи для $q = 40$

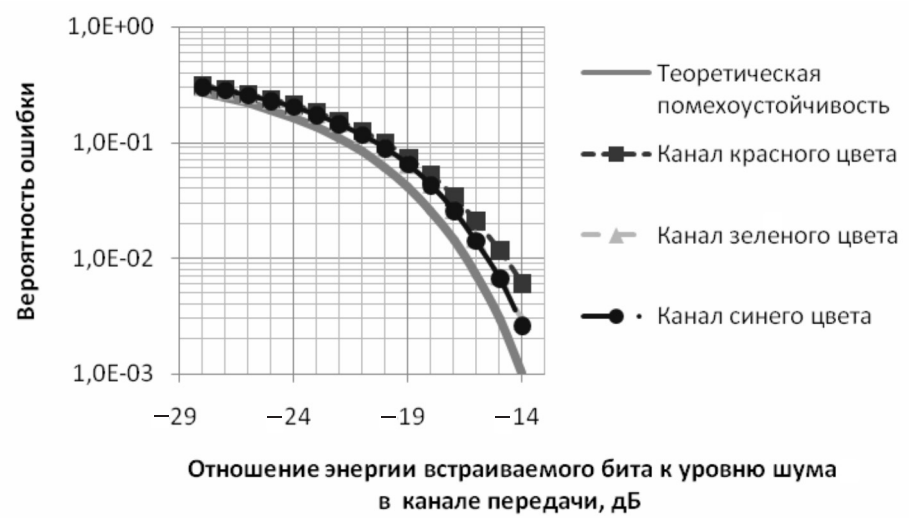


Рис. 10. Помехоустойчивость приема символов при использовании алгоритмов встраивания информации на уровне коэффициентов ДВП Хаара для $q = 40$

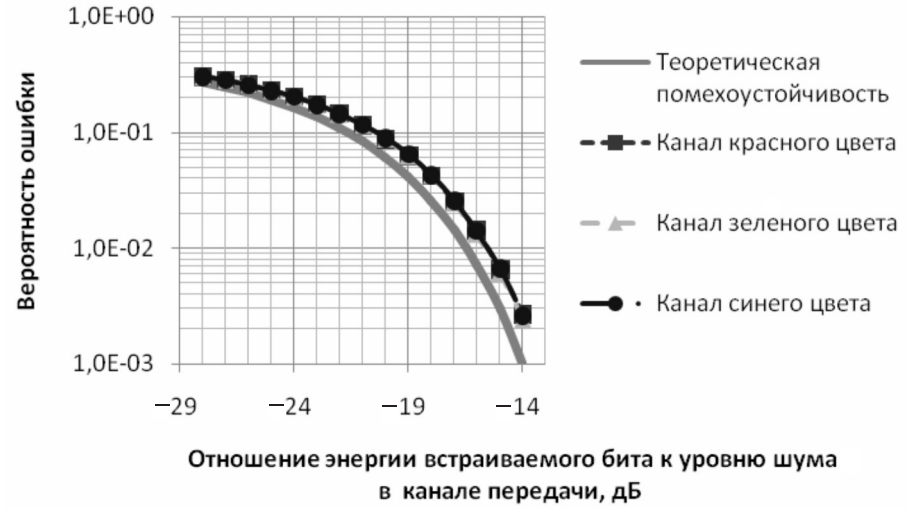


Рис. 11. Помехоустойчивость приема символов при использовании алгоритмов встраивания информации на уровне коэффициентов ДКП для $q = 40$

фициентов преобразования (ДВП Лейзи и Хаара, ДКП) при амплитуде встраиваемых символов (сигналов) равной 40.

Из анализа кривых, приведенных на последних рисунках, видно, что при сохранении условий на выбор амплитуды встраиваемых сигналов при обеспечении требуемой незаметности факта передачи информации энергетический проигрыш по отношению энергии встраиваемого бита к уровню шума в канале передачи составляет около 1 дБ. Для обеспечения заданной вероятности ошибки при сохранении отношения энергии встраиваемого бита к уровню шума в канале передачи требуется увеличить длину применяемой ПСП в 1,26 раз, что уменьшает скорость передачи информации по сравнению со случаем известного контейнера (изображений) в приемном блоке для различных алгоритмов встраивания (вероятность ошибочного приема равна 10^{-2}, отношение энергии встраиваемого бита к уровню шума в канале передачи равно −16,5 дБ):

встраивание на уровне пространства изображений – 0,0066 бит/пиксель;

встраивание на уровне пространства коэффициентов ДВП Лейзи – 0,0033 бит/пиксель;

встраивание на уровне пространства коэффициентов ДВП Хаара – 0,0033 бит/пиксель;

встраивание на уровне пространства коэффициентов ДКП – 0,0001 бит/пиксель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грибунин, В.Г.** Цифровая стеганография [Текст]/ В.Г. Грибунин, И.Н. Оков, И.В. Туринцев.–Солон-Пресс, 2002.

2. **Ingemar, J. Cox.** Digital watermaking and steganography [Текст]/J. Ingemar Cox, L. Miller Matthew, A. Bloom Jeffrey [et al.].–Morgan Kaufmann Publishers, 2008.

3. **Рашич, А.В.** Принципы обработки изображений: Учеб. пособие [Текст]/А.В. Рашич.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.–148 с.

УДК 519.876.5

П.Н. Мельников, М.А. Терпигорев, С.Б. Симонов

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА, ПОСТРОЕННОГО НА ДИНАМИЧЕСКОМ ЗВЕНЕ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОРЯДКА

Для восстановления полиномиального сигнала, подверженного высокочастотным искажениям, применяются фильтры, построенные на динамических звеньях. Например, в работе [1] представлен многокаскадный фильтр, построенный на апериодических звеньях. Для уменьшения ошибки фильтрации целесообразно использовать фильтр динамического звена произвольного порядка. Выбор произвольного порядка динамического звена и величин коэффициентов усиления дает возможность синтезировать фильтр, в наибольшей степени отвечающий заданным требованиям. Однако увеличение порядка динамических звеньев, используемых при синтезе фильтра, приводит к усложнению программной и аппаратной реализации фильтра.

В данной статье предлагается решение задачи построения структурной схемы многокаскадного фильтра, каждый каскад которого построен на динамическом звене произвольного порядка следующего вида:

$$W_n = \frac{1}{T_n s^n + T_{n-1} s^{n-1} + \ldots + T_1 s + 1}. \qquad (1)$$

Динамическое звено W_n описывается линейным однородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами при входном сигнале $p(t)=0$:

$$T_n y^{(n)}(t) + T_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \ldots + T_1 y'(t) + y(t) = 0. \qquad (2)$$

Звено W_n может быть представлено путем последовательного соединения и каскадирования пропорциональных и интегральных звеньев, как показано на рис. 1. Таким образом, программная и аппаратная реализации этого звена могут быть легко получены путем рекурсивного вызова процедур, либо увеличением количества элементов в электрической схеме.

Решение уравнения (2) есть общее решение линейного дифференциального уравнения порядка n с постоянными коэффициентами [3]. Возможны следующие варианты решений.

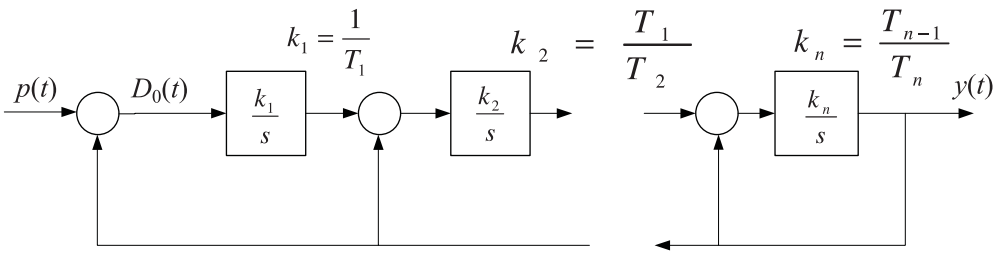


Рис.1. Структурная схема звена произвольного порядка

1. Если характеристическое уравнение имеет n различных действительных корней $\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n$, то общее решение имеет вид:

$$y_0(t) = C_1e^{-\lambda_1 t} + C_2e^{-\lambda_2 t} + ... + C_ne^{-\lambda_n t}.$$

2. Если характеристическое уравнение имеет *r-кратный корень* $\lambda_k = \lambda_{k+1}, ..., \lambda_{k+r-1}$, то общее решение принимает следующий вид:

$$y_0(t) = C_1e^{-\lambda_1 t} + ... + C_ke^{-\lambda_k t} + C_{k+1}te^{-\lambda_{k+1} t} + ...$$
$$... + C_{k+r-1}t^{r-1}e^{-\lambda_{k+r-1} t} + ... + C_ne^{-\lambda_n t}.$$

3. Если характеристическое уравнение имеет простые комплексные корни, то каждой паре корней $\lambda_{k,\,k+1} = a_k + ib_k$ в общем решении соответствуют слагаемые $C_ke^{-a_k t}\cos(bt)$, $C_{k+1}e^{-a_k t}\sin(bt)$.

4. Если характеристическое уравнение имеет кратные *комплексные корни* $\lambda_k = \lambda_{k+1} .. = \lambda_{2k+2r-1} = a_k + ib_k$, то в общем решении им соответствуют следующие слагаемые:

$$C_ke^{-a_k t}\cos(bt),\ C_{k+1}e^{-a_k t}\sin(bt),$$
$$C_{k+2}te^{-a_k t}\cos(bt),\ C_{k+3}te^{-a_k t}\sin(bt),$$
$$...$$
$$C_{2k+2r-2}t^{r-1}e^{-a_k t}\cos(bt),\ C_{2k+2r-1}t^{r-1}e^{-a_k t}\sin(bt).$$

Пусть на вход фильтра W_n подается сигнал, описываемый полиномиальной функцией времени порядка:

$$P^m(t) = K_mt^m + K_{m-1}t^{m-1} + ... + K_1t + K_0. \quad (3)$$

Тогда обработка сигнала (фильтрация) описывается уравнением:

$$T_n\,y^{(n)}(t) + T_{n-1}\,y^{(n-1)}(t) + ... + T_1\,y'(t) + y(t) = P^m(t). \quad (4)$$

Частное решение этого дифференциального уравнения ищется в виде полинома:

$$S^m(t) = A_mt^m + A_{m-1}t^{m-1} + ... + A_1t + A_0.$$

Подставим частное решение в исходное дифференциальное уравнение (2) и запишем его в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} A_0 & A_1 & A_2 & ... & ... & A_{m-2} & A_{m-1} & A_m \\ T_1A_1 & T_12A_2 & T_13A_3 & ... & ... & T_1(m-1)A_{m-1} & T_1mA_m & 0 \\ T_2\,2A_2 & T_2\cdot 3\cdot 2A_3 & T_2\,4A_4 & ... & ... & T_2\,m(m-1)A_m & 0 & 0 \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . \\ T_n\,n!A_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ ... \\ \\ \\ 0 \\ t^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_0 & ... & K_n & ... & K_m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ . \\ . \\ . \\ . \\ . \\ t^m \end{bmatrix}$$

Получим следующие соотношения для коэффициентов выходного и входного полиномиального сигнала, из которых определяются все коэффициенты A_n частного решения дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} &A_m = K_m \\ &A_{m-1} + T_1mA_m = K_{m-1} \\ &A_{m-2} + T_1(m-1)A_{m-1} + T_2m(m-1)A_m = K_{m-2} \\ &\vdots \\ &A_0 + T_1A_1 + 2T_2A_2 + ... + \mathrm{n}!T_nA_n = K_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для дальнейшего синтеза фильтра отметим следующие следствия решения дифференциального уравнения (4):

выходной сигнал есть полином той же степени, что и входной сигнал;

все коэффициенты полиномиального представления выходного сигнала можно выразить через коэффициенты полиномиального представления входного сигнала и постоянные времени фильтра;

старший член полиномиального представления выходного сигнала совпадает со старшим членом полиномиального представления входного сигнала.

Следовательно, для полиномиального сигнала порядка m полное решение уравнения (4) можно записать в виде:

$$y(t) = y_0(t) + S^m(t), \quad (6)$$

$$y(t) = y_0(t) + P^m(t) - Q^{m-1}(t), \quad (7)$$

где

$$Q^{m-1}(t) = P^m(t) - S^m(t).$$

В соответствии с рис. 1 ошибка фильтрации $D_0(t) = Q^{m-1} - y_0(t)$. Второе слагаемое в формуле ошибки фильтрации стремится к нулю для установившегося процесса. Этот член можно уменьшить или свести к нулю, если правильно выбрать начальные условия фильтрации.

Таким образом, важным следствием фильтрации полиномиального сигнала является то, что ошибка фильтрации − полиномиальная функция на единицу меньшего порядка, чем входной сигнал. Выходной сигнал есть полиномиальная функция того же порядка, что и входной сигнал, и имеет тот же старший член представления. При этом в выходном сигнале фильтр производит определенное подавление высокочастотной помехи.

Подвергнем дополнительной фильтрации сигнал ошибки $D_0(t)$. Тогда, следуя логике предыдущих рассуждений, на выходе фильтра сформируется сигнал $S_1^{m-1}(t)$ полиномиальной формы порядка $(m-1)$, а ошибка фильтрации будет представлена полиномом степени $(m-2)$. Коэффициент при старшем члене полинома $S_1^{m-1}(t)$ на выходе фильтра равен $T_1 m K_m$. Если произвести сложение двух полиномов $S_0^m(t)$ и $S_1^{m-1}(t)$, то в результирующем полиноме два коэффициента при старших членах будут равны двум старшим коэффициентам полинома исходного сигнала K_m и K_{m-1} соответственно. Таким образом, произведено восстановление в выходном сигнале двух членов из представления входного сигнала. Выходной сигнал $R_1^m(t)$ второго каскада фильтра содержит два старших члена, равных двум старшим членам входного сигнала $P^m(t)$:

$$R_1^m(t) = K_m t^m + K_{m-1} t^{m-1} + B_{m-2} t^{m-2} + \ldots + B_0 .$$

Ошибка фильтрации $D_1(t)$ есть полином степени $(m-2)$, на который наложена высокочастотная помеха.

Следовательно, чтобы полностью восстановить входной сигнал $P^m(t)$ на выходе фильтра, необходимо построить $(m+1)$ каскад из звеньев W_n (рис. 2). Выходной сигнал $R^m(t)$ равен входному сигналу $P^m(t)$.

Если входной сигнал $P^m(t)$ подвергнут искажениям высокочастотной помехи, то в выходном сигнале $R^n(t)$ влияние этой помехи можно значительно уменьшить, подбирая постоянные времени звеньев W_n. Подбирая начальные условия фильтрации можно существенно сократить время переходного процесса фильтра.

С помощью моделирования в среде Simulink® Matlab® исследованы характеристики двух четырехкаскадных фильтров, построенных на апериодических (n = 1) и колебательных (n = 2) звеньях [2]. Проанализированы фильтры, у которых сравнимы или равны длительности переходных процессов (что обеспечивается назначением постоянных времени). На рис. 3*а*, *б* представлены опытные оценки амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) сигналов фильтров.

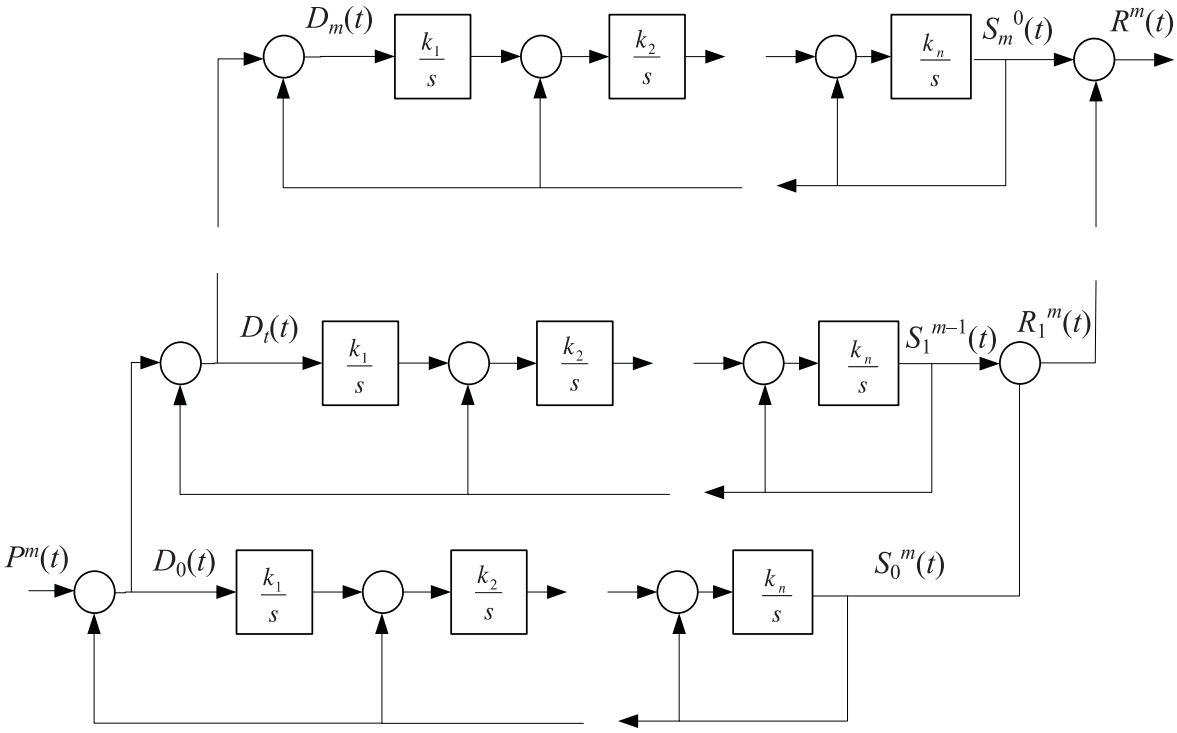


Рис. 2. Структурная схема многокаскадного фильтра

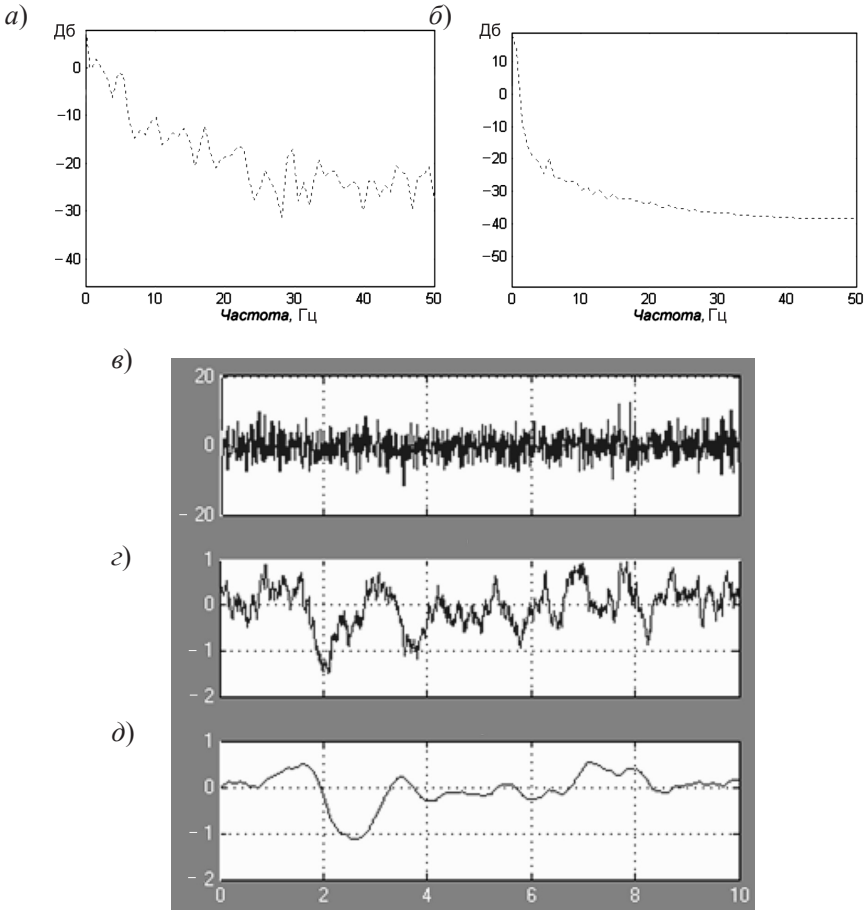


Рис. 3. Результаты моделирования четырехкаскадных фильтров:
а – АЧХ фильтра, построенного на апериодических звеньях; *б* – АЧХ фильтра, построенного на колебательных звеньях; *в* – входная высокочастотная помеха; *г* – сигнал, восстановленный апериодическим фильтром; *д* – сигнал, восстановленный колебательным фильтром

Сопоставление результатов моделирования дает возможность утверждать, что фильтр, построенный на колебательных звеньях, должен обладать лучшими свойствами к подавлению высокочастотных помех. Это подтверждает эксперимент по оценке восстановленного входного сигнала, результаты которого представлены на рис. 3 *г*, *д*.

Предлагаемая структура фильтра позволяет осуществлять восстановление полиномиальных сигналов, которые были подвержены высокочастотным искажениям. Выбор произвольного порядка динамических звеньев и постоянных времени дает разработчику возможность синтезировать фильтр, в наибольшей степени отвечающий характеру помех.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках мероприятия 2 аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 гг.)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вернер, В.В.** Восстановление полиномиального сигнала способом апериодической фильтрации [Текст]/В.В. Вернер, П.Н. Мельников, А.А. Сазонов// Системный анализ и информационно-управляющие системы: Сб. науч. тр.; Под ред. В.А Бархоткина.–М.: МИЭТ, 2006.–234 с.

2. **Дьяконов, В.** MATLAB: Учеб. курс [Текст]/В. Дьяконов.–СПб.: Питер, 2001.–592 с.

3. **Краснов, М.Л.** Обыкновенные дифференциальные уравнения. Задачи и примеры с подробными решениями: Учеб. пособие[Текст]/М.Л. Краснов, А.И. Киселев, Г.И. Макаренко.–М.: Едиториал УРСС, 2002. –Изд. 4-е, испр. –258 с.

УДК 621.396.624

В.Д. Купцов, В.П. Валюхов

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Фотоприемное устройство (ФПУ) в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) должно обладать рядом технических характеристик: высоким динамическим диапазоном, амплитудно-частотной характеристикой оптимальной формы, малым потребляемым током и др. Но основной характеристикой является чувствительность, поскольку именно она непосредственно влияет на дальность передачи информации в системе при заданной мощности оптического излучения в передатчике. Фундаментальное ограничение на чувствительность ФПУ накладывают внутренние шумы элементов, входящих в его состав, для представления которых воспользуемся методом эквивалентных канонических схем.

Метод эквивалентных канонических шумовых схем

Эквивалентные канонические шумовые схемы представлены на рис. 1. В схемах разграничены шумящий и нешумящий четырехполюсники, значения эквивалентных шумовых э.д.с. и тока определяются (или измеряются) при режимах короткого замыкания и холостого хода во входной цепи усилителя.

Как известно, наиболее часто шумы в электронных устройствах характеризуют коэффициентом шума F. Поэтому целесообразно использовать для расчета чувствительности ФПУ коэффициент шума F, методики определения которого хорошо разработаны. При этом удается учесть особенности конкретных схемных решений ФПУ, влияние их параметров на чувствительность.

Коэффициент шума F шумящих четырехполюсников можно представить в виде [1, 2]:

$$F = 1 + \frac{G_n}{G_s} + \left(G_s + \frac{B_s^2}{G_s}\right)R_n + \frac{B_s}{G_s}2\beta\sqrt{R_nG_n} + 2\alpha\sqrt{R_nG_n}\,,$$
$$F = 1 + \frac{R_n}{R_s} + \left(R_s + \frac{X_s^2}{R_s}\right)G_n + \frac{X_s}{R_s}2\beta\sqrt{R_nG_n} + 2\alpha\sqrt{R_nG_n}\,. \qquad (1)$$

Здесь $Z_s = R_s + jX_s$, $Y_s = G_s + jB_s$ – сопротивление и проводимость источника сигнала соответственно; R_n, G_n – эквивалентные шумовые сопротивление и проводимость шумящего четырехполюсника, шумы которого учитывают введением шумовых генераторов напряжения e_n и тока i_n со среднеквадратичными значениями $\overline{E_n^2} = 4kTR_n\Delta f$ и $\overline{I_n^2} = 4kTG_n\Delta f$ соответственно; $\gamma = \alpha + j\beta$ – коэффициент корреляции между шумовыми генераторами.

При преобразовании оптического излучения электрический сигнал содержит в себе дробовый шум, поскольку он порождается в результате случайного квантового процесса детектирования оптического сигнала в фотодиоде. Таким образом, спектральная плотность дробового шума p-i-n фотодиода $\overline{I_{дш}^2} = 2e\overline{I}$, а при использовании ЛФД из-за шума лавинного умножения $\overline{I_{дш}^2} = 2e\left(F_{лд}M^2\left(i_ф + I_{ТМ}\right) + I_{ТН}\right)$, где $i_ф$ – среднее значение фототока, причем $i_ф = \frac{\eta eP}{h\nu}$; η – квантовая эффективность, определяемая как отношение числа электронов, поступающих во внешнюю цепь, к числу падающих фотонов; $h\nu$ – энергия кванта света; e – заряд электрона; P – падающая световая мощность; $I_{ТМ}$ и $I_{ТН}$ – со-

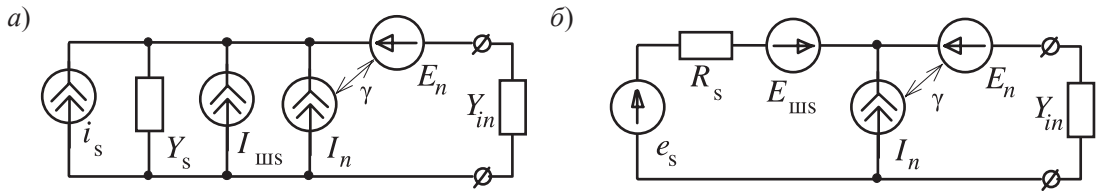


Рис. 1. Канонические эквивалентные шумовые схемы шумящих четырехполюсников

ответственно, умножаемая и неумножаемая компоненты темнового тока ЛФД.

В том случае, если умножение инициируется электронами, связь между коэффициентом шума и коэффициентом умножения определяется зависимостью Макинтайера $F_{лд} = M\left(1 - \frac{(1-k)(M-1)^2}{M^2}\right)$, где $k = \frac{\alpha_h}{\alpha_e}$ – отношение коэффициентов ударной ионизации дырок и электронов соответственно. Значения k для разных материалов следующие: в кремнии $k \cong 0{,}025$, в фосфиде индия и аналогичных составных материалах $k \cong 0{,}5$, в германии $k \cong 1$. Таким образом, для германиевых ЛФД, имеющих широкое распространение в длинноволновых линиях с λ=1,3 мкм и 1,55 мкм, выражение преобразовывается к простому виду $F_{лд} = M$, что подтверждается на практике [3]. Эквивалентную шумовую схему фотодиода возможно представить в виде эквивалентного источника тока $I_ф = \frac{Mi_ф + I_{дш} + e_s j\omega C_ф}{1 + j\omega C_ф r_s}$ с внутренней проводимостью $Y_ф = \frac{j\omega C_ф}{1 + j\omega C_ф r_s}$.

В качестве предусилителей ФПУ используют усилители с высоким входным импедансом (Hz) и трансимпедансные (Tz), причем в качестве активных элементов во входном каскаде предусилителя применяют полевые (FET) и биполярные (BiTr) транзисторы. В вариантах BiTrHz и FETHz для смещения фотодиода используют резистор смещения R_L (G_L), а в вариантах BiTrTz и FETTz – резистор обратной связи R_f (Y_f), имеющий, как правило, емкостную составляющую C_f.

Для вариантов BiTrTz и FETTz коэффициент шума F может быть найден либо из эквивалентной шумовой схемы усилителя с учетом обобщенной ООС [4], либо через известный коэффициент шума усилителя без ООС с учетом влияния обратной связи [5]. Учитывая, что в литературе имеется обширный материал по исследованию коэффициента шума различных схем транзисторных усилителей, зачастую предпочтительным оказывается второй путь. Результирующий коэффициент шума трансимпедансных усилителей (с параллельной ООС) можно представить выражением [6], в котором шумовые параметры имеют вид $R_n^f = R_n$; $G_n^f = G_n + \left(G_f^2 + B_f^2\right)R_n + G_f + B_f \cdot 2\beta\sqrt{R_n G_n} + G_f \times$ $\times\, 2\alpha\sqrt{R_n G_n}$; $\left(2\beta\sqrt{R_n G_n}\right)^f = 2\beta\sqrt{R_n G_n} + 2B_f R_n$; $\left(2\alpha\sqrt{R_n G_n}\right)^f = 2\alpha\sqrt{R_n G_n} + 2G_f R_n$.

Для анализа шумовых свойств фотоприемных устройств эквивалентную шумовую схему активного элемента (биполярного транзистора BiTr или полевого FET) возможно представить в виде Т-образной или гибридной П-образной схем. Гибридная П-образная шумовая схема замещения биполярного транзистора, известная в литературе под названием *схемы Джиаколетто*, учитывает и вполне удовлетворительно отражает все основные процессы, происходящие в транзисторе практически во всем диапазоне частот, в котором могут быть реализованы его усилительные свойства. Шумовые генераторы отображают дробовые шумы и шумы токораспределения прямых токов базы и коллектора, тепловые шумы объемного омического сопротивления базы, дробовые шумы обратного коллекторного и эмиттерного тока. Вследствие малости обратных токов последними двумя генераторами возможно пренебречь.

Средний квадрат выходного напряжения состоит из суммы слагаемых от полезного сигнала на выходе $\overline{|U_{2с}^2|}$ и шума $\overline{|U_{2ш}^2|}$. Отношение этих двух компонент выходного напряжения определяет отношение сигнал/шум

$$SNR = \sqrt{\frac{|i_ф|^2}{2e \cdot \Delta f \cdot F_{лд}\left(|i_ф|^2 + \overline{I_{ТМ}^2} + \frac{\overline{I_{ТН}^2}}{M^2}\right) + \Delta f\,\frac{\overline{N_{pin}^2}}{M^2}}}, \quad (2)$$

где через $\overline{N_{pin}^2}$ обозначено среднеквадратичное значение спектральной плотности выходного шумового тока ФПУ.

В том случае, если используется фотодиод без лавинного усиления, квантовые шумы имеют меньшее значение по сравнению с остальными шумами, и ими можно пренебречь. Тогда

$$SNR = \sqrt{\frac{|i_ф|^2}{\Delta f \cdot \overline{N_{pin}^2}}}. \quad (3)$$

Пороговой чувствительностью фотоприемного устройства называется минимальная падающая световая мощность, при которой среднеквадратичное значение сигнала равно среднеквадратичному значению шума (т. е. =1). Реальная чувствительность ФПУ определяется как минимальная падающая световая мощность, обеспечивающая при регистрации сигнала заданную вероятность ошибки (в цифровых системах), либо заданное отношение сигнал/шум (в аналоговых системах). Спектральное значение пороговой чувствительности (в единичной полосе частот) ФПУ с фотодиодом в p-i-n режиме определяется выражением $\Phi_{n.pin} = \frac{1}{S}\sqrt{\Delta f \cdot \overline{N_{pin}^2}}$, где $S = \frac{\eta \cdot e}{h \cdot \nu}$ – световая чувстви-

тельность фотодиода. Спектральное значение чувствительности ФПУ при вероятности ошибки (соответствует случаю = 6) определяется выражением $\Phi_{n.pin} = \frac{6}{S}\sqrt{\Delta f \cdot \overline{N_{pin}^2}}$. При использовании лавинного усиления квантовые шумы сравнимы со всеми остальными шумами, причем общий уровень шума на выходе линейной части ФПУ становится зависимым от уровня принимаемого сигнала.

Для оптимизации ФПУ вводят параметр качества биполярных транзисторов, инвариантный току эмиттера I_e [7]. Предельная частота коэффициента усиления по току $f_{\text{Т}}$ в схеме с общим эмиттером прямо пропорциональна току эмиттера I_e в диапазоне рабочих токов, а сопротивление эмиттера r_e обратно пропорционально току эмиттера. При этом получается, что их произведение $f_{\text{Т}} \cdot r_e$ в первом приближении есть величина постоянная, если оба эти параметра измерены при одном и том же токе эмиттера данного транзистора, т. е. $f_{\text{Т}} \cdot r_e = \text{const}(I_e) = A$ – параметр качества транзистора. С учетом введенного параметра качества значений шумовых генераторов, спектральная плотность выходного шумового тока усилителя принимает вид:

$$\overline{|N_{pin}|^2} = 4k\text{T}\left(C + \varpi^2 D + \varpi^4 E\right), \qquad (4)$$

где введены обозначения: $C = G_f + G_f^2\left(r_b + \frac{k\text{T}\alpha_0}{2eI_э}\right) + \frac{eI_э}{2k\text{T}\beta}$; $D = C_ф^2\left(r_s + r_b\right)\left(1 + \frac{eI_э}{2k\text{T}\beta}\left(r_s + r_b\right)\right) + \frac{k\text{T}\alpha_0}{2eI_э(2\pi)^2} \times \left(\frac{1}{A^2} + 2\pi\left(C_ф + C_k\right)\left(2\pi\left(C_ф + C_k\right) + \frac{2}{A}\right)\right)$.

Численный расчет показывает, что вклад от членов, пропорциональных ϖ^4 на два-три порядка меньше, чем от членов, пропорциональных ϖ^2. Таким образом, последним слагаемым в (4) возможно пренебречь. Значение спектральной чувствительности увеличивается с ростом частоты, уменьшается с ростом сопротивления трансимпеданса и имеет минимум при оптимальном токе:

$$I_{\text{опт}} = \frac{kT\sqrt{\beta}}{e} \times$$

$$\times\sqrt{\frac{G_f^2 + \frac{\varpi^2}{(2\pi)^2}\cdot\left(\frac{1}{A^2} + 2\pi\left(C_ф + C_к\right)\cdot\left(2\pi\left(C_ф + C_к\right) + \frac{2}{A}\right)\right)}{1 + \varpi^2 C_ф^2\left(r_s + r_b\right)^2}}.$$

Кроме высокочастотных малошумящих биполярных транзисторов в ФПУ применяются работающие в микроволновом диапазоне полевые транзисторы (FET), полевые транзисторы с барьером Шотки (MESFET) и транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT). После проведения расчетов по предложенной методике коэффициенты в выражении для спектральной плотности выходного шумового тока усилителя на полевом транзисторе с обратной связью (FETTz) принимают вид:

$$C = G_f\left(1 + 2r_{so}\frac{qI_G}{2k\text{T}}\right) + G_f^2\left(r_{so} + 4r_d + \frac{K_1 + K_2}{g_m} + r_{so}^2\frac{qI_G}{2k\text{T}}\right);$$

$$D = \left(r_{so} + r_s + 4r_d + \frac{K_1 + K_2}{g_m} + r_{so}^2\frac{qI_G}{2k\text{T}}\right)C_ф^2 + \frac{K_2 C_{gs}^2}{g_m}\left(1 + r_{so}G_f\right) + \left(r_{so} + r_d + \frac{K_1}{g_m}\right)C_{dg}^2 + \frac{K_3}{g_m}\left(C_{gs} + C_{dg}\right)^2 + 2C_ф\left[\left(r_{so} + 2r_d + \frac{K_1 + K_3}{g_m}\right)C_{dg} + \frac{K_3}{g_m}C_{gs}\right],$$

где K_1, K_2 и K_3 – константы, значения которых зависят от постоянных напряжений на электродах; r_{so}, r_d, r_s – паразитные сопротивления истока, стока, ФД; C_{gs}, C_{dg} – емкости переходов ПТ; g_m – крутизна ПТ; I_G – ток затвора.

Амплитудно-частотные характеристики фотоприемных устройств

Волоконно-оптические системы передачи информации как цифровые, так и аналоговые, должны обладать достаточной полосой пропускания и иметь определенную форму АЧХ. Поскольку фотодиод является источником тока, а выход усилителя должен обладать большой нагрузочной способностью (т. е. низким выходным сопротивлением), передаточные свойства усилителя фототока удобно характеризовать импедансом преобразования $Z_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{вых}}}{i_ф}$. Тогда среднеквадратичное значение напряжения шума на выходе линейной части ФПУ определяется выражением $\overline{|U_{\text{ш}}|^2} = \sqrt{\int_0^{+\infty}\overline{|I_{\text{ш}}(f)|^2}\cdot|Z_{\text{пр}}|^2\,df}$, где $\overline{|I_{\text{ш}}(f)|^2}$ – спектральная плотность эквивалентного шумового тока ФПУ, приведенная ко входу усилителя фототока. Чувствительность ФПУ резко ухудшается с ростом полосы частот, поскольку $\overline{|I_{\text{ш}}(f)|^2}$ возрастает на верхних частотах, пропорционально $\sim\varpi^2$. Следовательно, для улучшения чувствительности следует максимально уменьшить полосу частот. Однако при уменьшении полосы пропускания в

системах связи, использующих импульсные сигналы (КИМ, ЧИМ, ВИМ и др.), увеличивается длительность фронтов импульсов, в результате чего происходит перекрытие фронтов соседних импульсов. Этот эффект получил в литературе название *межсимвольной помехи*. Таким образом, в системах связи существует оптимальная с точки зрения чувствительности полоса пропускания фотоприемного устройства, которая определяется компромиссом между межсимвольной помехой и шумами в полосе частот.

Импеданс преобразования линейной части фотоприемного устройства выражается через систему *Y*-параметров усилителя фототока $Z_{\text{пр}} = -\dfrac{Y_{21}}{\left(Y_{\text{ф}} + Y_{11}\right)\left(Y_{22} + Y_{\text{н}}\right) - Y_{12}Y_{21}}$, причем могут быть рассчитаны схемы с транзисторами биполярными, полевыми (FET), полевыми с барьером Шотки (MESFET) и с высокой подвижностью электронов (HEMT). В общем случае выражение для $Z_{\text{пр}}$ представляет собой отношение полиномов частоты высокого порядка, однако оно может быть приведено к виду $Z_{\text{пр}} = \dfrac{Z_0}{1 + j\varpi \cdot \tau - (\varpi \cdot \tau)^2 m}$. В [8] приведен метод приближенного расчета цепей, который позволяет свести изучение процесса с характеристическим уравнением более высокого порядка к анализу уравнения второго порядка.

Определение интегральной чувствительности фотоприемных устройств

С учетом вида $Z_{\text{пр}}$ интегральная чувствительность фотоприемного устройства преобразуется к виду $\Phi = \dfrac{SNR}{S}\sqrt{\dfrac{1}{2\pi}\displaystyle\int_0^{+\infty}\dfrac{2eF\left(i_{\text{ф}} + I_{\text{ТМ}} + \dfrac{I_{\text{ТН}}}{M^2}\right) + \dfrac{\overline{N_{pin}^2}}{M^2}}{\left(1 - (\varpi\tau)^2 m\right)^2 + (\varpi\tau)^2}d\varpi}$,

которое в случае использования p-i-n ФД упрощается к виду:

$$\Phi_{pin} = \frac{SNR\sqrt{4kT}}{S}\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{+\infty}\frac{C + \varpi^2 D}{\left(1 - (\varpi\tau)^2 m\right)^2 + (\varpi\tau)^2}d\varpi}, \quad (5)$$

где C и D – коэффициенты в выражении для спектральной плотности выходного шумового тока усилителя.

В зависимости от величины коэффициента возможны три режима работы фотоприемного устройства:

1) апериодический режим (корни характеристического уравнения действительные, но не равные друг другу величины) имеет место при $m < 0{,}25$;

2) критический режим (корни характеристического уравнения действительные и равные между собой величины) наступает при $m = 0{,}25$;

3) колебательный режим (корни характеристического уравнения взаимно-сопряженные комплексные величины) имеет место при $m > 0{,}25$.

В фотоприемных устройствах волоконно-оптических линий связи используется колебательный режим как обеспечивающий наилучшее быстродействие и форму сигнала на выходе. Интегралы

$$I_2 = \int_0^{+\infty}\frac{d\varpi}{\left(1 - (\varpi\tau)^2 m\right)^2 + (\varpi\tau)^2}, \qquad I_3 = \int_0^{+\infty}\frac{\varpi^2 d\varpi}{\left(1 - (\varpi\tau)^2 m\right)^2 + (\varpi\tau)^2}, \quad (6)$$

входящие в (5), являются обобщением интегралов Персоника [9] для передаточной характеристики широкополосного усилителя фототока.

Интегралы Персоника получены для случая, когда частотная характеристика линейной части приемника имеет вид фильтра Найквиста с полосой пропускания $B/2$ (B – скорость передачи данных), преобразующего поступающий на вход сигнал к форме гауссова или косинусоидального импульса. Такой способ приема приемлем для систем со строго фиксированной скоростью передачи данных. Техническая реализация требует использования сложных фильтров, либо трансверсальных фильтров (линия задержки с отводами), либо их комбинацию [10]. Вследствие этого возникает необходимость индивидуальной настройки каждого фотоприемного устройства в протяженной линии связи, что существенно затрудняет унификацию модулей. Персоником необходимость такого усложнения никак не обоснована [11]. Позднее показано [12], что применение трансверсальных фильтров не дает существенного выигрыша в чувствительности при достаточной широкополосности оптического кабеля. Поставив частотную характеристику ФПУ в жесткую зависимость от формы принимаемых оптических импульсов, разработчик лишается возможности ее оптимизировать. Между тем, результаты испытаний волоконно-оптических систем связи показывают, что оптимизация АЧХ позволяет повысить чувствительность ФПУ. Предположение об использовании фильтра Найквиста не дает преимуществ и с точки зрения методики расчета. Для ряда параметров не удается

получить аналитических выражений, требуется их расчет на компьютере. При этом метод гауссовой аппроксимации лишается своего основного преимущества – возможности получить сравнительно простые аналитические выражения для расчета порога чувствительности в широком диапазоне изменения параметров.

Для систем с ЧИМ-сигналом применение фильтра Найквиста с полосой пропускания $B/2$ не представляется возможным. Для ЧИМ-сигнала ФПУ должно работать в широком диапазоне скоростей передачи данных и для реализации приемлемой чувствительности требуется значительное расширение полосы пропускания линейной части ФПУ вплоть до третьей-четвертой гармоники центральной частоты передаваемого сигнала.

Интегралы I_2 и I_3 вычисляются с помощью разложения на простейшие и применения теоремы о вычетах функции комплексной переменной. Для случая колебательного режима $I_2 = \dfrac{\pi}{2\tau}$ и $I_3 = \dfrac{\pi}{2\tau^3 m}$.

Отношение сигнал/шум на выходе линейной части фотоприемного устройства определяется выражением:

$$SNR = \sqrt{\frac{\left|i_{\text{ф}}\right|^2}{\dfrac{2eF_{\text{лд}}\left(i_{\text{ф}} + I_{\text{ТМ}} + \dfrac{I_{\text{ТН}}}{M^2}\right)}{4\tau} + \dfrac{4kT}{M^2}\left(\dfrac{C}{4\tau} + \dfrac{D}{4\tau^3 m}\right)}}.$$

Относительно фототока имеем уравнение $\left|i_{\text{ф}}\right|^2 - 2p\left|i_{\text{ф}}\right| - q = 0$, где введены обозначения $p = \dfrac{(SNR)^2 \cdot e \cdot F_{\text{лд}}}{4\tau}$;

$$q = (SNR)^2\left(\frac{2eF_{\text{лд}}\left(i_{\text{ф}} + I_{\text{ТМ}} + \dfrac{I_{\text{ТН}}}{M^2}\right)}{4\tau} + \frac{4kT}{M^2}\left(\frac{C}{4\tau} + \frac{D}{4\tau^3 m}\right)\right).$$

Решение этого уравнения имеет вид $\left|i_{\text{ф}}\right| = p\left(1 + \sqrt{1 + \dfrac{q}{p^2}}\right)$.

Таким образом, интегральная чувствительность фотоприемного устройства определяется выражением:

$$\Phi = \frac{(SNR)^2 eF}{S \cdot 4\tau}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\tau\left(2eF_{\text{лд}}\left(I_{\text{ТМ}} + \dfrac{I_{\text{ТН}}}{M^2}\right) + \dfrac{4kT}{M^2}\left(C + \dfrac{D}{\tau^2 m}\right)\right)}{(SNR)^2 e^2 F^2}}\right).$$

В случае использования p-i-n фотодиода возможно пренебречь квантовыми шумами по сравнению со всеми остальными и выражение значительно упрощается:

$$\Phi_{pin} = \frac{SNR\sqrt{kT}}{S} \cdot \sqrt{\frac{C}{\tau} + \frac{D}{\tau^3 m}}. \qquad (7)$$

Увеличение τ эквивалентно сужению полосы пропускания линейной части ФПУ и повышает его чувствительность. Однако чрезмерное сужение полосы пропускания приводит к затягиванию фронтов импульсов и, соответственно, к их перекрытию. Перекрытие фронтов импульсов представляет собой межсимвольную помеху.

Значения параметров τ и m для различных схем включения усилительных приборов исследованы и приводятся в литературе [8].

Минимизация полученного функционала (7) при заданных скорости передачи данных и вероятности ошибки при приеме сигнала достигается решением системы дифференциальных уравнений в частных производных $\partial\Phi/\partial G_f$, $\partial\Phi/\partial\tau$, $\partial\Phi/\partial I_{\text{Э}}$ и $\partial\Phi/\partial Gm = 0$ относительно значения трансимпеданса, формы амплитудно-частотной характеристики, определяемой параметром m, тока входного транзистора и всех других параметров.

Предложенная методика позволяет проектировать ФПУ для волоконно-оптических линий связи, вплоть до законченного, технически реализуемого, оптимального схемного решения. Эта методика была использована при проектировании отечественных модулей ФПУ-НЧ, ФПУ-ВЧ, ФПМ-АРУ, ФПУ-01–ФПУ-10 (НПО «Авангард», СПбГПУ) [13].

На рис. 2 приведены зависимости интегральной чувствительности от скорости передачи при параметрах сопротивления трансимпеданса R_f = 5, 10, 100 кОм и 1 МОм, токовой чувствительности фотодиода S =0,5А/Вт, емкости фотодиода $G_{\text{ф}}$ = 2 пФ, параметра качества транзистора А = 25 ГГц·Ом, последовательного объемного сопротивления базовой области r_b = 15 Ом, емкости коллекторного перехода C_k = 1 пФ. Экспериментальные значения чувствительности разработанных модулей фотоприемных устройств ФПУ-НЧ, ФПУ-ВЧ и ФПУ-АРУ показаны на рис. 2. Следует отметить хорошее соответствие теоретических расчетных значений чувствительности с результатами экспериментальных измерений.

- Предложен метод расчета чувствительности фотоприемных устройств волоконно-оптических линий связи на основе метода эквивалентных канонических шумовых схем. Метод позволяет использовать выражения для коэффициента шума усилителей, методы анализа которого хорошо разработаны.
- Для предусилителей ФПУ на биполярных

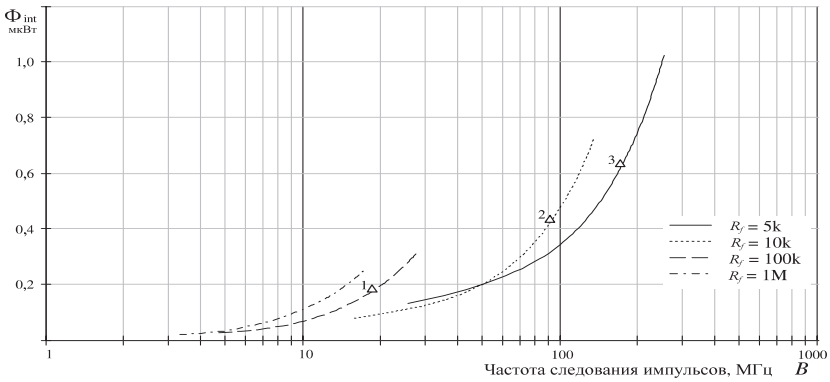


Рис. 2. Зависимости интегральной чувствительности от скорости передачи
1_Δ ФПУ-НЧ; 1_Δ ФПУ-ВЧ; 3_Δ ФПУ-АРУ

(BiTrHz и BiTrTz) и полевых (FETHz и FETTz) транзисторов разработана методика расчета коэффициента шума для случая обобщенной ООС через известный коэффициент шума усилителя без обратной связи. Поскольку в литературе имеется обширный материал по исследованию коэффициента шума различных усилительных схем, эта методика часто оказывается предпочтительной.

• Метод эквивалентных канонических шумовых схем может быть легко формализован и распространен на случай использования в ФПУ усилителей на биполярных транзисторах с гетеропереходом (HBT), псевдоморфных транзисторов с высокой подвижностью электронов (PHEMT), арсенид-галлиевых полевых транзисторов (GaAs FET) в микроволновом диапазоне.

• Результаты теоретических расчетов чувствительности ФПУ находятся в хорошем соответствии с экспериментальными значениями как полученными в процессе собственных исследований авторами работы, так и опубликованными другими исследователями для широкого спектра используемых в ФПУ активных элементов (биполярные транзисторы, полевые транзисторы, транзисторы с гетеропереходом, псевдоморфные транзисторы). Разработанная методика расчета чувствительности успешно использовалась при проектировании целого ряда отечественных ФПУ на НПО «Авангард», в СПбГПУ, в НПО «Волна», в МГП «Ротек», в «Фобос-3» и др. Все это подтверждает корректность разработанной методики расчета чувствительности фотоприемных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валюхов, В.П.** К вопросу определения чувствительности фотоприёмных устройств [Текст]/В.П. Валюхов, В.Д. Купцов//Вопросы радиоэлектроники.–Сер. ТПО.–1984.–Вып. 3.–С. 33–39.

2. **Жалуд, В.** Шумы в полупроводниковых устройствах [Текст]/В. Жалуд, В.Н. Кулешов.–М.: Сов.радио, 1977.

3. **Smith, R.** Optimal design of high speed analog APD receivers [Текст]/R. Smith//SPIE.–1988.–Vol. 987.–P. 88–95.

4. **Kobayashi, Y.** A 1.55 mcm 450 Mbit/s high sensitivity receiver design and long transmission experiment [Текст]/Y. Kobayashi, Y. Hayachi//Trans. IEICE.–1987.–Vol. E70.–№ 5.–P. 460–466.

5. **Валюхов**, **В.П.** Коэффициент шума усилителей с общими отрицательными обратными связями [Текст]/В.П.Валюхов,А.И.Сурыгин//Изв.вузовМВиССОСССР. Радиоэлектроника.–1982.–Т. 25.–№ 11.–С. 36–40.

6. **Иверсен** Влияние обратной связи на коэффициент шума [Текст]/Иверсен//ТИИЭР.–1975.–Вып. 3.–С. 63.

7. **Зайцев, Д.Ф.** Оптимизация шумовых характеристик предусилителей для быстродействующих фотоприемников волоконно-оптических линий связи [Текст]/Д.Ф. Зайцев//Радиотехника и электроника.–1985.–Т. 30.–№ 8.–С. 1630–1633.

8. **Агаханян, Т.М.** Линейные импульсные усилители [Текст]/Т.М. Агаханян.–М.: Связь, 1970.

9. **Personick, S.D.** Receiver design for digital fiber optic communication system [Текст]/S.D. Personick//Bell system technical journal.–1973.–Vol. 52.–P. 843–886.

10. **Мурадян, А.Г.** Системы передачи информации по оптическому кабелю [Текст]/А.Г. Мурадян, С.А. Гинзбург.–М.: Связь, 1980.

11. **Крупина, В.Л.** Инженерная методика расчета порога чувствительности приемных оптоэлектронных модулей в цифровых световодных системах передачи информации [Текст]/В.Л. Крупина//Техника средств связи. –Сер. ТПС.–1985.–№ 1.–С. 11–19.

12. **Unwin, R.T.** A light speed optical receiver [Текст]/R.T. Unwin//Opt. and Quant. Electron.–1982.–Vol. 14.–№ 1.–P. 61–66.

13. **Валюхов, В.П.** Гибридно-пленочный фотоприемный модуль с большим динамическим диапазоном для телевизионного волоконно-оптического канала [Текст]/В.П. Валюхов, В.Д. Купцов//Волоконно-оптическая техника.–1993.–Вып. 2.–С. 32–34.

УДК 608.4.

М.А. Смольникова

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА С ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

По данным ИКАО большинство катастроф, связанных со столкновением с подстилающей поверхностью в управляемом полете, были вызваны недостаточной информированностью летного экипажа о препятствиях вблизи самолета и вдоль планируемой траектории полета. В связи с этим в состав бортового оборудования были введены системы, обеспечивающие обзор впереди самолета в пределах предустановленного рабочего пространства и своевременную сигнализацию, в случае попадания в него элементов подстилающей поверхности [1]. Такие системы получили название TAWS (Terrain Awareness and Warning System). В русскоязычной технической литературе такие системы называют *системами раннего предупреждения близости земли* (СРПБЗ). Минимальные требования к ним определены в стандарте ИКАО TSO-151a, принятом в 1999 г. [2]. Система TAWS выполняет несколько функций, одна из которых – FLTA (Forward Looking Terrain Avoidance) – функция раннего предупреждения близости земли. Функция включает обзор ограниченной области пространства впереди самолета вдоль и ниже горизонтальной и вертикальной траектории полета и обеспечивает необходимую сигнализацию в случае возникновения потенциальной опасности столкновения.

Бортовая система, реализующая указанную функцию, использует навигационную информацию о координатах и параметрах движения воздушных судов, полученную от приемника GPS, а также от других навигационных систем, например ИНС. В состав СРПБЗ входит база данных рельефа (БДР), база данных искусственных препятствий и аэронавигационная база данных (в дальнейшем, говоря о БДР, будем подразумевать как природные, так и искусственные препятствия). Информация из БДР, а также сведения о широте и долготе текущего местоположения воздушного судна, путевой скорости, угле пути, высоте полета, вертикальной скорости, поступают в модуль определения наличия препятствий около воздушного судна, где обрабатываются функцией оценки угрозы. В случае, если угроза существует, система выдает предупреждающую звуковую и визуальную сигнализацию.

Для определения уровня угрозы, которую представляет собой то или иное препятствие, перед воздушным судном в направлении его движения строят рабочее пространство. Размер и форма его зависят от ряда факторов: от режима и этапа полета, текущих параметров полета самолета и совершаемых им эволюций, условий полета.

Цель данной статьи – проведение подробного анализа и обоснование структуры рабочего пространства.

Рабочее пространство состоит из двух зон: зоны внимания (ЗВ) и зоны предупреждения (ЗП). В существующих системах данные о рельефе и искусственных препятствиях, отображаемые на дисплее, окрашены в цвета, согласно степени опасности, которую они представляют.

Зоны ориентированы по направлению полета воздушного судна, каждая из них представляет собой трехмерную область пространства. Вертикальное и горизонтальное сечение зон, принятых в СРПБЗ [3, 4], показано на рис. 1.

Размер зон в продольном направлении является функцией от скорости движения воздушного судна Vп, и временных параметров, которые выбирают исходя из требований по безопасному маневрированию при обнаружении препятствий, а также учитывают возможные изменения параметров полета.

Полное время прогноза Tп должно учитывать летно-технические характеристики данного типа воздушного судна и выбираться с расчетом

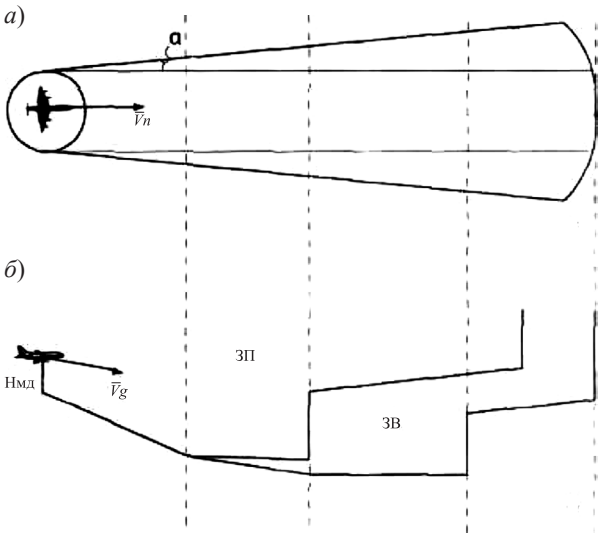


Рис. 1. Зона внимания и зона предупреждения:
а – горизонтальное сечение; *б* – вертикальное сечение

успешного маневрирования воздушного судна без выхода за эксплутационные ограничения. В то же время, зоны должны быть жестко ограничены, т. к. избыточная сигнализация будет отвлекать внимание экипажа и со временем притуплять свою значимость. Полное время прогноза также должно учитывать время реакции экипажа на поступившее предупреждение. После подачи сигнала на дисплее пилот должен осмыслить полученный сигнал, проанализировать сложившуюся ситуацию, принять решение и начать выполнение маневра уклонения. Назовем это время *временем запаздывания* $t_{зап}$; обычно оно составляет 5–10 с [4]. Маневр уклонения чаще всего проводят в вертикальной плоскости, как наиболее быстрый. С учетом данных рассуждений полное время прогноза для среднемагистральных воздушных судов составляет от 40 до 90 с.

Вокруг воздушного судна строится цилиндрическая защищенная зона, в которой нельзя допустить нахождение препятствий.

Вертикальное сечение данной области имеет размер, равный величине минимально допустимой высоты пролета над препятствием Нмд, определяется нормами стандарта [2] и, в зависимости от этапа полета, варьируется от 30 до 150 м.

Угол расширения боковых границ рабочего пространства α в горизонтальной плоскости (рис. 1 *а*) в простых условиях должен составлять не менее 5°, а в случае выполнения воздушным судном маневра разворота угол увеличивают пропорционально скорости выполнения разворота.

В существующих системах вертикальной плоскости границы ЗВ И ЗП имеют достаточно сложную конфигурацию, показанную на рис. 1 *б*.

Для обоснования формы вертикального сечения рабочего пространства и выбора его параметров используются следующие основные предположения:

1. Пилоту до начала выполнения маневра уклонения необходимо время для восприятия и анализа изображения, предъявляемого на экране кабинного индикатора. Если воздушное судно имеет вертикальную скорость V_e, то на интервале времени запаздывания самолет продолжает снижаться/набирать высоту.

2. При выполнении маневра должен выполнятся ряд эксплутационных ограничений, среди которых большое значение имеет допустимый угол атаки и допустимая вертикальная перегрузка.

3. Если воздушное судно выполняет вертикальный маневр по уклонению от препятствия при снижении, то необходимо учитывать просадку, т. е. потерю высоты от момента подачи сигнализации до момента начала набора высоты.

4. Во время выполнения маневра уклонения, а также во время запаздывания экипажа на самолет воздействуют различные возмущающие факторы, наиболее опасным среди которых является сдвиг ветра [5].

5. Рассматривается следующий подход к конструированию вертикального профиля рабочей зоны. Представим нижнюю границу рабочего пространства в виде ломаной, которая является аппроксимацией траектории движения воздушного судна, выполняющего вертикальный маневр. Типичный вид такой траектории хорошо известен. На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования процесса выполнения вертикального маневра уклонения среднемагистральным воздушным судном. На графике оси соответствуют координатам воздушного судна: X_g – продольной, Y_g – вертикальной.

На графике 1 начальный участок траектории соответствует времени задержки и при отсутствии внешних возмущений представляет собой прямолинейный отрезок с углом наклона траектории θ. После указанной временной задержки вертикальная скорость начинает уменьшаться из-за действия руля высоты и увеличения тяги двигателей. Наибольшая просадка имеет место в момент, когда вертикальная скорость равна нулю. Затем вертикальная скорость увеличивается и до-

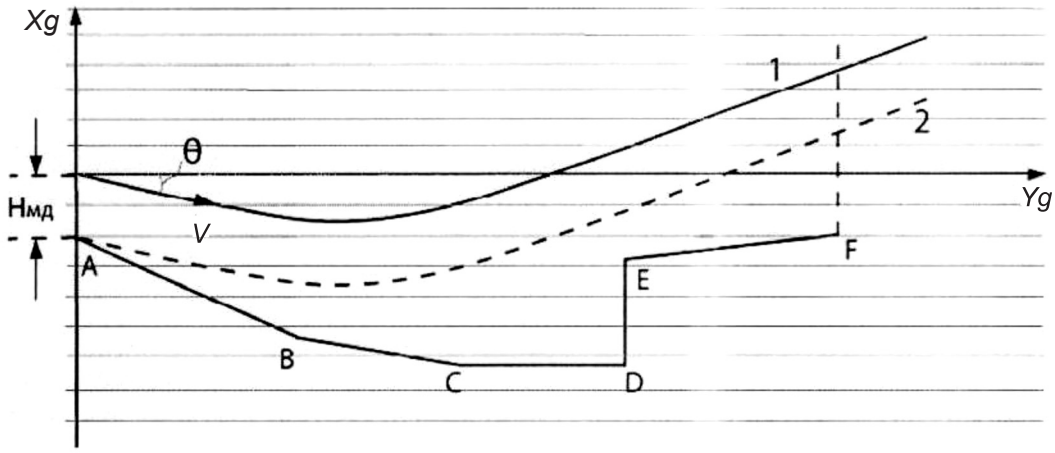


Рис. 2. Аппроксимация нижней границы траектории движения самолета

стигает установившегося значения, которое зависит от величины избытка тяги. Пунктирная линия 2 была получена путем смещения вниз траектории движения 1 на величину, равную Нмд. Аппроксимация опущенной траектории представляет собой ломаную ABCDEF. Первый отрезок AB имеет наклон, соответствующий углу наклона траектории θ, увеличенного на Δ. Величина Δ учитывает вариации вертикальной скорости. Проекция отрезка AB на горизонтальную ось соответствует расстоянию, которое преодолеет воздушное судно за время $t_{зап}$ +Δt, т. е. время запаздывания, увеличенное на запас Δt. Проекция отрезка BC на горизонтальную ось соответствует дистанции полета до момента, когда вертикальная скорость равна нулю, увеличенного на запас $V_п$Δt. Наклон отрезка BC равен θ. Следующий отрезок CD горизонтальный и продолжается до тех пор, пока скорость набора отличается более чем на 10 % от установившейся. Из точки D граница идет вертикально вверх, не доходя до линии 2 на величину Δh. Отрезок EF имеет наклон 6° и продолжается до величины $V_п T_{зп}$, где $T_{зп}$ ° заранее установленное время для зоны предупреждения.

На траекторию вертикального маневра существенное влияние оказывает воздействие внешней среды, прежде всего опасен попутный ветер, а также сдвиг ветра. Примерный вид траектории при внезапном появлении попутного ветра в момент принятия решения о выполнении маневра

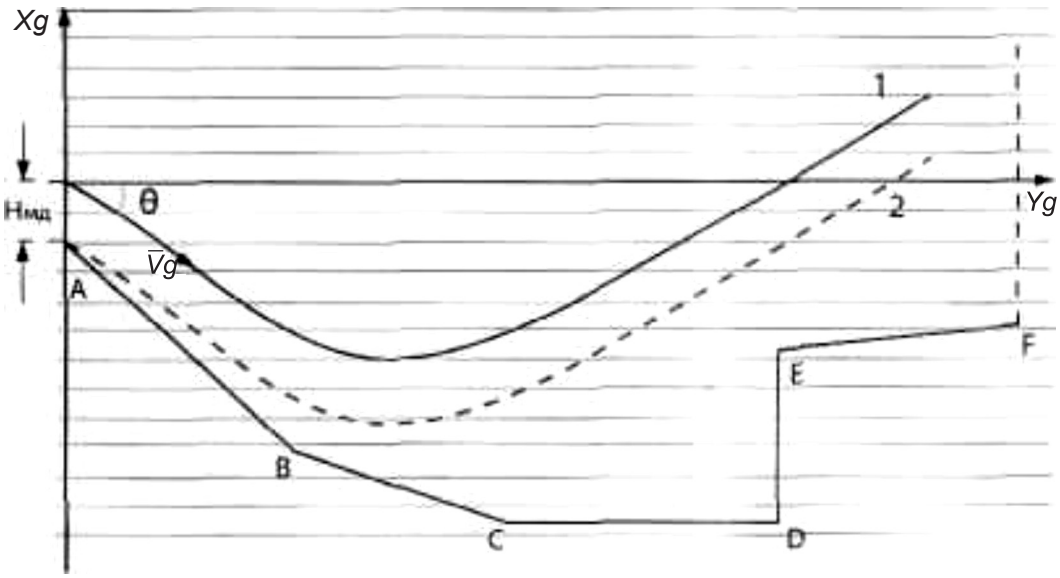


Рис. 3. Аппроксимация нижней границы траектории движения самолета при сдвиге ветра

показан на рис. 3. Проведя построения, аналогичные указанным выше, получим аппроксимацию. Если провести расчеты для наихудшего случая, т. е. для максимально допустимого ветра, то полученную аппроксимацию можно использовать для обоснования параметров рабочей зоны внимания. При наличии на борту устройства, позволяющего обнаружить сдвиг ветра и оценить продольную составляющую скорости ветра, следует соответствующим образом изменить параметры ЗП. Один из вариантов реализации такого способа построения рабочего пространства предложен в [6]. Подобная перестройка ЗП позволит, с одной стороны, повысить достоверность оценки угрозы, а, с другой стороны, снизить уровень псевдоложных тревог.

Проведенный анализ характеристик СРПБЗ и предложение по построению рабочего пространства позволяют усовершенствовать характеристики эксплуатируемых систем и, тем самым, повысить безопасность полетов.

Автор выражает благодарность А.И. Красову за помощь при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабуров, В.И.** Принципы интегрированной бортовой авионики [Текст]/В.И. Бабуров, Б.В. Папоморенко.–СПб.: Агенство «РДК-Принт», 2005.–448 с.

2. TSO-C151a Terrain Awareness and Warning System [Электронный ресурс] www.rgl.faa.gov

3. СРПБЗ. Руководство по технической эксплуатации, ВНИИРА «Навигатор» [Текст]

4. Патент №US 5839080 от 1998.11.17 Terrain awareness systems [Электронный ресурс] www.freepatentsonline.com

5. **Филатов, Г.А.** Безопасность полетов в возмущенной атмосфере [Текст]/Г.А. Филатов, Г.С. Пуминова, П.В. Сильвестров.–М.:Транспорт, 1992.–272 с.

6. Патент №RU 2297047 от 2005.08.03. Способ обнаружения и предупреждения угрозы столкновения воздушного судна с препятствиями подстилающей поверхности [Электронный ресурс] www.fips.ru

УДК 621.316.72

М.Б. Гузаиров, А.П. Костюкова

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ РИСКАМИ СЛОЖНОСВЯЗНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Вопрос управления рисками сложнонагруженных плавильных объектов (СПО), в частности, индукционных тигельных печей, достаточно подробно освещен в отечественных и иностранных публикациях [1–3]. Предпочтения российских предприятий и подобных предприятий в странах СНГ, занимающихся плавкой металлов, сводятся к диагностике СПО и в меньшей мере – к его автоматизации. Общие требования по безопасности промышленных объектов установлены Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», где немалая роль уделяется технической диагностике. Уровень безопасности плавильного модуля связан с его техническим состоянием, а также с режимами и условиями эксплуатации. Данные о выявленных дефектах технического состояния собираются, анализируются и служат основой для принятия решения о корректирующих воздействиях. Так обеспечивается обратная связь, замыкающая контур при управлении рисками на предприятии, занимающемся плавкой металлов (рис. 1).

В плавильной печи, равно как и в другом сложнонагруженном объекте, характер протекания процессов во времени является непрерывным, а период использования – регулярно-постоянным или регулярно-периодическим. Такой объект должен диагностироваться в рабочем режиме, причем непрерывно. Поэтому наиболее целесообразно рассмотрение печи в процессе изменения ее состояния во времени с применением статистических и вероятностных оценок. Такой процесс описывается кортежем $Z = (T, S, F)$, где S – про-

Рис. 1. Система управления рисками

странство состояний; T – множество моментов времени изменения состояния; F – траектория процесса ($F{:}T\to S$).

Динамическая модель процесса функционирования СПО может быть представлена в виде ориентированного графа состояний (рис. 2). В процессе функционирования плавильного модуля выделяются четыре состояния: 1 – первоначальное и последующие работоспособные состояния модуля, в которых вероятность безотказной работы составляет величину $P(mT)$, где m – номер плавки, T – продолжительность одной плавки; 2 – простой, когда плавка в печи не ведется, а поддерживается постоянная температура 300–400 °С; 3 – состояние, в которое переходит модуль при обнаружении отказа диагностической системой с вероятностью D (контролируемый отказ); 4 – тупиковое состояние (неконтролируемый системой диагностирования отказ с вероятностью наступления $1–D$).

Данный граф представлен в виде системы взаимосвязанных дифференциальных уравнений (модель Маркова) [1], описывающих процесс функционирования модуля в терминах вероятностей $P_i(t)$ пребывания системы в предопределенных состояниях S_i, указанных выше, и при заданных начальных условиях $P_i(0)$, соответствующих состоянию системы в начальный момент времени.

Соответствующая этой модели система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \dfrac{dP_4(t)}{dt} = (1-D)\cdot\lambda P_1(t), \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = D\cdot\lambda P_1(t) - \mu P_3(t), \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_0 P_1(t) - \lambda_0 P_2(t), \end{cases}$$

где $P_i(t)$ – вероятность нахождения элемента в состоянии i ($i=\overline{1,4}$); λ – интенсивность (частота) отказов модуля; μ – частота восстановления футеровки модуля. К данной системе также должно быть добавлено условие нормирования:

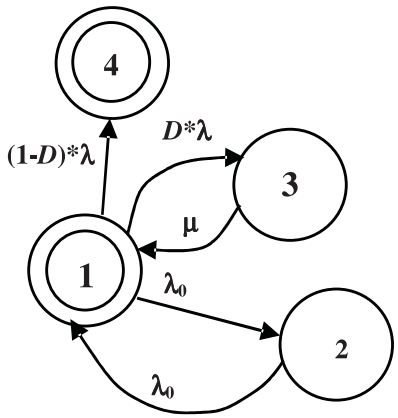


Рис. 2. Граф состояний, отражающий процесс функционирования плавильного модуля

$$\sum_{i=1}^{4} P_i(t) = 1$$

и начальные условия $P_1(0) = 1$ и $P_i(0) = 0 (i = \overline{2,4})$, соответствующие пребыванию системы в рабочем состоянии в начальный момент времени. При определении параметров поставленной задачи (λ – интенсивности отказа, μ – интенсивности восстановления после отказа, D – вероятности своевременного предупреждения об отказе и λ_0 – частоты простоя и плавки) СПО рассмотрен как совокупность взаимосвязанных элементов. Отказ одной из подсистем вызывает выход из строя другой.

Основная проблема при эксплуатации СПО – износ футеровки вследствие высокой температуры расплава и реологических процессов, происходящих при плавке, с чем связано подавляющее большинство отказов. Кроме того, поскольку срок службы большинства подсистем СПО значительно превышает срок службы футеровки, то оценка вероятности отказа СПО выполняется с учетом интенсивности отказов только футеровки. Зная, что одна футеровка служит 80–100 плавок, а ремонт длится около 14 ч, имеем $\lambda = \frac{1}{80} \div \frac{1}{100} = 0{,}0125 \div 0{,}01$ ч$^{-1}$, а $\mu = \frac{1}{14} = 0{,}0714$ ч$^{-1}$.

В условиях поставленной задачи процесс функционирования СПО рассмотрен в виде системы управления [6], и анализ произведен при помощи автоматизированных средств анализа (рис. 3).

Для приведенной выше системы были рассмотрены такие случаи, как отсутствие системы диагностирования (D = 0), работа системы диагностирования на штатном уровне (D = 0,5), система диагностирования (D = 0,8), выполняемая с помощью волоконно-оптических систем . Полученные вероятности безаварийной работы и выхода печи из строя представлены на рис. 4 а, б, в для каждого случая соответственно.

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии системы диагностирования вероятность возникновения аварии становится высокой уже на 20–30 плавке. Применение штатных средств диагностирования, предупреждающих не более 50 % отказов, не ведет к увеличению вероятности безотказной работы в краткосрочной перспективе. Такие системы диагностирования основаны на измерении усредненной температуры футеровочного слоя или измерении его усредненных температурозависимых электромагнитных характеристик, что не способствует

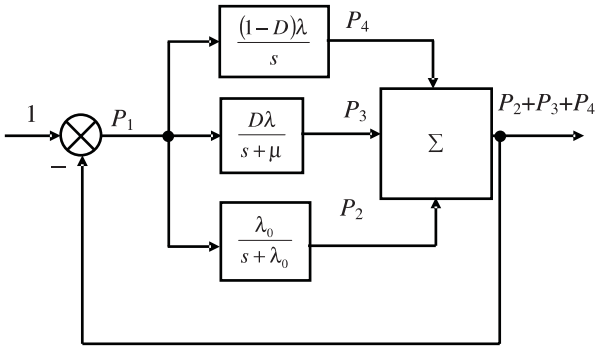


Рис. 3. Эквивалентная структурная схема процесса функционирования печи

высокой точности диагностирования. Срабатывание подобных систем диагностирования на отказ возможно как при критическом износе, так и при равномерном некритичном прогорании футеровки, который не ведет к аварии.

Недостатки указанных систем требуют модернизации комплексов с использованием средств, позволяющих измерять абсолютную температуру печи. Наиболее оптимальными в этом отношении являются оптические средства измерения [3], т. к. измеряемые в данном случае зависимости носят характер степенной функции четвертого порядка от температуры (в отличие от применяемых методов, когда измеряемая зависимость имеет второй порядок), т. е. обладают большей чувствительностью [4]. При модернизации систем диагностирования необходимо предусмотреть возможность локализации и идентификации места прогара, автоматического архивирования информации о ходе плавки, учета различных характеристик СПО и процесса плавки. Таким образом, к аппаратным средствам измерения температуры добавлено программное обеспечение [4–6], выполняющее такие функции, как

локализация места прогара или риска;

прогнозирование состояния футеровки, предупреждение о необходимости ремонта или возможности возникновения аварии;

контроль, динамическое отображение на экране дисплея и регистрация в течение плавки основных параметров процесса (мощности, подводимой к печи, напряжения и частоты на выходе преобразователя, температуры и давления в различных точках охлаждающей системы, температуры на поверхности СПО, времени начала и длительности плавки);

состояние (включенное или выключенное) механизмов и устройств СПО;

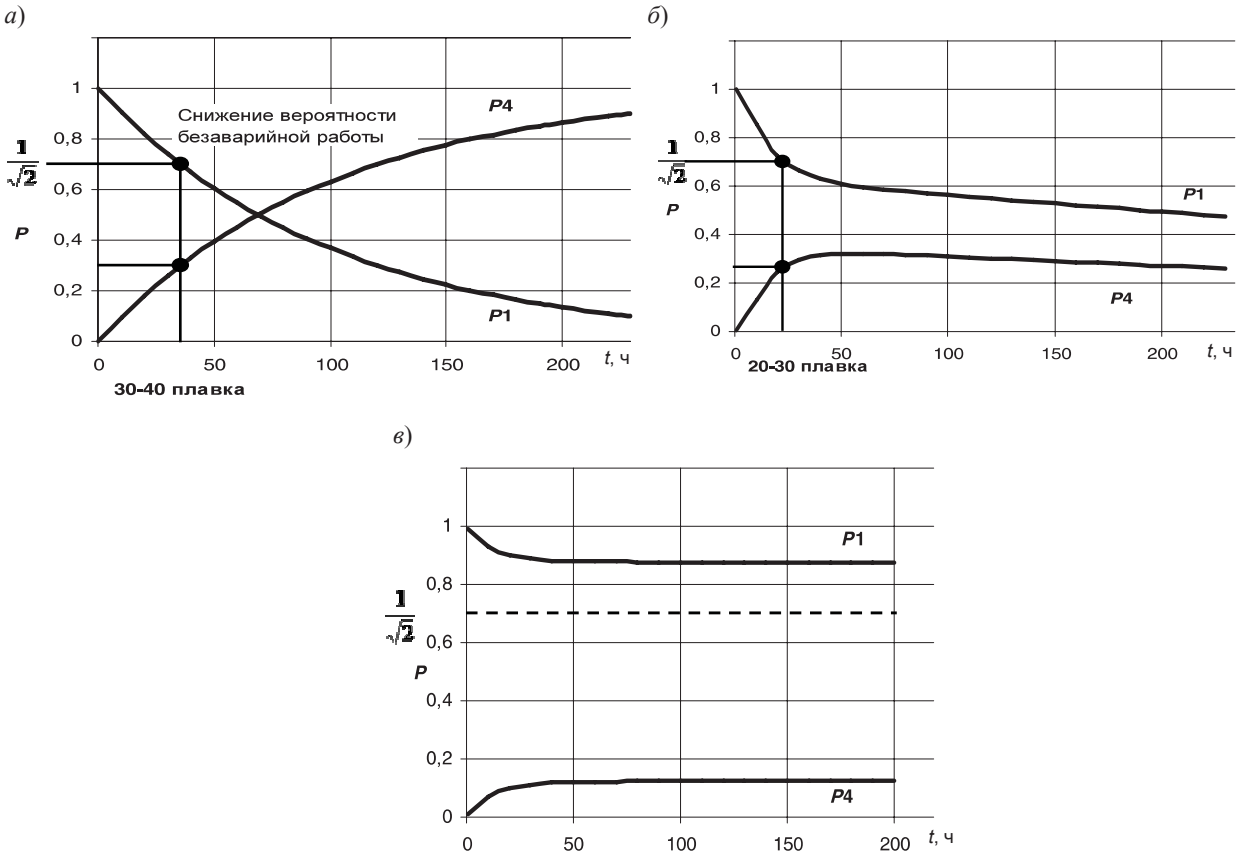


Рис. 4. Вероятности безаварийной работы (P_1) и выхода из строя (P_4) при: *а* – отсутствии системы диагностирования; *б* – системе диагностирования, основанной на измерении усредненной температуры; *в* – предлагаемой системе диагностирования

документирование хода процесса плавки в виде журнала событий.

Отличительные признаки предлагаемой системы диагностирования в сравнении с существующими:

• использование теплового изображения как основного диагностического параметра увеличивает точность определения состояния футеровки печи и позволяет осуществлять локализацию области риска в отличие от аналогов, использующих измерение усредненной температуры;

• размещение датчиков на поверхности печи повышает мобильность системы диагностирования, позволяет устанавливать ее на любую печь во время проведения планового ремонта и улучшает ремонтопригодность самой системы диагностирования и увеличивает срок ее службы в отличие от аналогов, где датчики впекаются в футеровку печи или прикрепляются к индуктору либо измеряют температуру воды в системе водоохлаждения и повреждаются в случае аварии;

• применение волоконно-оптических датчиков для регистрации теплового изображения позволяет увеличить помехоустойчивость системы и обеспечивает компактность устройства слежения в отличие от термоэлектрических датчиков температуры и оптических аналогов;

• автоматическое принятие решения о необходимости ремонта, возможности возникновения аварии в отличие от аналогов, в которых это решение возложено на оператора;

• прогнозирование состояния футеровки индукционной тигельной печи;

• документирование хода плавки.

Планируемый экономический эффект от внедрения системы диагностирования включает снижение энергопотребления, увеличение срока службы печи, снижение вероятности возникновения аварии и снижение затрат на восстановление после аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федоров, Ю.Н.** Основы построения АСУТП взрывоопасных производств.–М.: СИНТЕГ, 2006.–Т. 2.–632 с.

2. **Чепайкин, А.А.** Система контроля и регистрации параметров индукционной плавильной установки [Текст]/А.А. Чепайкин, Н.Р. Закиров, А.В. Никтин, [и др.]//Изв. Академии инженерных наук имени А.М. Прохорова; Под. ред. Ю.В. Гуляева.–М.–Н. Новгород: НГТУ, 2005.–Т. 15.–С. 102–105.

3. **Калявин, В.П.** Надежность и диагностика электроустановок: Учеб. пособие [Текст]/В.П. Калявин, Л.М. Рыбаков.–Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2000.–348 с.

4. **Костюкова, А.П.** Компьютерная термографическая система для неразрушающего мониторинга индукционных тигельных печей [Текст]/А.П. Костюкова//Информационные технологии в науке и образовании: Междунар. науч.-практ. Интернет-конф.: Сб. науч. тр.–Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУС», 2009.–С. 108–111.

5. **Гузаиров, М.Б.** Построение информационных моделей измерений в задачах идентификации и диагностики электрических плавильных элементов [Текст]/М.Б. Гузаиров, А.П. Костюкова//Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: IV Всерос. науч. конф.: Сб. науч. тр.–Астрахань: 2009.–С. 589–590.

6. **Гузаиров, М.Б.** Мониторинг и диагностика как элементы систем управления техногенными рисками при эксплуатации многосвязных плавильных элементов [Текст]/М.Б. Гузаиров, А.П. Костюкова//Информационные технологии в науке, образовании и производстве ИТНОП-2010: Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф.–Орел: ОрелГТУ, 2010.–Т. 3.–С. 152–159.

УДК 681.3 (075.8)

Н.В. Ростов

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Синтез систем автоматического управления (САУ) с линейными регуляторами обычно проводят по линеаризованным моделям частотными или алгебраическими методами. Но после синтеза параметры регуляторов часто приходится корректировать с использованием нелинейных моделей САУ, учитывающих ограничения, присущие реальным системам. САУ с нелинейными регуляторами (релейными, квазиоптимальными по быстродействию и др.), как правило, требуют оптимальной настройки параметров итерационными численными методами.

Задачи оптимизации нелинейных САУ могут формулироваться как задачи однокритериальной (скалярной) либо многокритериальной (векторной) оптимизации (рис. 1).

Наиболее просто настройка параметров регуляторов осуществляется методами скалярной оптимизации, но более корректным является применение многокритериального подхода, базирующегося на

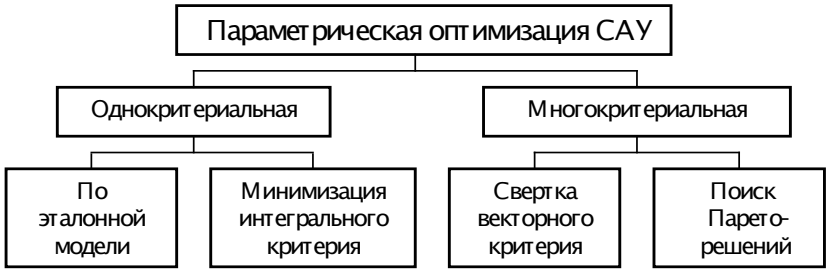


Рис. 1. Варианты задач оптимизации

поиске Парето-оптимальных настроек регуляторов, которым соответствуют предельно достижимые динамические возможности САУ [2, 4, 8].

Поиск Парето-решений обычно проводят методами свертки векторного критерия, либо по результатам прямого зондирования на сетке в многомерном пространстве параметров регулятора, что связано со значительными затратами машинного времени из-за большого числа циклов моделирования динамики САУ.

Целью предлагаемой ниже методики последовательной (поэтапной) МК-оптимизации является сокращение затрат машинного времени за счет локализации Парето-области путем проведения на начальных этапах скалярной оптимизации и зондирования на заключительном этапе векторной оптимизации в ограниченной, достаточно малой области многомерного пространства параметров.

Скалярная оптимизация САУ

При оптимизации с использованием эталонной модели (ЭМ) желаемая динамика цифровой нелинейной САУ может задаваться разностным уравнением, непосредственно переходной характеристикой или табличным способом. В качестве критерия обычно используют сумму квадратов ошибки $e_{\text{М}}[n]$, $n = 0, \overline{N-1}$ между выходами ЭМ и системы:

$$J_1(X) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} e_{\text{М}}^2[n] \to \min_{X \in D^m}, \qquad (1)$$

где X – m-вектор оптимизируемых параметров регулятора; D^m – область допустимых значений параметров, обеспечивающих устойчивость САУ.

Задачу оптимизации по ЭМ можно так же формулировать, как нелинейную задачу наименьших квадратов с целевой функцией

$$J_2(X) = \|F(X)\|^2 = \sum_{i=0}^{N-1} F_i^2(X) \to \min_{X \in D^m}, \qquad (2)$$

использующей значения ошибки в N-векторе невязок

$$F(X) = \left(e_{\text{М}}[0], e_{\text{М}}[1], ..., e_{\text{М}}[N-1]\right)^{\text{T}}.$$

Постановки (1) и (2) характерны для задач идентификации, поэтому такой подход к оптимизации можно называть идентификационным. Строго говоря, он не вполне корректен из-за субъективности и неопределенности выбора ЭМ, априорно задающей требования к проектируемой САУ без знания ее потенциальных динамических возможностей.

Интегральные критерии, в отличие от ЭМ, косвенно оценивают динамические свойства САУ. На практике могут выбираться критерии следующих видов:

$$J_3(X) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left(e^2[n] + c(\nabla e[n]/T_0)^2 + ru^2[n]\right) \to \min_{X \in D^m}; \qquad (3)$$

$$J_4(X) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\left(X^{\text{T}}[n]QX[n] + ru^2[n]\right) \to \min_{X \in D^m}, \qquad (4)$$

где $e[n] = g[n] - y[n]$ – ошибка между ступенчатым входным воздействием и выходом системы; $\nabla e[n] = e[n] - e[n-1]$ – конечная разность ошибки; $X[n]$ – вектор состояния объекта управления (в общем случае нелинейного); $u[n]$ – управляющее воздействие; $\{c, r\}$ – скалярные весовые коэффициенты; Q – симметрическая положительно полуопределенная весовая матрица.

Интегральные критерии применимы для оптимизации САУ с любыми типами регуляторов. В частности, при оптимизации по критерию (4) модального регулятора в качестве вектора $X[n]$ можно использовать не вектор состояния нелинейного ОУ, а вектор состояния линейного наблюдателя. Преимуществом интегральных критериев является возможность их оценивания (вычисления) при любом характере переходного процесса, в отличие от прямых показателей качества. Однако интегральная оптимизация сопряжена с субъективностью выбора вида критерия и его весовых коэффициентов. При неудачном их задании получаемые настройки параметров регуляторов могут оказываться далеко не оптимальными с технической точки зрения. Например, минимумам критериев (3) и (4) могут соответствовать экстремали (переходные характеристики $e_{\text{ext}}[n]$) с большим перерегулированием. Для его уменьшения следует корректировать значения весовых коэффициентов $\{c, r\}$ или элементов матрицы Q.

Задачи скалярной оптимизации наиболее просто решаются методами безусловной минимизации, если на значения оптимизируемых параметров регулятора не накладываются ограничения. Методы условной минимизации применяют в тех случаях, когда задаются функциональные ограничения, определяющие область допустимых значений параметров [1]. Однако непосредственный учет ограничений в критерии (например, в функции Лагранжа со штрафными составляющими) приводит к проявлению овражных свойств модифицированного критерия [7].

Векторная оптимизация САУ

В многокритериальных задачах предполагается минимизация L-вектора частных критериев $F(X) = [f_1(X), ..., f_L(X)]^T$ в области значений параметров регуляторов, заданной критериальными ограничениями:

$$f_j(X) \to \min_{X \in D^m};\ D^m : \{f_j(X) \le f_j^o\},\ j = \overline{1, L}. \quad (5)$$

Векторный критерий может быть совокупностью интегральных критериев, например,

$$F_1(X) = (\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N} e^2[n], \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N} (\nabla e[n]/T_0)^2, \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N} u^2[n]), \quad (6)$$

где первый частный критерий оценивает переходный процесс в целом, второй характеризует степень его колебательности, а третий определяет энергозатраты на управление.

Часто в качестве частных критериев рациональнее использовать прямые показатели качества САУ (время первого согласования t_1, время переходного процесса $t_П$ и перерегулирование σ):

$$F_2(X) = [t_1(X), t_П(X), \sigma(X)]^T. \quad (7)$$

Частными критериями могут быть также прямые оценки энергетических показателей САУ в динамических режимах и точностные показатели в установившихся режимах, например, добротности при входных воздействиях линейного или гармонического вида.

При решении задач МК-оптимизации путем свертки векторных критериев используют методы с выбором главного, аддитивного или минимаксного критериев, а также метод достижения целей [2, 4, 7]. Теоретической основой свертки являются теоремы о принадлежности минимумов аддитивного и минимаксного критериев соответственно эффективным (оптимальным по Парето) и слабо эффективным (оптимальным по Слейтеру) решениям, доказательства которых приведены в [7]. При любом методе свертки исходная задача МК-оптимизации сводится к задаче скалярной минимизации, при решении которой параметры регулятора оптимизируются в области значений, неявно задаваемой ограничениями на значения частных критериев. Получаемое решение будет зависеть не только от динамических свойств САУ, но и от субъективно задаваемых проектировщиком значений нормирующих и весовых коэффициентов метода свертки.

При использовании зондирования область допустимых значений параметров задается прямыми ограничениями, а Парето-оптимальные настройки параметров регулятора выбираются из области, определяемой путем отображения области значений параметров регулятора D^m на пространство частных критериев. Для этого необходимо прямое или косвенное зондирование пространства параметров регулятора и оценивание частных критериев по результатам многократного моделирования динамики САУ. Из-за противоречивости частных критериев из Парето-области (множества) в качестве окончательного требуется выбирать компромиссный вариант решения, в наибольшей степени удовлетворяющий требованиям технического задания и предпочтениям проектировщика.

При решении задач векторной оптимизации находят также применение стохастические методы глобальной минимизации, такие, как метод имитации отжига и генетический алгоритм в разных модификациях [9].

Последовательная МК-оптимизация САУ

Существенного снижения затрат машинного времени можно добиться, осуществляя последовательную (поэтапную) оптимизацию САУ, целенаправленную на определение Парето-оптимальных настроек регуляторов *по прямым показателям качества*. На рис. 2 представлена схема такой оптимизации, предполагающей локализацию области Парето-решений в пространстве параметров регулятора на первых двух этапах и проведение на третьем этапе зондирования в малой области значений варьируемых параметров.

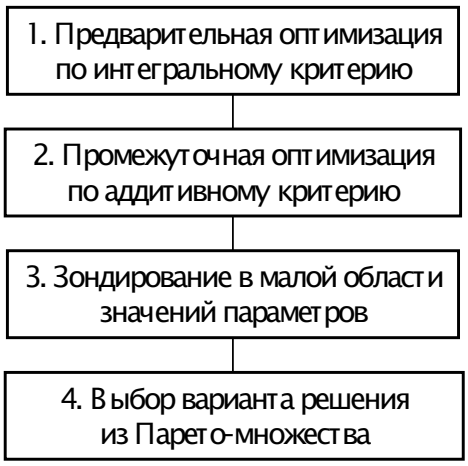


Рис. 2. Этапы МК-оптимизации САУ

На первом этапе проводится *предварительная* скалярная оптимизация по квадратичному интегральному критерию вида (3) с заданными весовыми коэффициентами $\{c, r\}$ и одновременной оценкой значений частных критериев. Эти оценки необходимы для задания обоснованных нормирующих коэффициентов для частных критериев на следующем этапе оптимизации. Начальная точка X^0 в пространстве параметров регулятора может задаваться произвольно (при этом САУ может оказаться неустойчивой), являться решением задачи синтеза или результатом оптимизации по эталонной модели.

На втором, *промежуточном* этапе оптимизации путем минимизации аддитивного критерия, составленного из частных критериев векторного критерия (7) или (6) с заданными весовыми коэффициентами, определяется одна из точек Парето-оптимальных решений.

На третьем этапе в небольшой окрестности относительно решений, полученных на первом и втором этапах, проводится зондирование пространства параметров регулятора, по результатам которого определяется множество точек Парето-решений. При этом затраты машинного времени на зондирование будут приемлемыми.

На четвертом, *заключительном* этапе оптимизации из построенного Парето-множества в качестве окончательного решения выбирается компромиссный вариант, удовлетворяющий требованиям технического задания по прямым показателям качества и учитывающий субъективные предпочтения проектировщика.

Методы зондирования

Для построения Парето-областей значений параметров регуляторов различных типов можно использовать разные способы зондирования показателей качества динамики САУ.

1. Прямое зондирование на сетке значений параметров регулятора в m-мерной области, заданной их ограничениями:

$$D^m = \{x_{i\min} \le x_i \le x_{i\max}, i = \overline{1,m}\}.$$

Но при большом числе оптимизируемых параметров, когда $m >> 1$, такое зондирование сопряжено с большими затратами машинного времени. Например, если шаг сетки каждого из m параметров регулятора высокого порядка составляет 1 % его диапазона изменения, то общее количество узлов сетки будет равно 10^{2m}. Для трех параметров потребуется 1 млн циклов моделирования.

2. Косвенное зондирование на двухмерной сетке весовых коэффициентов интегрального квадратичного критерия вида (3):

$$\{c_{\min} \le c \le c_{\max}, r_{\min} \le r \le r_{\max}\}.$$

Этот метод рекомендуется применять при большом числе и параметров, и частных критериев ($m > 3$, $L > 3$). Однако он не гарантирует того, что все минимумы критерия (3) на сетке его весов будут принадлежать искомой Парето-области решений.

3. Генерирование точек Парето-области методами свертки векторного критерия, например, путем минимизации аддитивного критерия на L-мерной сетке его весовых коэффициентов:

$$\{c_{j\min} \le c_j \le c_{j\max},\ j = \overline{1,L}\};\ \sum_j^L c_j = 1.$$

Этот метод приемлем при большом числе оптимизируемых параметров ($m > 3$), но небольшом числе частных критериев. Важно отметить, что положение точек минимумов аддитивного критерия (или других критериев свертки) в Парето-области будет зависеть не только от его весовых коэффициентов, но и от задаваемых проектировщиком значений нормирующих параметров и ограничений для частных критериев.

Для зондирования любым из способов можно применять кубическую, случайную, равномерную или комбинированную многомерные сетки. Недостаток кубической сетки – затенение пробными точками друг друга (совпадение их проекций), что уменьшает общее число вариаций значений параметров. При использовании случайной сетки в получаемых отображениях могут появляться большие зоны, в которые не попали пробные точки. Равномерная сетка лишена недостатков кубической и случайной сеток, но имеет сложный алгоритм расчета узлов [6].

Диалоговый поиск Парето-решений

На заключительных этапах МК-оптимизации проводить зондирование, выделять из результатов зондирования точки, принадлежащие Парето-области, и из них выбирать компромиссный вариант решения наиболее удобно диалоговым методом [5], интерпретация которого дана на рис. 3.

Предполагается выполнение следующих процедур:

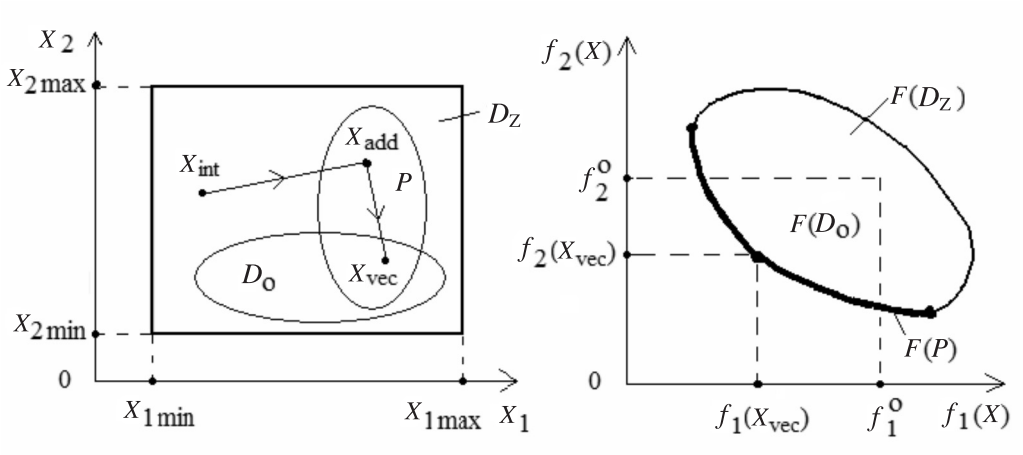


Рис. 3. Интерпретация поиска Парето-решений

• задание области зондирования D_Z в окрестности полученного на втором этапе минимума интегрального критерия X_{int}, а также выбор способа зондирования, типа сетки и количества пробных точек;

• моделирование динамики САУ в пробных точках и вычисление соответствующих им значений частных критериев $f_j(X)$;

• построение области (множества точек) $F(D_Z)$, являющейся отображением точек области D_Z на пространство частных критериев, и выделение точек Парето-области P;

• задание критериальных ограничений $\{f_j^o, j = \overline{1,L}\}$ и определение соответствующих им областей $F(D_o)$ и D_o; проверка непустоты подобласти $P \cap P_o$;

• выбор Парето-решения, удовлетворяющего заданным критериальным ограничениям, т. е. $X_{vec} \subseteq P \cap P_o$.

При отсутствии таких решений осуществляется возврат к предшествующим процедурам для ослабления критериальных ограничений, увеличения количества пробных точек, изменения типа сетки и расширения области зондирования.

Следует обратить внимание на то, что области D_Z, D_o и P должны быть большими, чем область допусков на значения параметров регулятора, определяемых погрешностями технической реализации. Погрешности реализации должны учитываться и при выборе Парето-решения X_{vec}. В противном случае оптимизация теряет практический смысл.

Описанный метод поиска Парето-решений можно рассматривать как неформальную свертку векторного критерия, осуществляемую в процессе диалога проектировщика с ЭВМ. При этом одной из проблем, затрудняющих поиск, является графическая визуализация получаемых многомерных отображений по результатам зондирования. На практике искомое решение приходится определять по 2D- или 3D-проекциям областей параметров регуляторов и частных критериев.

Пример МК-оптимизации

Проведем оптимизацию цифрового ПИД-регулятора системы стабилизации скорости электромеханического объекта, включающего в себя силовой преобразователь, двигатель постоянного тока, датчик скорости, а также АЦП и ЦАП. В модели системы будем учитывать падение напряжения на щетках двигателя, моменты вязкого и сухого трений, момент внешней нагрузки на валу двигателя и ограничение выхода регулятора $|u[n]| \le 1023$ дискреты. Период дискретности регулятора $T_0 = 0{,}002$ с, а входное воздействие $g[n] = 150$ дискрет. Поставим целью определение Парето-оптимальной по критерию (7) настройки параметров регулятора, обеспечивающих наименьшее время переходного процесса при отсутствии перерегулирования.

Зададим начальные значения параметров регулятора

$$X^0 = (K_{p0} = 8{,}0;\ K_{i0} = 120{,}0;\ K_{d0} = 0{,}0),$$

при которых переходный процесс в САУ сильно колебательный.

В процессе минимизации интегрального критерия (3) с нулевыми весовыми коэффициентами $\{c, r\}$ найдена точка

$$X_{int} = (K_{p\,int} = 11{,}1782;\ K_{i\,int} = 250{,}8967;\ K_{d\,int} = 0{,}0529),$$

для которой выходная координата системы имеет $t_1 = 0{,}016$ с, $t_п = 0{,}026$ с и $\sigma = 6{,}8$ %. Трубка точности задавалась равной $\Delta = 0{,}05$.

Для аддитивного критерия $f_{add}(X) = c_1 t_1/\delta_1 + c_2 t_п/\delta_2 + c_3\sigma/\delta_3$ примем базовые значения и весовые коэффициенты следующими:

$$\delta_1 = 0{,}1T_{end};\ \delta_2 = 0{,}5T_{end};\ \delta_3 = 100;$$

$$c_1 = 0{,}2;\ c_2 = 0{,}7;\ c_3 = 0{,}1.$$

В результате минимизации аддитивного критерия найдена точка

$$X_{add} = (K_{p\,add} = 11{,}3265;\ K_{i\,add} = 229{,}4463;\ K_{d\,add} = 0{,}0584),$$

для которой $t_1 = 0{,}016$ с, $t_п = 0{,}024$ с и $\sigma = 2{,}4$ %.

Проведем прямое зондирование в окрестности точки X_{add} на смешанной сетке (с 27 узлами кубической сетки и 27 узлами случайной сетки). Для выделения точек, принадлежащих Парето-множеству, зададим критериальные ограничения $\{t_п \le 0{,}03$ с; $\sigma \le 1{,}0$ %$\}$, которым удовлетворяет точка

$$X_{vec} = (K_{p\,vec} = 9{,}1740;\ K_{i\,vec} = 208{,}0089;\ K_{d\,vec} = 0{,}0586),$$

для которой $t_1 = 0{,}044$ с, $t_п = 0{,}026$ с, $\sigma = 0{,}74$ %.

Результаты оптимизации представлены на рис. 4 и 5, где точки X_{int} и X_{add} обозначены круглым и треугольным символами, а X_{vec} – звездочкой.

Изложенная методика последовательной МК-оптимизации нелинейных САУ носит общий характер и позволяет находить Парето-оптимальные настройки регуляторов с различными структурами при относительно малых затратах машинного времени.

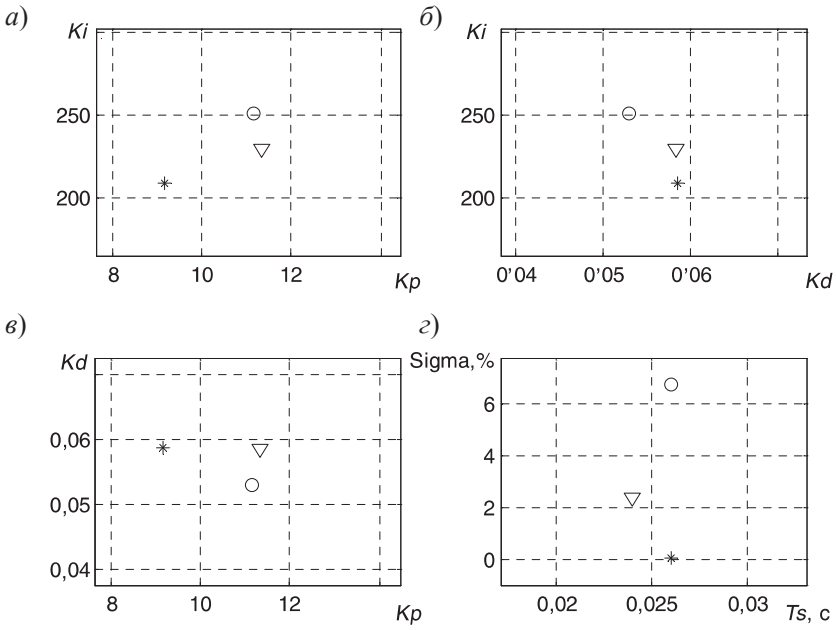


Рис. 4. Выбор Парето-решения

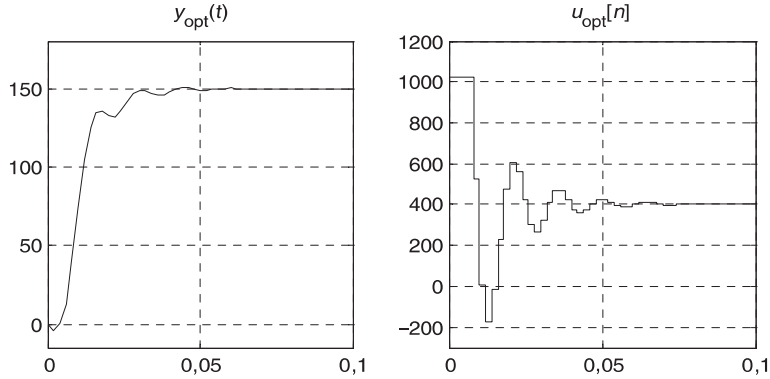


Рис. 5. Результаты оптимизации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козлов, В.Н.** Системный анализ, оптимизация и принятие решений: Учеб. пособие [Текст]/В.Н. Козлов. –М.: Проспект, 2010.–176 с.

2. **Козлов, В.Н.** Теория автоматического управления. Компьютерные технологии: Учеб. пособие [Текст]/ В.Н. Козлов.–СПб.:Изд-во Политехн. ун-та,2008.–332 с.

3. **Подиновский В.В.** Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст]/В.В. Подиновский, В.Д. Ногин.–М.: Физматлит, 2007. –256 с.

4. **Ростов, Н.В.** Компьютерные технологии в науке. Синтез и оптимизация: Учеб. пособие [Текст]/ Н.В. Ростов.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. –144 с.

5. **Ростов, Н.В.** Многокритериальная параметрическая оптимизация систем автоматического управления на ЭВМ [Текст]/Н.В. Ростов//Исследование систем управления с помощью ЭВМ. –СПб.: СПбГТУ, 1994. –С.103–112.

6. **Соболь, И.М.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст]/И.М. Соболь, Р.Б. Статников.–М.: Наука, 1981. –110 с.

7. **Черноруцкий, И.Г.** Методы оптимизации в теории управления: Учеб. пособие [Текст]/ И.Г. Черноруцкий.–СПб.: Питер, 2004. –256 с.

8. **Censor, Y.** Pareto Optimality in Multiobjective Problems [Текст]/ Y. Censor//Appl. Math. Optimiz.–1977. Vol. 4.–P. 41–59.

9. **Deb, Kalyanmoy** Multiobjective Optimization using Evolutionary Algorithms [Текст]/Kalyanmoy Deb. –John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England, 2001.

УДК 519.876

А.А. Салангин

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ СОЗДАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Задачи распределения ресурсов возникают при проектировании и испытаниях технических объектов, при формировании тематического плана предприятия, при обосновании программы технического перевооружения отрасли, концепции социально-экономического развития региона и т. д. В этих случаях определяющими являются способ оценки близости набора показателей к требуемым и характер зависимости значений этих показателей от предполагаемых затрат. В таблице приведены примеры частных и интегральных показателей при постановке задач распределения ресурсов.

В публикациях [1–5] сформулированы основные задачи параметрического синтеза, возникающие при формировании программы реализации технических проектов, и дано их приближенное аналитическое решение на основе вариационного подхода, которое, однако, не может быть использовано из-за больших погрешностей в исходных данных, неэффективности или нереализуемости этого решения. Актуальными остаются вопросы выбора субоптимальных(директивных) распределений при ограниченном и неограниченном времени их реализации в условиях нереализуемости или неэффективности стационарного решения.

В статье развиваются и обобщаются результаты, изложенные в [5–6]. В частности, формулируется задача разработки технического проекта развития предприятия:

• *на первом уровне* (внутри направления проекта или в структурном подразделении предприятия) как задача достижения таких функциональных характеристик x_i, y_i структурного подразделения (например, относительная производительность труда и относительная численность персонала), при которых обеспечивается минимизация суммарного отклонения мощности подразделения $x_i\ y_i$ от предельно достижимой $F_i = 1 - x_i\, y_i$ при ограничении затрат по увеличению мощности:

$$G_i = \alpha_i \ln\frac{1}{1-x_i} + \beta_i \ln\frac{1}{1-y_i} \le G_i^0.$$

Не умаляя общности, можно принять $\alpha_i + \beta_i \le 1$, где α_i – коэффициент нормированных затрат на единицу оборудования; β_i – коэффициент нормированных затрат на единицу персонала;

• *на втором уровне* (между направлениями проекта или между структурными подразделе-

Технический объект (ТО)	Предприятие или отрасль	Социально-экономический регион
Частные показатели		
Погрешность и интенсивность отказа отдельных устройств	Уровень автоматизации работ, производительность труда или трудоемкость	Уровень обеспечения услугами или удельное потребление ресурсов
Интегральные показатели		
Эффективность применения ТО (вероятность выполнения задачи, дисперсия суммарной ошибки)	Суммарная мощность или степень соответствия мощностей программ работ (сумма квадратов отклонений мощностей от требуемых)	Качество жизни (сумма относительных отклонений показателей от предельных)

ниями предприятия) как задача минимизации критерия F близости мощностей $x_i\ y_i$ к единице ($i = 1, ..., m$) при ограничении $G = \sum_i G_i \le G_0$.

Примерами таких критериев могут быть

$$F_1 = 1 - \prod_i x_i y_i, \quad F_2 = 1 - \frac{1}{m}\sum_i x_i y_i, \quad F_3 = \prod_i (1 - x_i y_i). \tag{1}$$

Отметим, что $F_1 \ge 1 - (xy)_{\min} \ge F_2 \ge 1 - (xy)_{\max} \ge F_3$.

Реализуемость и эффективность распределения ресурсов. Необходимые и достаточные условия оптимального распределения ресурсов на первом уровне (внутри каждого направления проекта) вытекают из уравнений Куна–Таккера и для произвольного i имеют вид $\lambda_i = \frac{y_i(1-x_i)}{\alpha_i} = \frac{x_i(1-y_i)}{\beta_i}$, где $\lambda_i = -\frac{f_i}{g_i}$ – параметрический множитель при $f_i = \frac{\partial F}{\partial x_i}$, $g_i = \frac{\partial G}{\partial x_i}$. Отсюда следует, что $y_i = \frac{\upsilon_i}{u_i + \upsilon_i}$, где $\upsilon_i = \frac{x_i}{\beta_i}$, $u_i = \frac{1-x_i}{\alpha_i}$. Выбранные на втором уровне критериальные функции (1) и функция ограничений $G = \sum_i G_i \le G_0$ имеют диагональные матрицы вторых производных $t_{ii} = \frac{\partial^2 F}{\partial x_i^2}$, $\omega_{ii} = \frac{\partial^2 G}{\partial x_i^2}$. Необходимые условия для этого уровня выражаются требованием равенства $\lambda_i = \lambda$ и определяют стационарное решение уравнений Куна–Таккера [2–4].

Проведенный анализ показал, что стационарное решение уравнений Куна–Таккера:

для F_1 реализуемо и эффективно, т. е. равенство $\lambda_i = \lambda$ достижимо и обеспечивает минимум F при заданных суммарных затратах;

для F_2 реализуемо только на начальной и заключительной стадиях проекта, причем на начальной стадии неэффективно (на заключительной стадии эффективно),

для F_3 реализуемо, но неэффективно.

Действительно, учитывая, что [2–4], $h_{ii} = \frac{t_{ii}}{-f_i} + \frac{\omega_{ii}}{g_i} = -\frac{1}{\lambda_i}\cdot\frac{d\lambda_i}{dx_i}$ имеем:

1. Для критериальной функции F_1

$$\lambda_i = \frac{1-x_i}{\alpha_i x_i} = \frac{1-y_i}{\beta_i y_i} \text{ и } h_{ii} = \frac{1}{x_i(1-x_i)} > 0,$$

т. е. при одинаковых затратах любое отклонение от стационарного решения приводит к увеличению F, следовательно, распределение эффективно и реализуется при $0 \le t \le 1$ формулами

$$x_i = \frac{t}{t + \alpha_i(1-t)}, \quad y_i = \frac{t}{t + \beta_i(1-t)}.$$

2. Для критериальной функции F_2

$$\lambda_i = \frac{y_i(1-x_i)}{\alpha_i} = \frac{x_i(1-y_i)}{\beta_i} \text{ и } h_{ii} = \frac{x+y-1}{x(1-x)},$$

т. к. $\lambda_i^* = \max\lambda_i = \frac{1}{(\sqrt{\alpha_i} + \sqrt{\beta_i})^2}$ при $x_i^* = \frac{\sqrt{\beta_i}}{\sqrt{\alpha_i} + \sqrt{\beta_i}}$ и не всегда можно реализовать необходимое условие равенства параметрических множителей [4] $\lambda_1 = \lambda_2 = ... = \lambda_i = \lambda$. На начальном этапе, когда $\lambda_i = \lambda \le \lambda_i^*$ и $\frac{d\lambda_i}{dx_i} > 0$, $h_{ii} < 0$, т. е. при одинаковых затратах любое отклонение от стационарного решения уменьшает критериальную функцию, следовательно, его реализация неэффективна. На заключительном этапе, когда $\lambda_i = \lambda < \lambda_i^*$ и $\frac{d\lambda_i}{dx_i} < 0$, $h_{ii} < 0$, т. е. при одинаковых затратах любое отклонение от стационарного решения увеличивает критериальную функцию, следовательно, его реализация эффективна.

3. Для критериальной функции F_3

$$\lambda_i = \frac{x_i}{\beta_i + \alpha_i x_i} = \frac{y_i}{\alpha_i + \beta_i y_i} \text{ и } h_{ii} = \frac{-\beta_i}{x_i(\beta_i + \alpha_i x_i)} < 0,$$

т. е. стационарное решение хотя и может быть реализовано при $0 \le t \le 1$ формулами $x_i = \frac{\beta_i t}{1-\alpha_i t}$, $y_i = \frac{\alpha_i t}{1-\beta_i t}$, но при одинаковых затратах любое отклонение от него уменьшает критериальную функцию, следовательно, такое решение наименее эффективно.

Директивный подход. Если в качестве критерия распределения ресурсов на втором уровне использовать F_2 или F_3, то стационарное решение не является эффективным и необходимо использовать директивное распределение. Выбрав структуру последнего в дробно-рациональном виде

$$x = \frac{a+bt}{c+dt} \quad (0 \le t \le 1),$$

где t – нормированное время реализации проекта, получим для произвольного i-го направления проекта с учетом условий $x(0) = 0$, $x(1) = 1$, $y = v/(u + v)$

$$x^{\text{dir}} = \frac{rt}{rt + \alpha(1-t)}, \quad y^{\text{dir}} = \frac{rt}{rt + \beta(1-t)},$$

где r – параметр. Для малых t имеем $\alpha x = \beta y \cong rt$.

Три способа распределения: квазиравных затрат G_i, мощностей $x_i y_i$ или параметрических множителей Лагранжа λ_i для всех направлений проекта можно объединить требованием $r_i = (\alpha_i \beta_i)^k$, где k = 0,1/2,1 соответственно.

Для сравнения директивных распределений с различными значениями r_i оценим локальную эффективность затрат для F_2

$$h = -\frac{dF_2}{dG} = \frac{\sum_i \lambda_i z_i}{\sum_i z_i},$$

где z_i $(\partial G/\partial x)_i (dx)_i$. Из выражений $x_i = r_i t/A_i$, $y_i = r_i t/B_i$, где $A_i = r_i t + \alpha_i(1-t)$, $B_i = r_i t + \beta_i(1-t)$ для произвольного i следует

$$h = t(1-t)\frac{\sum_i \left(r\frac{\alpha x + \beta y}{AB}\right)_i}{\sum_i (\alpha x + \beta y)_i}.$$ При малых t имеем

$$h \cong t\frac{\sum_i \frac{r_i^2}{\alpha_i \beta_i}}{\sum_i r_i}.$$

Для $r_i > \alpha_i \beta_i$ имеем $h > t$, а для $r_i = \alpha_i \beta_i$, когда $k = 1$, имеем $h = t$. При больших t (близких к единице) $h \cong (1-t)\frac{\sum_i \left(\frac{\alpha+\beta}{r}\right)_i}{\sum_i (\alpha+\beta)_i}$.

Для $r_i < 1$ имеем $h > 1 - t$, а для $r_i = 1$, когда $k = 0$, имеем $h_0 > 1 - t$ независимо от $\alpha_i \beta_i$. На на-

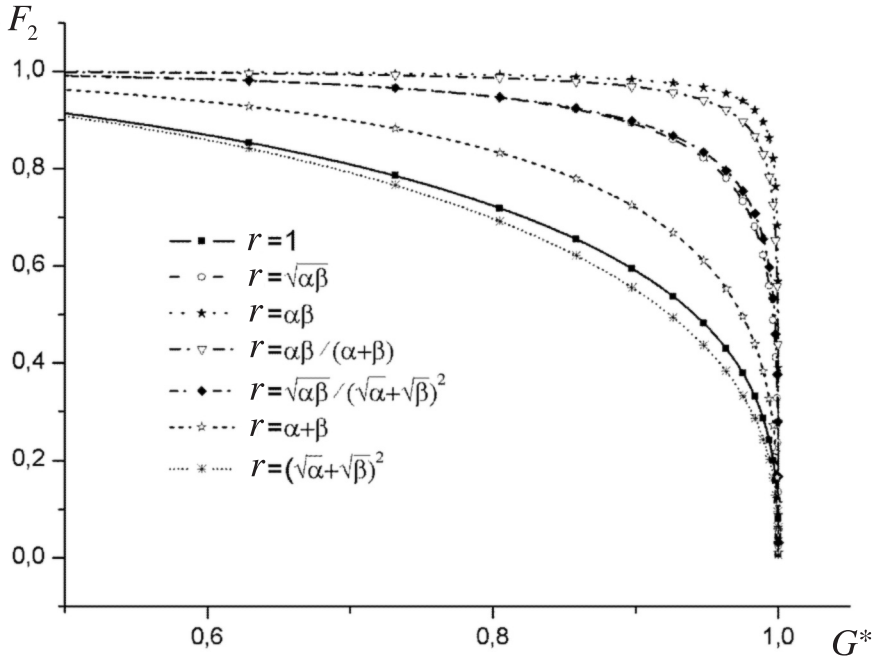


Рис.1. Нормированная средняя мощность F_2 для различных r в зависимости от нормированных (при $r = 1$) расходов $G^* = 1 - \exp(-G)$

чальном этапе реализации (t = 0,3) наиболее эффективно расходуются средства при квазиравном распределении (k = 0), а в конце этапа реализации (t > 0,8) – при квазимагистральном (k = 1).

Расчеты для различных r с использованием исходных данных α = (0,8; 0,2; 0,39; 0,16), β = (0,2; 0,8; 0,19; 0,16) (коэффициенты α_i и β_i взяты для разных структурных единиц (подразделений, отделов) холдинговой компании «Ленинец») показали (см. рис. 1), что при одинаковых затратах G наилучшее распределение соответствует выбору параметра r в виде $r = (\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2$ (близкое к нему r = 1), а наихудшее – в виде $r = \sqrt{\alpha\beta}/(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2$. Среди упомянутых выше трех способов распределения: квазиравных затрат (r = 1), равенства мощностей ($r = \sqrt{\alpha\beta}$), квазимагистрального ($r = \alpha\beta$), наименее эффективен квазимагистральный метод, а директивное распределение с r = 1, соответствующее равенству удельной эффективности затрат по каждому направлению, является наилучшим.

На рис. 2 представлена для различных директивных распределений производная мощности подразделения по затратам, т. е. изменение во времени эффективности затрат (параметрический множитель) $\lambda_i = \dfrac{dF_i}{dG_i}$. Из рисунка следует, что когда израсходовано достаточно мало средств (t < 0,8), эффективность затрат наибольшая при использовании способа квазиравных затрат (r = 1) и самая малая – при квазимагистральном методе. С ростом расходов (t > 0,8) эффективности затрат выравниваются.

Расширим класс допустимых функций директивного распределения для двух интервалов времени реализации проекта – с ограниченным и неограниченным интервалами времени реализации.

Ограниченное время реализации ($0 \le t \le 1$). Опираясь на работу [5], положим $x = r\dfrac{T_1}{V}$, тогда $y = \dfrac{rT_1}{rT_1 + \dfrac{\beta}{\alpha}(V - rT_1)}$.

Если $V = rT_1 + \alpha T_2$, то $x = \dfrac{rT_1}{rT_1 + \alpha T_2}$, $y = \dfrac{rT_1}{rT_1 + \beta T_2}$.

Из граничных условий $x(0) = 0$; $x(1) = 1$ следует $T_1 = tU_1$; $T_1 = (1 - t)WU_1$.

Тогда имеем

$$x = \frac{rt}{rt + \alpha(1-t)W}, \quad y = \frac{rt}{rt + \beta(1-t)W}. \qquad (2)$$

Установим требования на вид функции W для распределения $x(t)$ (для $y(t)$ – аналогично):

• требование необратимости эффекта: то есть $\dfrac{dx}{dt} \ge 0$, что приводит после дифференци-

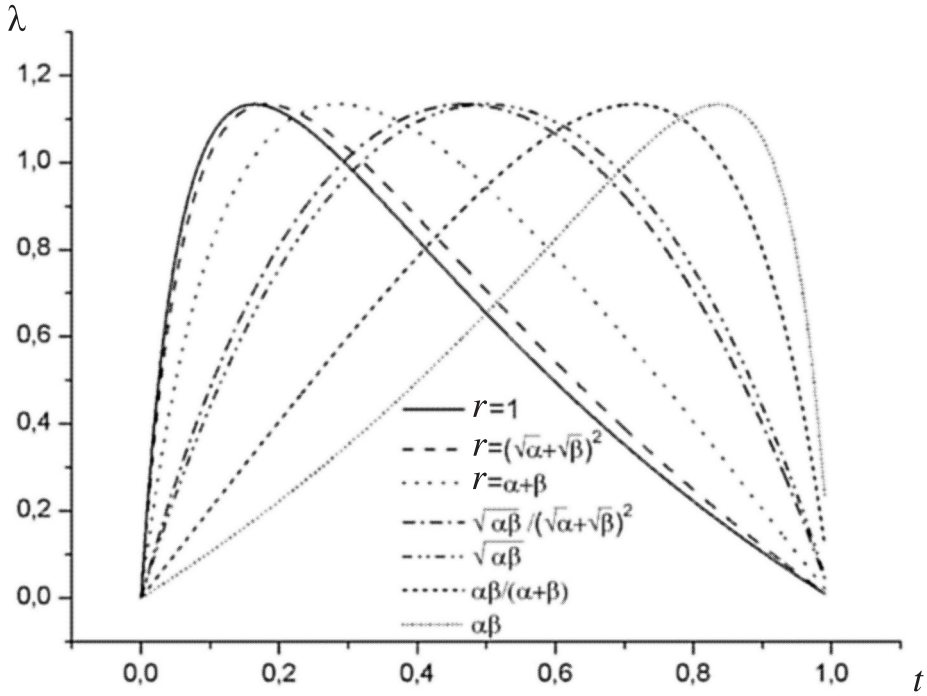


Рис. 2. Эффективность затрат для различных коэффициентов директивного распределения r при α = 0,39, β = 0,1

рования (2) к условию $W - t(1-t)\dfrac{dW}{dt} \geq 0$.

Отсюда следует

$$\begin{cases} W \geq \dfrac{t}{1-t}, & 0 \leq t \leq \dfrac{1}{2}; \\ W \leq \dfrac{t}{1-t}, & \dfrac{1}{2} \leq t \leq 1. \end{cases} \quad (3)$$

• требование центральной (относительно t) симметрии распределения, то есть $\lambda(r,t) = \lambda(\dfrac{\alpha\beta}{r}, 1-t)$ приводит к условию

$$W(t)W(1-t) = 1. \quad (4)$$

• требование эффективности затрат: локальная эффективность затрат по направлению λ_i при $W \neq 1$ не меньше, чем локальная эффективность затрат λ_i^0 при $W \equiv 1$, то есть $\delta_i = \dfrac{\lambda_i - \lambda_i^0}{\lambda_i} \geq 0$.

Требование $\delta_i > 0$ после преобразований эквивалентно условию

$$(W-1)[r^2t^2 - \alpha_i\beta_i(1-t)^2W] \geq 0. \quad (5)$$

В частности, при $r = \sqrt{\alpha_i\beta_i}$ имеем

$$(W-1)\left[\left(\frac{t}{t-1}\right)^2 - W\right] \geq 0. \quad (6)$$

На рис. 3 *а* изображена заштрихованная область, в которой выполняются требования к W

$$\begin{cases} \dfrac{t}{1-t} \leq W \leq 1, & \text{при} \quad 0 < t \leq \dfrac{1}{2}, \\ 1 \leq W \leq \dfrac{t}{1-t}, & \text{при} \quad \dfrac{1}{2} \leq t < 1. \end{cases} \quad (7)$$

Горизонтальная линия на рис. 3 *а* ($W = 1$) соответствует распределению (2), пунктирная линия ($W = \dfrac{t^2}{(1-t)^2}$) соответствует распределению, когда $x_i + y_i = 1$, а штрихпунктирная линия ($W = \dfrac{t}{1-t}$) – распределению x_i, y_i = const.

Условиям (3–7) удовлетворяет семейство функций вида

$$W_1 = \frac{1-c(1-t)}{1-ct}, \quad 0 \leq c < 1$$
$$W_2 = \frac{1-c\sin(2\pi t)}{1+c\sin(2\pi t)}, \quad 0 \leq c \leq \frac{1}{\pi} \quad (8)$$

представленные на рис. 3 *а* кривыми ($a \to W_1(c = 0{,}5)$; $b \to W_2(c = 0{,}2)$) для $r = \sqrt{\alpha_i\beta_i}$.

Неограниченное время реализации ($0 \leq t < \infty$). В случае неограниченного времени реализации проекта директивные распределения могут быть представлены в виде:

$$x = \frac{rt}{rt + \alpha W}, \; y = \frac{rt}{rt + \beta W}, \; \lambda_i = \frac{x_i y_i W}{rt}.$$

Функция W должна удовлетворять:

• свойствунеобратимостиэффекта $\left(\dfrac{dx}{dt} \geq 0\right)$: $W - t\dfrac{dW}{dt} \geq 0$, что соответствует

$$\begin{cases} W \geq t, & 0 \leq t \leq 1 \\ W \leq t, & t \geq 1; \end{cases} \quad (9)$$

• требованию центральной симметрии $\left(\lambda(r,t) = \lambda\left(\dfrac{\alpha\beta}{r}, \dfrac{1}{t}\right)\right)$, тогда

$$W(t)W\left(\frac{1}{t}\right) = 1; \quad (10)$$

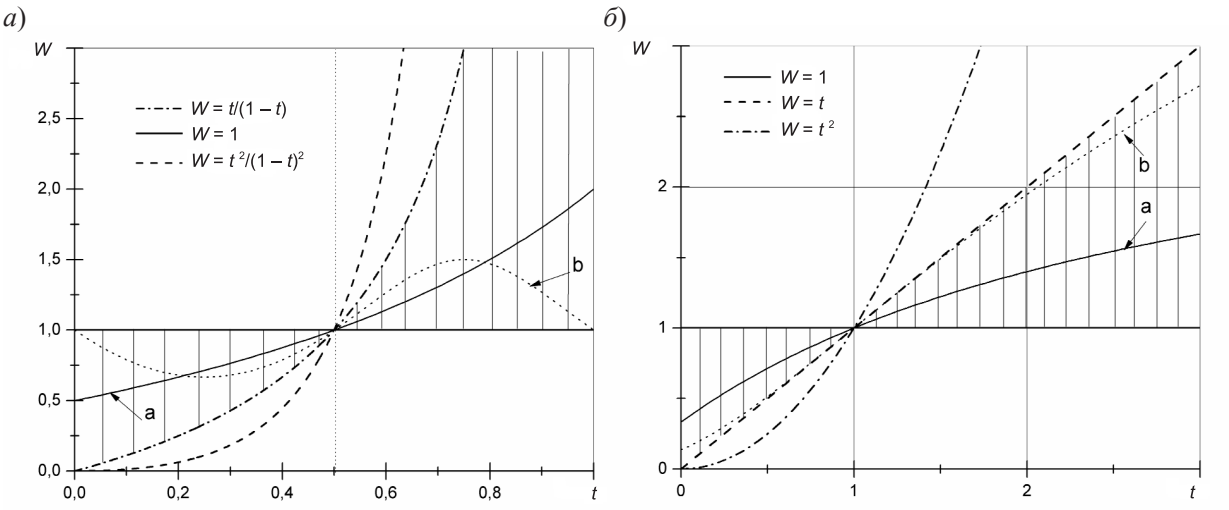


Рис. 3. Варианты функций $W(t)$: *а* – для ограниченного и *б* – неограниченного времени реализации проекта

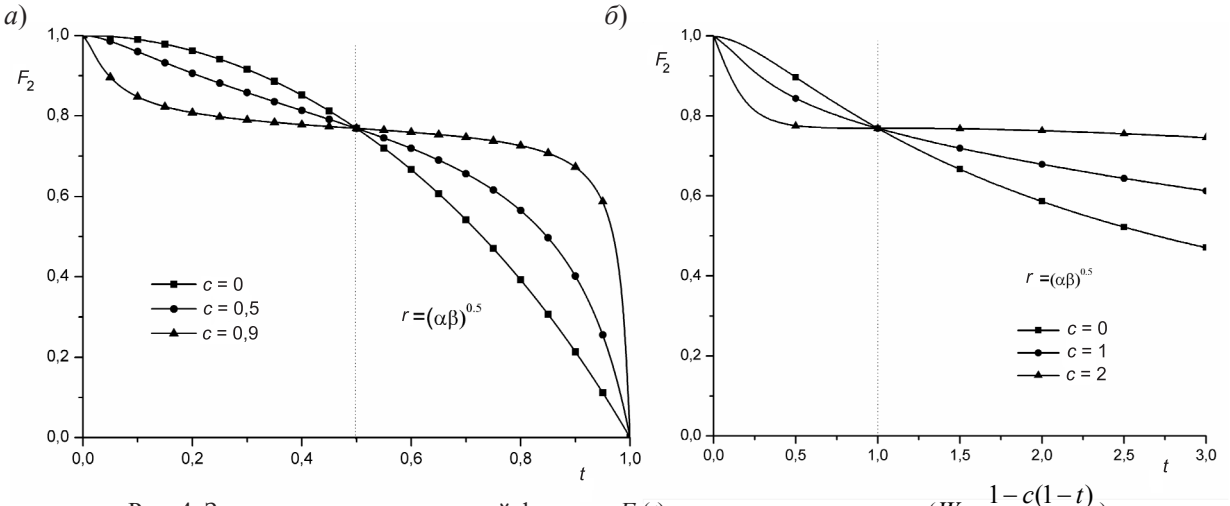


Рис. 4. Зависимость критериальной функции $F_2(t)$: *а* – для ограниченного ($W = \dfrac{1-c(1-t)}{1-ct}$) и *б* – неограниченного ($W = e^{c\tau}$) времени реализации проекта

• требованию локальной эффективности затрат ($W \neq 1$): $(W-1)(r^2t^2 - \alpha_i\beta_i W) \geq 0$. Отсюда

$$W \leq 1, \quad W \geq \frac{r^2}{\alpha_i\beta_i}t^2, \quad 0 \leq t \leq 1$$

или (11)

$$W \geq 1, \quad W \leq \frac{r^2}{\alpha_i\beta_i}t^2, \quad t \geq 1.$$

В частности, для $r = \sqrt{\alpha_i\beta_i}$ имеем $(W-1)\times$ $\times(t^2 - W) \geq 0$.

На рис. 3 *б* изображена заштрихованная область, в которой выполняются требования к W для неограниченного срока реализации проекта:

$$\begin{cases} t \leq W \leq 1, & \text{при} \quad 0 < t \leq 1, \\ 1 \leq W \leq t, & \text{при} \quad t \geq 1. \end{cases} \tag{12}$$

Линия ($W = t$) соответствует равномерному распределению x_i, y_i = const, линия ($W = 1$) – распределению (2).

Условиям (9–12) удовлетворяет семейство функций вида

$$\begin{cases} W_1 = \dfrac{1+c\tau}{1-c\tau}, & 0 < c \leq 1, \\ W_2 = e^{c\tau}, & 0 \leq c \leq 2, \\ W_3 = \dfrac{1+c\sin(\pi\tau)}{1-c\sin(\pi\tau)}, & 0 \leq c < \dfrac{1}{\pi}, \end{cases} \qquad \tau = \frac{t-1}{t+1}, \tag{13}$$

представленное на рис. 3 *б* кривыми ($a \to W_1(c = 0{,}5)$; $b \to W_2(c = 2)$) для $r = \sqrt{\alpha_i\beta_i}$.

Сравнение результатов вычислительного эксперимента параметрического синтеза с использованием директивных распределений, полученных на основе применения функций (8), (13) представлено на рис. 4.

Анализ результатов вычислительного эксперимента позволяет сделать ряд выводов.

Наилучшего эффекта для F_2 можно достичь в рамках ограниченного времени реализации проекта, используя директивное распределение с большим значением параметра c в начале реализации и, наоборот, с меньшим значением параметра c – во второй половине отведенного времени.

При неограниченном времени реализации с заданным желательным временем завершения проекта (относительный момент времени $t^* = 1$) в предпочтительном интервале времени ($0 \leq t \leq 1$) наибольший эффект достигается как и для случая ограниченного времени для больших значений параметров c, а для $t > 1$, наоборот, при малых.

Направления дальнейших исследований рассмотренной группы вопросов связаны с расширением структур директивного распределения и критериев его эффективности (использование всей априорной информации и эмпирических гипотез о неконтролируемых параметрах).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Черноруцкий,И.Г.** Методы оптимизации в теории управления: Учеб. пособие [Текст]/И.Г. Черноруцкий. –СПб.: Питер, 2004. –256 с.

2. **Смирнов, Ю.М.** Математические методы внешнего проектирования сложных систем [Текст]/ Ю.М. Смирнов//Информационно-управляющие системы.–2003.–№ 2–3.–С. 29–44.

3. **Смирнов, Ю.М**. Системный подход к проектированию сложных систем [Текст]/Ю.М. Смирнов, А.А. Салангин//Вестник Херсонского национального технического университета. –2006. –Вып. 2(25). –С.466–472.

4. **Салангин, А.А.** Методология системного анализа проектируемых технических комплексов: Монография [Текст]/А.А. Салангин. –Псков: ППИ, 2009. –280с.

5. **Салангин, А.А.** Директивные распределения для задачи разработки проектов [Текст]/А.А. Салангин//Тр. XII Междунар. науч.-практ. конф.: ч. 2.–СПб.: СПбГПУ, 2008.–С.46–49.

6. **Лавров, С.В.** Подход к субоптимальному решению задач системного проектирования [Текст]/С.В. Лавров, Ю.М. Смирнов, А.А. Турчак//Вопросы радиоэлектроники.–Сер. Радиолокационная техника. –2007.–Вып. 3.–С. 22–29.

УДК 608.4.

Ю.П. Токарев, М.И. Макеев, К.Р. Юмаев

ПОСТРОЕНИЕ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ КОМПОНЕНТ

В настоящее время особенную актуальность приобрела задача построения наземного пункта управления (НПУ) беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) с программно-навигационным управлением. Существует класс БПЛА, для которых применяется программное, либо навигационное управление, не требующее от оператора непрерывного пилотажного контроля за положением и углами ориентации объекта [1]. При этом задачу стабилизации аппарата в воздухе выполняет бортовой пилотажно-навигационный комплекс (ПНК), а оператор контролирует выполнение автоматикой заданной программы полета, отслеживания местоположения отметки БПЛА на экране автоматизированного рабочего места (АРМ) на фоне карты местности (или аэронавигационной карты) с нанесенным на ней маршрутом полета. Вмешательство оператора требуется лишь в случае изменения плана полета от заранее введенного в комплекс управления, либо в случае возникновения внештатной ситуации [2].

При внимательном рассмотрении можно увидеть аналогию с задачами, решаемыми при управлении воздушным движением в автоматизированных центрах УВД [3]. Отличие заключается в том, что оператор подает команды управления (осуществляет диспетчеризацию воздушного движения) не голосом при помощи радиосвязи, а с использованием заранее кодированных команд и посредством соответствующих органов управления в интерфейсе АРМ оператора. Из сказанного выше вытекает возможность построения комплекса управления БПЛА с максимальным использованием уже существующих компонент.

Рассмотрим структуру и состав пункта управления БПЛА.

- Подсистема обработки и отображения информации (АРМ оператора).
- Подсистема сбора и обработки информации от внешних источников данных.
- Подсистема передачи данных с/на БПЛА.
- Подсистема речевой связи.
- Подсистема отображения справочной и вспомогательной информации.
- Подсистема документирования.
- Подсистема метеорологической информации.
- Подсистема тренажера.
- Подсистема сопровождения и управления БПЛА.
- Пультовое оборудование.

Структуру современной АС УВД рассмотрим на примере ЛРАС УВД «Альфа» [3]. В ее состав входят следующие подсистемы (см. рисунок):

подсистема обработки и отображения информации − комплекс средств автоматизации УВД (КСА УВД) «Альфа»;

подсистема связи и передачи данных при взаимодействии с источниками информации и смежными (периферийными) системами и центрами УВД − комплекс средств передачи радиолокаци-

онной, пеленгационной, речевой и управляющей информации «Ладога»;

подсистема обеспечения метеорологической информацией;

подсистема обработки плановой и аэронавигационной информации или комплекс средств автоматизации ПВД (КСА ПВД) «Планета»;

подсистема синхронизации – система точного времени «Метроном»;

система коммутации речевой связи (СКРС) «Мегафон»;

подсистема отображения справочной и вспомогательной информации;

подсистема документирования радиолокационной, речевой информации и данных об ИВП − магнитофон «Гранит»;

подсистема обучения и тренировки специалистов УВД − комплексный диспетчерский тренажер «Эксперт»;

пультовое оборудование для организации автоматизированных рабочих мест (АРМ) специалистов УВД и технического персонала универсальных пультов серии «Пульт-А».

В перспективную АРАС входит также подсистема автоматического зависимого наблюдения в вещательном диапазоне (АЗН-В), включая транспондер и линию передачи данных (ЛИД) режима 4.

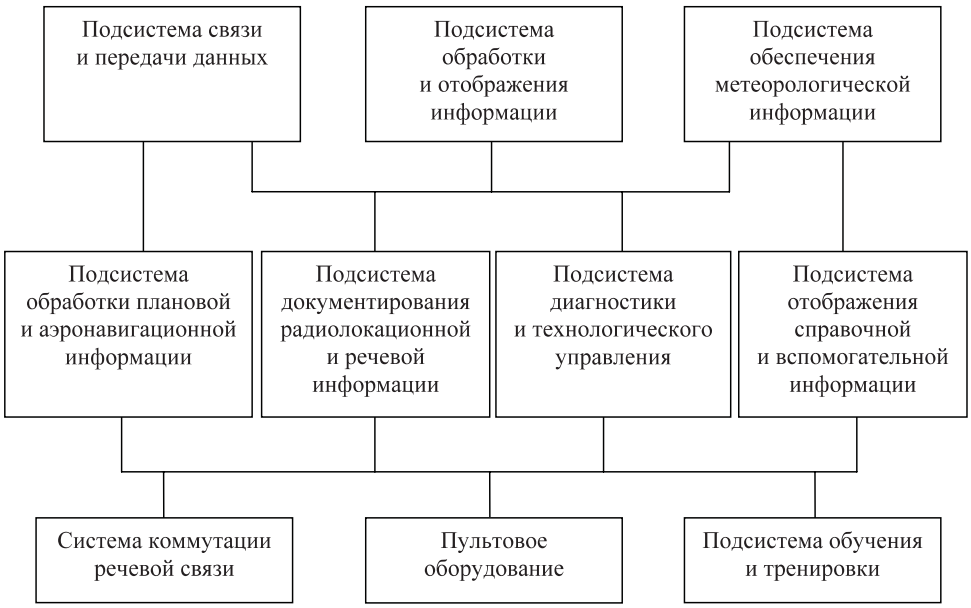
Конструкция системы позволяет наращивать количество других источников информации (в т. ч., удаленных), таких, как трассовые и аэродромные РЛК, первичные ОРЛ-Т, ВОРЛ, ПРЛ и АРП.

Система имеет модульную структуру. Аппаратная часть модулей, составляющих АРАС, выполнена на основе стандартных вычислительных средств, средств отображения, бесперебойного питания, ввода-вывода, сетевого и коммутационного оборудования массового промышленного производства.

АРАС обеспечивается аппаратурой технического управления и эффективными средствами контроля работоспособности модулей и элементов системы. В ней предусмотрено автоматическое переключение с отказавших функциональных элементов на резервные. Тестовый аппаратный контроль и диагностика охватывают все технические устройства.

В АРАС как в информационно-вычислительной системе сетевого типа постоянная информация и программное обеспечение комплексов и подсистем защищены от несанкционированного доступа. При передаче информации используются средства защиты от ошибок. Функционирование АРАС в целом, а также ее комплексов и технических средств защищено от ошибочных действий операторов.

Покажем схожесть структуры центра УВД и НПУ БПЛА рассматриваемого класса. Далее выделим общие компоненты, которые без изменения или с незначительными доработками могут быть заимствованы для построения НПУ БПЛА.



Структура современной АС УВД на примере ЛРАС УВД «Альфа»

Опишем подробнее отдельные компоненты системы управления БПЛА, имеющие специфические особенности.

Рассматриваемый класс БПЛА может управляться при помощи канала связи, построенного на базе технологии АЗН-В режима 4. Такие БПЛА уже существуют и совершают полеты.

Данные о местоположении и параметрах полета летательного аппарата поступают в комплекс по радиолинии режима 4. Функцию приема данных из радиоэфира выполняет наземная станция связи навигации и наблюдения (НССНН) АЗН-В режима 4 [3]. Она является стандартным модулем центра управления воздушным движением с использованием технологии АЗН-В режима 4. Эта станция полностью отвечает требованиям рассматриваемого комплекса управления БПЛА. Во-первых, поддерживается канал связи с летательным аппаратом по заданному протоколу связи. Во-вторых, обеспечивается необходимый уровень резервирования модуля. НССНН способна автоматически продолжать работу при одиночном отказе одной из своих составляющих частей. В-третьих, не требуется присутствие оператора для управления станцией в процессе выполнения полетного задания. Следует добавить, что НССНН способна функционировать при пропадании внешнего питания как минимум 20 мин, что вполне достаточно для перехода на резервный источник питания. Это достигается путем применения приемо-передатчиков с энергопотреблением, сравнимым с обычным персональным компьютером. Данный факт позволяет использовать для обеспечения электропитания НССНН стандартные источники бесперебойного питания, которые входят в обычную комплектацию НССНН.

Следующая компонента комплекса − рабочие места операторов управления. Как уже было сказано раньше, АРМ оператора управления БПЛА рассматриваемого класса имеет много общего с АРМ оператора УВД. Оно представляет собой персональный компьютер с полноцветным экраном высокого разрешения, стандартные органы управления компьютером (клавиатура, манипулятор мышь, либо трекбол). На экране АРМ отображается карта местности. На карте местности нанесены условные обозначения, показывающие зоны полетов, маршруты движения летательных аппаратов и отметки самих летательных аппаратов. Как и на АРМ диспетчера УВД, летательный аппарат обозначен условным знаком с находящейся рядом с ним краткой текстовой информацией, служащей для его идентификации и информировании о высоте, скорости и направлении полета (формуляром воздушного судна). Данные функции целиком реализует АРМ оператора упомянутой выше системы управления воздушным движением «Альфа». АРМ позволяет свободное перемещение центра экрана относительно карты местности, выбор масштаба отображения, настройку насыщенности отображаемой картографической информацией. АРМ обеспечивает необходимый контроль доступа (позволяет совершать действия по управлению лишь определенным, допущенным к управлению операторам). Остается лишь дополнить данное АРМ необходимой функциональностью для отображения специфических параметров, относящихся именно к управлению БПЛА, а также предоставить оператору удобный интерфейс для задания навигационной программы БПЛА и ее коррекции.

Программное обеспечение АРМ «Альфа» создано по модульному принципу, что позволяет без внесения изменений в состав основной программы подключать к нему дополнительные модули, обеспечивающие новые функции. Применительно к рассматриваемому комплексу управления это возможность отображения маршрута полета специфичным для БПЛА образом и отображение окна с параметрами движения аппарата и командными кнопками, задающими маршрут полета и осуществляющими коррекцию программы движения. В процессе разработки комплекса этот функциональный модуль был реализован и подключен к АРМ «Альфа». При этом АРМ «Альфа» сохранило функции отображения стандартных отметок воздушных судов.

Для связи операторов управления между собой и с руководителем полетов требуется система голосовой связи. Данную функцию обеспечивает система цифровой связи «Мегафон». Система реализована с использованием стандартных компонент на базе персональных компьютеров.

Одна из важных функций комплекса − протоколирование событий, происходящих в комплексе, а также запись воздушной обстановки (т. е. сигналов с источников данных) с возможностью последующего воспроизведения для анализа или демонстрации. Такая функция реализуется при помощи системы цифрового магнитофона «Гранит», выполненного с использованием стандартных составляющих на базе персонального компьютера.

Таким образом, обеспечивается не только протоколирование данных о воздушной обстановке, но и действий операторов, а также их переговоров. Комплекс управления БПЛА, построенный с использованием компонент системы УВД, получает возможность тесной интеграции с ней: способен давать операторам управления информацию не только об управляемых ими БПЛА, но и обо всех воздушных судах, находящихся в контролируемой зоне полетов [4]. Также сохраняется возможность осуществлять голосовую связь как с диспетчерами служб УВД, так и с пилотами воздушных судов.

Расширением системы, не являющейся компонентой системы УВД, является модуль сопровождения и управления БПЛА. Он реализуется в виде набора вычислительных блоков, которые предназначены для выработки команд управления БПЛА, осуществляющих контроль за движением аппарата по заданному маршруту. Данный модуль комплекса не зависит от АРМ операторов и может осуществлять автономный контроль за движением БПЛА без участия операторов управления (даже при временно не функционирующих АРМ операторов). Тем самым повышается устойчивость всего комплекса управления к отказам оборудования. Модуль сопровождения и управления также строится на базе плат стандартных персональных компьютеров.

Комплекс управления БПЛА с использованием технологии АЗН-В для аппаратов рассматриваемого класса может быть построен из стандартных компонент системы УВД. Такой путь целесообразен, т. к. это приводит к снижению себестоимости комплекса, упрощению его эксплуатации, сокращению сроков построения. Открывающаяся возможность обмена информацией между комплексом управления БПЛА и АС УВД будет способствовать повышению уровня безопасности воздушного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кулик, А.С.** Проблематика разработки перспективных малогабаритных летающих роботов [Текст]/А.С. Кулик, А.Г. Гордин, В.В. Нарожный [и др.]. –Харьков, Национальный аэрокосмический ун-т имени Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». –Украина, 2006. –С.1–33.

2. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий [Текст]/Под ред. М.Н. Крас ильщикова,Г.Г. Себрякова.−М.:Физматлит, 2003.–279 с.

3. **Ахмедов, Р.М.** Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации: Учеб. пособие [Текст]/Р.М. Ахмедов, А.А. Бибутов, А.В. Васильев [и др.]; Под ред. С.Г. Пятко, А.И. Красова.−СПб.: Политехника, 2004. –444 с.

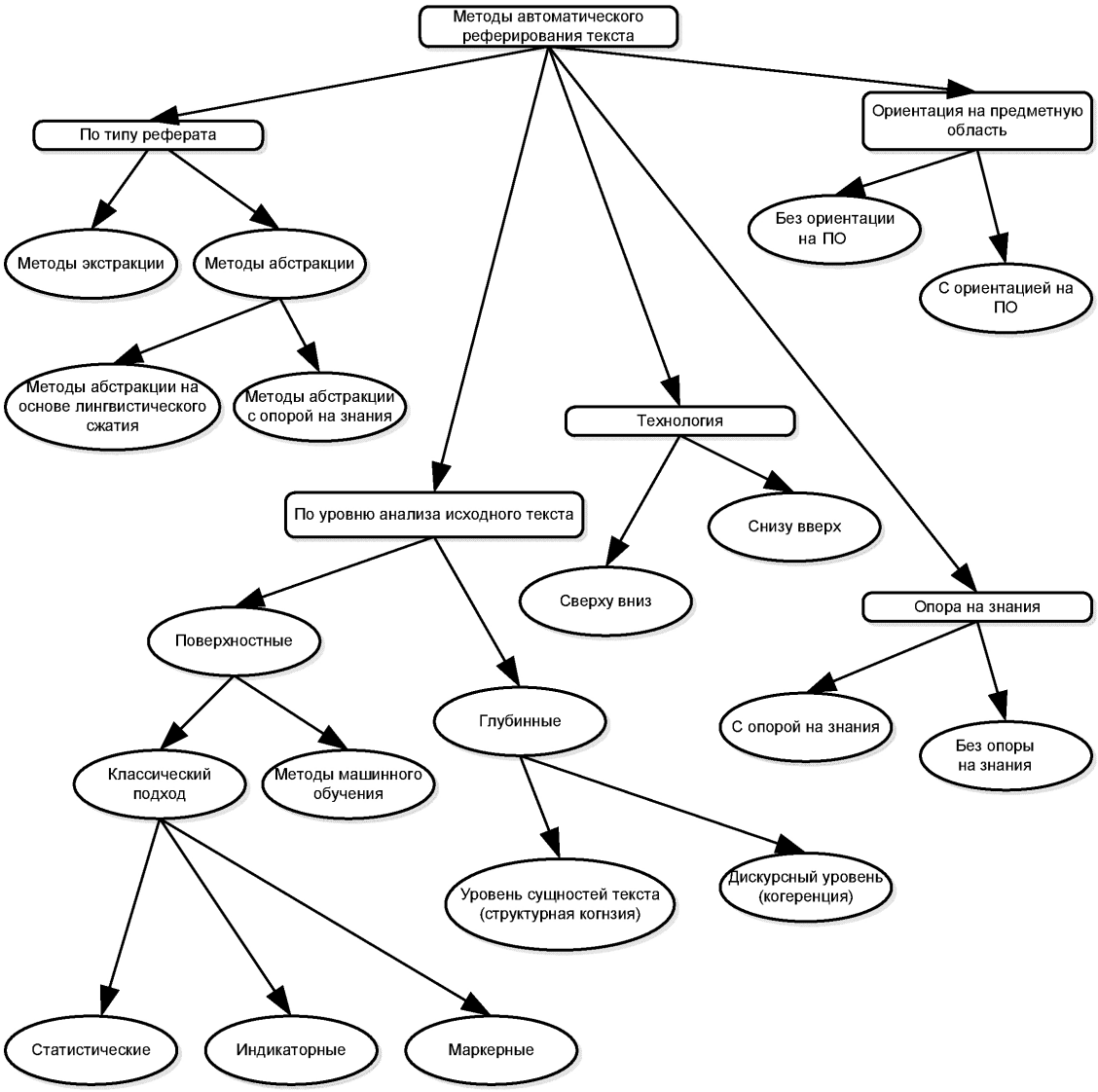
4. Патент № US2008033604 «System and Method For Safely Flying Unmanned Aerial Vehicles in Civilian Airspace» [Электронный ресурс] опубл. 2008-02-07, http://v3.espacenet.com

УДК 004.912

С.Д. Тарасов

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕФЕРИРОВАНИЯ

Одна из самых серьезных проблем современного общества – лавинообразное увеличение объема информации, которую должен воспринимать, хранить и использовать человек в процессе своей трудовой деятельности. Согласно последним исследованиям, до 2020 г. количество информации и потребности в ней будут расти экспоненциально [1]. В таких условиях особую важность приобретают новые эффективные методы борьбы с большими объемами информации. Одним из таких методов является автоматическое реферирование как вид аналитико-синтетической обработки документов, позволяющий осуществлять требуемую информационную поддержку лиц, принимающих управленческие решения. Классическое реферирование – процесс сжатия текстового документа и получение вторичного документа (реферата), в котором сохраняется смысл



Классификация методов автоматического реферирования

оригинала. Реферат представляет собой краткое изложение содержания документа, его части или коллекции документов, включающее основные фактические сведения, необходимые для первоначального ознакомления с первоисточником и определения целесообразности обращения к нему. Использование рефератов вместо первоисточников документов позволяет эффективнее работать с большими объемами информации.

Классификация методов автоматического реферирования

С самого начала активного использования ЭВМ первого поколения (с середины 50-х гг. XX в.) стали предприниматься попытки решать задачи обработки текста на естественном языке. Одной из первых задач по обработке естественно-языковых текстов при помощи ЭВМ стал машинный перевод. Почти одновременно с работами по машинному переводу начались исследования по использованию ЭВМ для целей автоматического реферирования текстов.

На первом этапе исследований наиболее популярными были подходы, основанные на выявлении тех или иных статистических закономерностей распределения терминов в тексте или их взаимного расположения в нем [2, 3]. В дальнейшем исследования в области автоматизированного

реферирования сместились в сторону использования внутренних структур текста, выявления той информационной основы, которая организует весь текст [4, 5]. Классификация современных методов автоматического реферирования представлена на рисунке. Рассмотрим ее более подробно.

1. По *типу получаемого реферата* можно выделить следующие подходы.

1.1 *Экстракция* (*извлечение предложений*, *Sentence Extraction*, *квазиреферирование*) – извлечение из исходного текста наиболее важных и существенных информационных блоков (абзацев, предложений). Первые методы автоматического реферирования были ориентированы именно на извлечение предложений. При этом наиболее значимые предложения отбирались на основе позиционных (местоположение предложения в документе, разделе, абзаце с определением типа выделенного элемента, например, заголовок, вступление, заключение) и тематических (наличие ключевых слов в предложении) критериев. Дальнейшее развитие методов извлечения предложений привело к использованию более «тонких» маркеров, фиксирующих значимость предложений (например, фраз типа «в итоге», «наше исследование показывает», «важно» и др.) и ориентации на связность элементов текста (учет близости расположения в тексте, частоты повторов и синонимичности, тождества по референту и т. п.). Методы данного подхода характеризует наличие оценочной функции (*Scoring Function*) важности информационного блока (предложения), сложность вычисления которой постоянно росла с развитием методов и учетом все большего списка количественных и качественных характеристик текста. Все существующие системы автоматического реферирования промышленного масштаба реализованы в рамках данного подхода. К основному недостатку систем этого класса стоит отнести отсутствие связанности текста получаемого реферата: как правило, выбранные наиболее значимые информационные блоки никак не связаны между собой.

1.2. *Абстракция* (*извлечение содержания*, *Content Extraction*) – генерация реферата с порождением нового текста, содержательно обобщающего первичный документ или документы. Данный подход характеризуется тремя неотъемлемыми этапами: анализ исходного текста с генерацией внутреннего представления, семантическое сжатие внутреннего представления и синтез нового текста (реферата). В рамках данного подхода можно выделить два основных направления.

1.2.1. *Абстракция на основе лингвистического сжатия.* Методы данной группы ориентированы на чисто лингвистический подход к сжатию текста. При этом этап анализа входного текста представляет собой синтаксический разбор и формирование синтаксического дерева разбора. Процедуры сжатия манипулируют непосредственно деревьями с целью удаления и перегруппировки частей, например, путем сокращения ветвей на основании некоторых структурных критериев, таких, как скобки или встроенные условные или подчиненные предложения. После такой процедуры дерево разбора существенно упрощается, становясь, по существу, структурной «выжимкой» исходного текста. Заключительным этапом является формирование текста итогового реферата. Для реализации данных методов необходимы мощные вычислительные ресурсы для систем обработки естественных языков (*NLP — natural language processing*), в т. ч., грамматики и словари для синтаксического разбора и генерации естественно-языковых конструкций.

1.2.2. *Абстракция с опорой на знания.* Подход для составления краткого изложения текста, основанный на абстракции, уходит корнями в системы искусственного интеллекта и опирается на попытки построить модели понимания и синтеза текста на естественном языке [6–8]. Синтаксический разбор при этом является составной частью метода анализа, но деревья разбора в этом случае не порождаются. Напротив, формируются концептуальные репрезентативные структуры всей исходной информации, которые аккумулируются в базе знаний. В качестве структур могут быть использованы формулы логики предикатов или такие представления, как семантическая сеть и набор фреймов [9]. В процессе преобразования концептуальное представление претерпевает несколько изменений. Избыточная и не имеющая прямого отношения к тексту информация устраняется путем удаления поверхностных суждений или отсечения концептуальных подграфов. Затем информация подвергается дальнейшему агрегированию путем слияния графов (или шаблонов) или обобщения информации, например, при помощи таксономических иерархий отношений подклассов. В результате преобразования формируется концептуальная репрезентативная структура реферата, по существу, концептуальные «выжим-

ки» из текста. Кроме грамматик и словарей для синтаксического разбора и синтеза текста на естественном языке, для реализации методов данного подхода необходимы онтологические справочники, отражающие соображения здравого смысла и понятия, ориентированные на предметную область, для принятия решений во время анализа и определения наиболее важной информации.

Несмотря на то, что большинство исследователей считают методы абстракции более близкими к ручному составлению рефератов экспертами, чем методы экстракции, по мнению автора это не так. Для различных типов задач реферирования могут быть использованы различные ручные методики, в т. ч. и составление реферата путем выделения наиболее информативных структурных единиц (предложений) и связывания их в итоговый связный текст. Именно связанность получаемого в результате реферирования текста отличает методы ручного составления рефератов от классических методов автоматической экстракции предложений.

2. Не менее важной является классификация методов автоматического реферирования *по уровню анализа исходного текста*. На основе этого критерия можно выделить подходы в соответствии со следующими уровнями:

2.1. *Поверхностный уровень* (*Surface-level approach*). Все подходы поверхностного уровня характеризует поверхностный анализ текста. Текст, как правило, представляется как линейная последовательность предложений, никак не связанных между собой. Предложения рассматриваются как линейные последовательности слов (в некоторых случаях, словосочетаний). В рамках подхода этого уровня можно выделить два основных направления.

2.1.1. *Классические методы.* В большинстве методов классического подхода применяется модель линейных весовых коэффициентов. Основу аналитического этапа в этой модели составляет процедура назначения весовых коэффициентов для каждого блока текста в соответствии с такими характеристиками, как расположение этого блока в оригинале, частота появления в тексте, частота использования в ключевых предложениях, а также показатели статистической значимости. Сумма индивидуальных весов, как правило, определенная после дополнительной модификации в соответствии со специальными параметрами настройки, связанными с каждым весом, дает общий вес всего блока текста. В рамках методов классического подхода можно в свою очередь выделить три основных направления.

2.1.1.1. *Статистические методы* основаны на использовании статистических параметров для оценки информативности различных элементов текста (слов, предложений, абзацев) прежде всего по частоте встречаемости слов в тексте. В результате ранжирования лексики в том или ином документе они определяют слова с высоким рангом и их сочетаемость в различных фразах и по этим показателям оценивают информативность данных фраз. В другом случае на основе функционирования различного типа повторов всем предложениям присваивается функциональный вес, определяемый числом слов данного предложения, связанных со словами других предложений, и на основе выбранного критерия (порога) осуществляется экстрагирование элементов с наибольшим функциональным весом.

Первым методом автоматического реферирования принято считать статистический метод, предложенный Г. Луном в 1958 г. [10]. Суть метода заключается в выделении в тексте частотных слов, вычислении весов предложений с помощью суммирования частот (весов), входящих в их состав слов и включении в реферат предложений с наибольшими весами. Для подсчета весов предложений не используются слова, входящие в так называемый «стоп-лист» (местоимения, предлоги, артикли). Дальнейшее развитие статистических методов происходило в рамках комбинации их с позиционными и индикаторными методами.

2.1.1.2. *Позиционные методы* опираются на предположение о том, что информативность текстового блока (предложения) находится в зависимости от его позиции (места) в тексте документа. Данные методы относительно эффективны на строго структурированных документах типа стандартов, патентных описаний и т. п., а в остальных случаях применяются лишь в сочетании с другими методами, поскольку в чистом виде не обладают необходимой репрезентативностью результатов.

2.1.1.3. *Индикаторные методы* основаны на функциональной идентификации фраз первичного документа с помощью индексации их специальными словами – маркерами, индикаторами и коннекторами (лексический аппарат свертывания).

Маркеры (им принадлежит основная роль) – это отдельные слова или словосочетания, обеспечивающие однозначную идентификацию

фраз, принадлежащих к различным смысловым (содержательным) аспектам текста. Существуют два типа содержательных аспектов (их называют иногда «сетками»): первый тип отражает структуру (логику) вида документа (например, статьи, патентного описания, методического пособия и т. д.), второй тип – структуру (логику) той или иной области знания или группы объектов.

Индикаторы – лексические единицы, призванные выполнять преимущественно модально-оценочные функции, – с содержательными аспектами четко не связаны, а отражают отношение автора к рассматриваемому в документе вопросу. Они подразделяются на подытоживающие, акцентирующие, констатирующие, оценочно-вероятностные, иллюстрирующие и др. Например, «итак», «следовательно», «следует подчеркнуть», «важным представляется», «существенным является», «главное в» и многие другие.

Коннекторы – лексические единицы, обеспечивающие межфразовые связи. Известно, что законченным смыслом (автосемантичностью) чаще всего обладают не отдельные предложения, а некоторая их совокупность – минимальный релевантный фрагмент. Нередки случаи, когда маркированное предложение является синсемантичным – в нем основной предмет рассмотрения заменен местоименным словом или словосочетанием. В этом случае для устранения смысловой неполноценности (синсемантичности) фразы к нему необходимо присоединить выше- или нижестоящую фразу (или фразы). Функцию сигнала о смысловой неполноте предложения и выполняют коннекторы, которые разделяются на левые, отсылающие к вышестоящей фразе (аналогичный, данный, этот, такой, описанный, изложенный и др.), и правые, уточняющие, добавляющие (более того, вместе с тем, кроме того, в частности, тем самым и др.), требующие присоединения нижестоящей фразы.

Первой работой в области автоматического реферирования с применением индикаторного подхода принято считать работу Г. Эдмундсона, опубликованную в 1969 г. [11], сочетающую в себе статистический метод Г. Луна с позиционным и индикаторным методами. Данный метод характеризует модель линейных весовых коэффициентов:

$$W = a_1 \cdot W_{stat} + a_2 \cdot W_{key} + a_3 \cdot W_{location},$$

где a_1, a_2 и a_3 – коэффициенты для весов предложения на основе статистического, индикаторного и позиционного подходов соответственно. Статистический вес текстового блока W_{stat} вычисляется как нормированная по длине блока сумма весов входящих в него слов или словосочетаний. Вес $W_{location}$ определяется расположением блока в исходном тексте и зависит от того, где появляется данный фрагмент: в начале, в середине или в конце, а также используется ли он в ключевых разделах текста, например, в заголовке или выводах. Ключевые фразы представляют собой конструкции-маркеры, например, «в заключение», «в данной статье», «в результате анализа» и т. п. Весовой коэффициент ключевой фразы может зависеть также от оценочного термина, например, «отличный».

Дальнейшее развитие методов классического направления происходило в соответствие с моделью линейных весовых коэффициентов: сочетания статистического, индикаторного и позиционного подходов с различными нововведениями. Первой коммерческой системой автоматического реферирования принято считать систему для автоматического реферирования статей по химии (*CAS, Chemical Abstracts Service*) [12], разработанную J.J. Pollock и A. Zamora на основе алгоритма [13]. Основой системы был индикаторный подход, ориентированный на специфичную предметную область (научные статьи по химии). В работе [14] описывается система *ANES*, в которой важные слова выделяются на основе *TF*IDF*. Единственное отличие от традиционного подхода – обнаружение анафорических связей, что позволяет исключить из реферата предложения с «висящими» ссылками на предыдущие предложения. На основе [15] в [16] предложен метод реферирования, где в качестве лексических единиц текста используются не слова, а словосочетания. К методам классического направления можно также отнести работы Р.Г. Пиотровского [17].

Работы в направлении индикаторного подхода в СССР велись в течение ряда лет (1980-е – начало 1990-х гг.), в частности, коллективом разработчиков ЛГИК имени Н.К. Крупской и ВНИИ «Информэлектро» под руководством В.П. Леонова и Д.Г. Лахути [18].

Своеобразным развитием методов классического направления можно считать переход к более сложным статистическим моделям. Определенную популярность приобрели модели, основанные на марковских цепях [19]. Однако эти

модели достаточно сложны и имеют высокую вычислительную сложность. Также стоит отметить алгоритм LRU-K, который является вариантом алгоритма «последний недавно использованный». Данный алгоритм был предложен в [20] как алгоритм определения значимости термина в тексте [21]. Применение алгоритмов класса «последний используемый» опирается на известное из психологии предположение, что человек в быстрой памяти сохраняет только относительно малое количество объектов. Такой подход позволяет учесть «локальную плотность» распределения слов в документе. Дополнительно учитывается структура документа: реферат формируется для каждой части документа отдельно, далее отбираются пять фрагментов с наибольшим весом. Эксперименты с участием экспертов показали превосходство этого подхода над методами, основанными на частотах слов. Кроме того, данный метод продемонстрировал высокую производительность.

В [22] предложен метод квазиреферирования, основанный на различных стратегиях оценивания информативности предложений внутри сверхфразовых единств и регулируемом выборе ограниченного числа предложений для реферата на основе сканирующих статистик. В работе предлагается формальный критерий выделения сверхфразовых единств, основанный на использовании сканирующих статистик, для выявления аномальных отклонений от равномерности в распределении лексических единиц по тексту. Предполагается, что выделенные с помощью сканирующих статистик аномальные сгущения (кластеры) отдельных лексических единиц, трактуемые как сверхфразовые единства, достаточно адекватно отражают смысловое содержание соответствующего фрагмента текста. Отличительная особенность подхода – построение «профиля кластеризуемости» лексических единиц в тексте и отбор фраз для квазиреферата в местах существенного нарастания или убывания этой функции. Такая стратегия присуща позиционным методам отбора значимых фрагментов в тексте, но они работают с задаваемой автором структурой текста, а не со сверхфразовыми единствами.

Отдельно стоит выделить метод фрактального реферирования, предложенный в [23]. В ряде исследований [24, 25] отмечается, что большинство статистических методов реферирования рассматривают исходный документ как линейную последовательность предложений, но игнорируют его структуру. Метод фрактального реферирования основывается на довольно популярной в настоящее время математической теории фракталов. Фрактальный принцип самоподобия предполагает бесконечное дробление набора объектов с сохранением их свойств. Реферирование исходного документа производится путем многократного использования сжимающих преобразований в теории фракталов. По аналогии с фрактальной геометрией большой документ имеет иерархическую структуру с несколькими уровнями: главы, разделы, подразделы, пункты, предложения, понятия и слова. Хотя документ не является истинной математической моделью фрактального объекта, т. к. не может рассматриваться в бесконечном уровне абстракции, структуру документа можно рассматривать как псевдо-фрактальную с конечной рекурсией.

2.1.2. *Методы на основе машинного обучения* стали своеобразным развитием статистических методов классического подхода. В качестве набора признаков выбирается ряд статистических характеристик.

- *Тематические признаки*:

топ-10 частотных слов документа;

сумма весов слов (*TF*IDF*);

имя + фамилия;

слова заголовка.

- *Структурные признаки предложения*:

вопросительное предложение;

прямая речь;

длина предложения, отнесенная к самому длинному предложению в тексте;

подчинительный союз из списка;

синтаксическая сложность предложения.

- *Структурные признаки текста*:

топ-10 частотных слов документа для предыдущего и последующего;

сумма весов слов (*TF*IDF*), для предыдущего и последующего;

простой сигнал анафоры;

положение предложения в тексте.

- *Формальные признаки*:

длина предложения в знаках;

количество запятых в предложении;

количество точек в предложении;

количество чисел в предложении.

На основе корпуса текстов и имеющихся ручных рефератов, составленных экспертами, происходит обучение классификатора.

Первые принципы автоматического рефери-

рования с применением корпусного подхода были изложены в [11]. Первой работой, в которой задача выделения предложений была сформулирована как задача автоматической классификации на основе машинного обучения, стала публикация [26]. В ней используется относительно небольшой набор признаков, который был опробован в более ранних работах: длина предложения, «сигнальные фразы», положение предложения в абзаце, наличие в предложении частотных (для этого документа) слов, присутствие слов, набранных в верхнем регистре. В качестве метода использовался байесовский классификатор. Корпус для обучения состоял из 188 научно-технических статей на английском языке, для которых профессиональными библиографами были составлены рефераты. Так как предложения из составленных вручную рефератов могли отличаться от предложений оригинального текста, проводилась дополнительная процедура нахождения соответствия между предложениями реферата и оригинала. Результат оценки методом перекрестной проверки (*cross validation*): при формировании рефератов, совпадающих по длине с ручными рефератами (в среднем три предложения), доля совпадений с сопоставимыми предложениями рефератов-образцов составила 42 %. Дальнейшим развитием стала работа [27] по созданию системы автоматического реферирования научно-технических текстов на корейском языке на основе алгоритма *KPC* [26]. Авторами было обнаружено, что более чем 96 % предложений ручных рефератов были главными предложениями темы. В данной работе был сделан вывод, что использование комбинации статистических, позиционных и индикаторных методов дает наилучший результат.

Аналогичный подход применяется и в [28]. В работе используется больший набор признаков, а также более совершенный метод классификации – метод опорных векторов (*support vector machine*). В качестве корпуса используются 180 газетных статей корпуса «*Text Summarization Challenge*» на японском языке. Для каждого документа в корпусе редакторами выделены наборы наиболее важных предложений, соответствующие 10 %, 30 % и 50 % объема исходного текста (по количеству предложений). В работе применяется достаточно широкий набор признаков: позиция предложения, длина предложения, вес предложения (сумма модифицированных весов *TF*IDF* всех слов предложения), а также веса предыдущего и последующего предложений, плотность ключевых слов документа, наличие в предложении имен собственных определенных типов, присутствие определенных союзов и других функциональных слов, учитываются части речи, «семантическая глубина» существительных (определяется по словарю), жанр документа (каждому документу в корпусе приписан один из четырех жанров), наличие специальных символов, прямая речь, утвердительные высказывания. Пятикратная перекрестная проверка дала такой результат: 46,2 % совпадающих предложений при объеме реферата 10 % от исходного документа и 51,6 % – при объеме 30 %.

Дальнейшее развитие подхода *KPC* есть в [29]. В работе предлагается несколько дополнений к традиционным статистикам: помимо морфологии предложено использовать словарь синонимов, а также идентифицировать имена собственные, названия, сокращения и т. д.

В работе [30] рассматривается сразу несколько различных методик в области автоматического реферирования на основе машинного обучения. Авторы описывают реферирование как процесс, состоящий из следующих частей: идентификация темы, соответствующая этапу анализа исходного текста; толкование концептов, соответствующее этапу трансформации; генерация реферата, соответствующая этапу синтеза результирующего текста. Идентификация темы нацелена на извлечение наиболее значимых понятий в документах для того, чтобы использовать их для ранжирования предложений. Авторы представляют свой метод для идентификации наиболее релевантной информации. Посредством обучения на корпусе документов и соответствующих им тем в виде набора ключевых слов предложенный метод выдает ранжированный список позиций предложений, который имеет тенденцию содержать в себе большинство ключевых слов, относящихся к теме. Система была обучена на корпусе из 13 000 статей, содержащем тексты, аннотации и ключевые слова. Метод, получивший название «Optimal Position Policy» показал довольно неплохие результаты. В рамках так называемого «толкования концептов» для того, чтобы перейти к более общим темам, Hovy и Lin делают попытки объединить связанные «концепты» путем подсчета в тексте частот концептов из тезауруса WordNet, используя иерархию понятий в тезаурусе для того, чтобы достичь соответствующего обобщения. Предложен-

ную методику можно считать одним из первых шагов на пути от квазиреферирования к составлению абстракций. Однако поскольку многие связи могут отсутствовать в WordNet, авторами были использованы также другие методы на основе машинного обучения, включая категоризацию и кластеризацию. В работе присутствует описание эксперимента по категоризации 30 000 текстов из «Wall Street Journal», где каждая статья отнесена к одной из 32 возможных тематических категорий (космос, банковское дело, окружающая среда, телекоммуникации и т. п.). Для каждой тематической категории были подсчитаны «топ-300» терминов, определяющих тему. В настоящее время данные методы, по мнению авторов, требуют дальнейшего исследования.

Из отечественных разработок стоит отметить работу [31]. В качестве корпуса в работе используются статьи новостного ресурса Газета.ру (http://www.gazeta.ru). Для построения классификатора был использован метод опорных векторов.

Оценка систем автоматического реферирования на основе машинного обучения продемонстрировала возможность их применения для коммерческих и промышленных систем. Однако относительно низкий уровень анализа исходного текста методами поверхностного подхода и относительно низкое качество получаемых рефератов определило направление дальнейшего развития методов в сторону более детального изучения модели текста на естественном языке, как сложной структуры. Этому способствовало развитие различных лингвистических и психолингвистических теорий, основной предмет исследования которых – связность текста [32]. Связность является основным неотъемлемым признаком текста. Известно, что в лингвистической традиции существует две устойчивые тенденции трактовки текста как линейной последовательности предложений и как иерархического образования, обладающего глубинной и глобальной связанностью. Ряд ученых разделяют связность текста на структурную (*когезия*) и содержательную (*когеренция*), при этом, однако, они подчеркивают условность такого деления [33]. Попытки использовать различные лингвистические модели связности текста для задачи автоматического реферирования привели к появлению двух принципиально новых по отношению к поверхностному подходу направлений: так называемые подходы уровня «сущностей текста» (*Entity-level approach*) на основе модели структурной связности текста (когезии) и подходы уровня «дискурсной структуры текста» (*Discourse-level approach*) на основе содержательной модели связности (когеренции). Стоит отметить, что ряд исследователей не разделяет эти два направления, объединяя их по признаку анализа связности текста.

2.2 *Уровень сущностей текста* (*Entity-level approach*). Подходы данного направления более детально рассматривают модель текста, его элементы – «сущности», их взаимосвязи, совместную встречаемость, кореферентность, анафорические отношения и т. д., опираясь на модель структурной связности текста (когезию). Когезия представляет собой формально-грамматическую связность дискурса [34]. Теоретическими основами для исследования послужили научные труды таких ученых, как М.А.К. Хэллидей, R. Hasan, И.Р. Гальперин, а также труды других известных лингвистов. К основным типам языковых отношений между предложениями текста (высказываниям дискурса), которые обеспечивают его структурную целостность и связность, относятся:

референция, делится на анафору (референция имени, которое уже было сказано) и котафору (референция имени, которое еще будет названо);

субституция (*substitute*, замена) имени, глагола и предикативной группы (например, The President arrived);

эллипсис имени, глагола и предикативной группы (опущение, характерное для русского и не характерное для английского языка);

слова-коннекторы (союзы, предлоги);

лексическая когезия (можно взаимозаменять не все слова, а только синонимы).

Выбор наиболее важных предложений для реферата осуществляется на основе анализа этой модели. Связи между сущностями включают в себя:

подобие (сходство), например, словарное совпадение;

близость (расстояние между текстовыми единицами);

совместная встречаемость (родство слов, основанное на их встречаемости в одних и тех же контекстах);

связи по тезаурусу: синонимия, гиперонимия (связи род–вид), связи часть–целое и т. п.

кореферентность (отношения между компонентами высказывания, которые обозначают один и тот же объект внеязыковой действительности),

в т. ч., и анафорические связи;

логические связи, такие, как согласие, возражение, ограничение, логичность, последовательность, связность;

синтаксические связи, например, основанные на результатах грамматического разбора.

Первой работой по автоматическому реферированию в данном направлении можно считать [35], в которой делается попытка разрешения анафорических связей при помощи анализа модели когезии. На первом этапе текст разбивается на набор смежных блоков предложений с использованием вариации метода TextTiling [36]. Для каждого референта в тексте создается глобальная мера «дискурсной значимости», основанная на локальной значимости и частотном критерии. Затем наиболее значимые глобальные сущности в каждом сегменте идентифицируются как основные темы. Для формирования итогового реферата на основе оценок значимости создается перечисление кореферентных фраз, связанных с основными темами, а также некоторой информации из окружающего контекста. Этот формат представления получил название «краткий обзор» (*capsule overview*).

Следующей работой в данной области является статья [37]. В ней рассматривается подход на основе создания лексических цепочек – последовательностей связанных терминов, сгруппированных вместе посредством текстовых структурных связей (когезии). Для выделения лексических цепочек предлагается использовать большой лингвистический ресурс *WordNet*. Группировка слов в лексические цепочки позволяет более точно определить основные темы документа, чем традиционный подсчет наиболее часто встречающихся слов. Основная проблема при формировании цепочек с помощью ресурса *WordNet* – высокая степень многозначности слов в *WordNet*, в результате чего формируется большое количество возможных цепочек. Авторами предложен метод выбора лучшей цепочки, основанный на количестве и весе различных связей внутри лексической цепочки. Узлами цепочки служат существительные, либо составные существительные, определяемые в результате простейшего грамматического разбора. Построение лексических цепочек происходит в два этапа: на первом этапе цепочки строятся для каждого текстового сегмента в отдельности (разбиение текста на сегменты по алгоритму *TextTiling*), на втором этапе цепочки из разных сегментов объединяются, если они содержат хотя бы одно общее слово. Извлечение предложений происходит на основе комбинации нескольких эвристических алгоритмов. Авторами назван ряд ограничений предлагаемого подхода: нет возможности управлять размером и уровнем детализации получаемого реферата; присутствие обособленных анафорических связей; невозможность выбрать единицу текста, меньшую, чем предложение. Тем не менее, оценка по внутренним признакам показала превосходство данного подхода над некоторыми коммерческими системами.

Дальнейшее развитие методов на основе применения лексических цепочек отмечено такими работами, как [38, 39]. Обзор различных методов данного направления, их сравнение и оценка есть в [40]. В рамках подхода уровня сущностей текста также известен подход на основе тезауруса [41].

К наиболее известным исследованиям в России в рамках данного направления относятся [42, 43], проводимые в НИВЦ МГУ под руководством Б.В. Доброва. Авторами предложен ряд методов на основе тематического представления новостного кластера, моделирования лексической связности текста и тезаурусном описании лексических значений, разработана коммерческая система для автоматического сводного реферирования новостных сюжетов для портала «Rambler. Новости».

2.3. *Уровень дискурсной структуры текста* (*Discourse-level approach*) предполагает качественно новый уровень анализа исходного текста, его глобальной структуры, его связи с коммуникативными целями. В основе данного подхода лежит анализ содержательной модели связности текста (когеренции). Когеренция представляет собой семантико-прагматические аспекты смысловой и деятельностной (интерактивной) связности дискурса как локальной, так и глобальной.

Глобальная когеренция – это отношение каждого конкретного высказывания к общему плану дискурса (стратегии, сценарии, когнитивные схемы, находящиеся в сознании участников коммуникации). Глобальная когеренция соответствует планированию своего речевого поведения и соотношение его с ситуацией.

Локальная когеренция – отношение каждого высказывания к текстовой цели, т. е. к цели дискурса. Она осуществляется посредством темарематической связности дискурса. Также харак-

терна логическая когеренция (ее осуществляют коннекторы, риторические фигуры), грамматическая когеренция, семантико-прагматическая когеренция (экспликатура, импликатура, инференция и пресупозиция).

Тематическая когеренция формируется вокруг глобальной темы дискурса или темы, выражается в повторении определённых мотивов и тем, т. е. ключевых объектов, фактов, когнитивных структур, социальных представлений, эксплицитно или имплицитно выраженных в дискурсе.

Первой значимой работой в данном направлении принято считать [44]. Автор применяет риторический анализатор для произвольного текста, который использует ключевые фразы для построения деревьев на основе теории риторических структур (*RST*) из подчиненных предложений исходного текста. Формализация структуры деревьев *RST* позволяет подсчитывать значимость предложений, основанную на структуре этого дерева. Подход показал неплохие оценки (около 60 % точности и полноты) при относительно высокой производительности. Развитие данного направления представлено в [45–47].

3. *По критерию использования опоры на знания*.

3.1. *Методы без опоры на знания* (*Knowledge-poor approach*) не предполагают создания специальных баз знаний какой-либо предметной области с целью понимания смысла текста на естественном языке. К данному направлению относится большинство существующих на текущий момент методов извлечения предложений и ряд методов абстракции на основе лингвистического сжатия.

3.2. *Методы с опорой на знания* (*Knowledge-rich approach*). Предполагают использование специальных баз знаний, содержащих наборы правил и эвристик какой-либо специфичной предметной области для формирования реферата. В рамках данного направления можно выделить работы [8, 48, 49, 50].

4. Также можно рассматривать классификацию методов автоматического реферирования *по технологии построения реферата*.

4.1. *Подходы «сверху-вниз»* (*Top–down approaches*) на основе извлечения информации предполагают трансформацию исходного текста в некоторое более содержательное внутреннее представление, а затем манипуляцию с этим представлением и формирование итогового реферата.

4.2. *Подходы «снизу-вверх» (Top–down approaches)* используют методику информационного поиска и пытаются выделить релевантные фрагменты из исходного текста и сформировать из них итоговый реферат.

5. Также стоит выделить классификацию методов автоматического реферирования *по ориентации на предметную область*.

5.1. *Подходы без ориентации на предметную область (Domain–independent approaches)*.

5.2. *Подходы с ориентацией на конкретную предметную область* (*Domain–dependent approaches*).

Стоит отметить, что приведенная выше классификация современных методов автоматического реферирования довольно условна. Практически каждый из них сочетает в себе комбинацию нескольких подходов разных направлений с некоторыми нововведениями. Кроме того, большинство исследователей данной области вообще не выделяет подходы на уровне модели текста, относя их либо к подходам поверхностного уровня, либо к подходам уровня дискурсной структуры. Также ряд исследователей смешивает понятия подходов абстракции и экстракции с подходами, предполагающими и не предполагающими опору на знания, т. к. построение абстракций, как правило, предполагает опору на знания, а квазиреферирование – нет.

Методы автоматического сводного реферирования

Сводный (обзорный) реферат составляется на некоторое множество документов-первоисточников и является сводной характеристикой определенного содержания документов: обычно по одной теме (проблеме), на произведения автора (авторов), на одном или нескольких языках, за определенный хронологический период и т. д. Критерием такого свода может быть любая типологическая характеристика первоисточника. В этой связи определение обзорного реферата как составленного по нескольким первоисточникам, объединенным только общей тематикой содержания, нужно считать недостаточным, хотя наиболее распространенным способом группировки материала в рефератах остается предметно-тематический. Сводные рефераты могут быть использованы в реферативных указателях, списках, картотеках, критико-биографических словарях, и, что наиболее актуально, в различных

информационно-аналитических отчетах, справках, бюллетенях.

Классификация методов автоматического сводного реферирования не отличается от классификации методов монографического реферирования. Это связано с тем, что основные проблемы реферирования, а, следовательно, и приемы их решения идентичны как для однодокументного (монографического), так и для многодокументного (сводного, обзорного) автоматического реферирования. Таким образом, большинство методов автоматического сводного реферирования комбинируют подходы автоматического реферирования одного документа с подходами и методиками, предназначенными для решения специфичных проблем многодокументного реферирования.

Первый простейший метод многодокументного реферирования был предложен в [51]. Суть метода заключается в построении «карты связей в тексте» – взвешенного графа, узлами которого являются параграфы исходных документов, а весами дуг – коэффициенты словарной близости этих параграфов. Параграфы, имеющие сильные связи с другими параграфами в тексте, считаются «значимыми», и отбираются для включения в реферат. Дальнейшее развитие данного подхода есть в не менее известной работе [52]. Авторами предложен метод, сочетающий в себе некоторое развитие подхода [51] с подходами уровня сущностей текста [35, 37]. В документах выделяются наиболее значимые блоки и их связи на основе модели лексической связности. Для разрешения проблемы повторения информации авторами предложена разновидность жадного алгоритма для включения в реферат наиболее «различных» (уникальных) общих текстовых блоков.

Более детально проблема избыточности и повторов информации в сводных рефератах была рассмотрена в [52]. В работе предложен подход для уменьшения избыточности на основе сравнения предложений-кандидатов с предложениями, уже попавшими в реферат, и оценки новой (непохожей) информации *Maximal Marginal Relevance*. Другой подход к устранению избыточности и повторов на основе предварительной кластеризации предложений и построения «центроида» коллекции документов предложен в [53]. Результатом научных исследований авторов стал программный комплекс автоматического реферирования *MEAD*, реализующий большой набор алгоритмов автоматического реферирования, в т. ч. и сводное реферирование с предварительной кластеризацией предложений (*Cross-sentence informational subsumption, CSIS*). Похожий подход к устранению избыточности используется и в [54]. В [55] предложен подход на основе выделения похожих («перефразированных») предложений из различных документов кластера и использовании их в качестве основных тематических узлов. Развитие этого подхода есть в [56, 57].

Среди методов, предложенных российскими исследователями, стоит отметить подход, разработанный Н.Н. Абрамовой [16], основанный на статистическом методе подсчета весов предложений с использованием в качестве лексических единиц не слов, а словосочетаний. Кроме того, в [42, 43] предложен ряд методов на основе лексических цепочек специального вида – тематических узлов. В качестве лексической базы для создания тематических узлов использовался двуязычный Информационно-поисковый тезаурус для автоматического концептуального индексирования по общественно-политической тематике, разработанный этим же коллективом авторов.

В рамках задач по сводному реферированию отдельно стоит выделить направление исследований, связанных с решением задачи слежения за потоком сообщений и обнаружения новой темы. В этом направлении на основе исследований в [58] предложен целый ряд методов и алгоритмов для решения данной задачи [59, 60].

Современные системы автоматического реферирования

Стремительный рост потока научно-технической информации стал причиной появления довольно высокого спроса на средства автоматического и автоматизированного реферирования и аннотирования. Потребности в таких системах испытывают информационно-аналитические отделы, корпоративные системы документооборота; поисковые машины и каталоги ресурсов *Internet*; автоматизированные информационно-библиотечные системы; каналы телерадиовещания; службы рассылки новостей и др. Многие ведущие производители программного обеспечения предлагают свои продукты и решения в области автоматического реферирования текстов на естественном языке.

Одним из первых коммерческих и наиболее используемых в настоящее время приложений систем автоматического реферирования являет-

ся аннотирование результатов информационного поиска. Так, модуль автоматического реферирования документов входит в состав каждой крупной ИПС (*Google*, *Yandex*, *Rambler*, *Yahoo*).

Существующие системы автоматического реферирования общего назначения, как правило, имеют развитый графический интерфейс, богатые возможности визуализации и манипулирования с данными, предоставляют доступ к различным источникам данных. К наиболее известным системам автоматического реферирования документов в России можно отнести:

• **Intelligent Miner for Text** (IBM) – объединяет мощную совокупность инструментов, базирующихся в основном на механизмах поиска информации, одним из которых является Annotation Tool – утилита составления рефератов-аннотаций к исходным текстам.

• **TextAnalyst** («Мегапьютер Интеллидженс») решает задачи глубокого анализа текста, такие, как создание семантической сети большого текста, подготовка реферата текста, поиск по тексту, автоматическая классификация и кластеризация текстов.

• **Oracle Text RCO** – программный комплекс, интегрированный в СУБД, позволяющий эффективно работать с запросами, относящимися к неструктурированным текстам. Возможности обработки текстовой информации на русском языке в Oracle Text достаточно ограничены. Для решения этой проблемы компанией ООО «Гарант-Парк-Интернет» (в настоящее время ООО «ЭР СИ О») был разработан модуль Russian Context Optimizer (RCO), предназначенный для совместного использования с Oracle Text. RCO дополняет Oracle Text лингвистическим обеспечением, необходимым для полноценной поддержки русского языка. В частности, RCO позволяет осуществлять поиск с учетом словоформ русского языка, повышая полноту и точность выдаваемых результатов, выделять значимые темы документов, строить рефераты, классифицировать документы по рубрикам, на лету группировать списки документов в иерархии, наглядно представляя результаты поиска.

• **MS Office AutoSummarise** − встроенная в офисный пакет функция автоматического получения краткого реферата, основанная на комбинации нескольких статистических методов. Основным недостатком этой системы является низкое качество получаемого реферата.

• **Inxight Summarizer** – одна из наиболее известных коммерчески распространяемых систем реферирования документов на основе запроса пользователя. В системе реализовано параллельное использование нескольких широко известных алгоритмов реферирования, а также непосредственная связь между алгоритмами реферирования и алгоритмом оценки качества реферата.

• **Summarist** является попыткой разработать технологию, основанную на использовании двух подходов – экстракции и абстракции. В данной системе предпринимается попытка найти компромисс между глубиной анализа текста и возможностью промышленной реализации. Система производит аннотации на пяти языках, ведется работа по расширению этой системы для создания большой базы знаний для использования технологии абстракции.

• **Prosum** представляет собой cgi-скрипт, встроенный в веб-страницу. Построение каждого реферата стоит определенную фиксированную сумму и оплачивается с помощью кредитных карточек MicroCredit.

• **Copernic summarizer** использует сложные статистические алгоритмы для выделения наиболее значимых предложений. Может анализировать текст любой длины и любой тематики на любом из четырех языков и создавать краткую выжимку в зависимости от желаний пользователя. Для получения аннотации могут быть использованы текстовые документы, веб-страницы, PDF-файлы, электронные письма.

• **Extractor** (Институт Информационных Технологий Национального исследовательского Совета Канады) представляет собой модуль, выделяющий из представленного ему на вход текста наиболее информативные именные группы. Extractor используется в программных продуктах фирм ThinkTank Technologies и Tetranet, а также в поисковой системе журнала исследований в области искусственного интеллекта.

• **ОРФО** (разработчик − компания «Информатик») − включает функцию автоматического аннотирования русских текстов.

• **Либретто** (разработчик − компания «МедиаЛингва») − обеспечивает автоматическое реферирование и аннотирование русских и английских текстов (система встраивается в Microsoft Word).

• **Пакет «МедиаЛингва Аннотатор SDK 1.0»** − служит инструментарием для реализации

функций автоматического реферирования и аннотирования в прикладных ИАС;

• **Поисковая система «Следопыт»** − включает средства автоматического реферирования и аннотирования документов;

• **Поисковая машина «Золотой Ключик»** (компания Textar) − обеспечивает составление рефератов и аннотаций.

К наиболее известным коммерческим системам, в которых реализовано автоматическое сводное реферирования относятся:

• **Columbia NewsBlaster** (http://www.newsblaster.com/) − система для автоматической обработки ежедневных новостей без привлечения редакторов. Система анализирует ряд новостных сайтов, скачивает статьи, группирует их в кластеры по тематике и реферирует каждый кластер. Результатом такой работы является веб-страница, которая содержит информацию о наиболее важных событиях дня. Данная система разрабатывалась в рамках проекта Колумбийского университета на тему «Обработка текста на естественном языке».

• **Ultimate Research Assistant** (http://ultimate-research-assistant.com) – система-помощник, предлагающая пользователю возможности по сводному реферированию и структуризации результатов интернет-поиска. Система использует большое количество различных алгоритмов «понимания» текста на естественном языке и включает в себя инструменты по извлечению сущностей (концептов, понятий), автоматического реферирования, кластеризации и категоризации концептов, включая автоматическое построение таксономии, карты связей понятий, облаков тегов; а также набор инструментов для визуализации полученных результатов. Система позволяет пользователю задать поисковый запрос, а затем производит поиск релевантных документов и формирует графический отчет.

• **iResearch Reporter** (http://iresearch-reporter.com/) – коммерческая поисковая система, поддерживающая автоматическое сводное реферирование. Демо-версия продукта позволяет ввести пользовательский запрос, затем он передается ИПС «Google». Система производит категоризацию и реферирование множества релевантных поисковому запросу документов, выданных ИПС, производит расчет цитируемости данных документов, производит лексический и грамматический анализ, выявляет основные понятия и предлагает пользователю отчет.

• **NewsInEssence** (http://lada.si.umich.edu:8080/clair/nie1/nie.cgi) – может использоваться для поиска и сводного реферирования кластеров статей. В системе также реализована ежедневная кластеризация и построение аннотаций для новостных сюжетов.

• **NewsFeed Researcher** (http://newsfeedresearcher.com/) – новостной портал, реализующий непрерывное автоматическое реферирование новостных сюжетов, предварительно кластеризованных новостными агрегаторами, например, Google News. Портал охватывает основные новости по направлениям «Бизнес», «Технологии», «США» и «Международные новости». Пользователю также доступно создание сводных аннотаций «по запросу» по любой выбранной теме.

• **Shablast** (http://shablast.com/) – универсальная поисковая система, предоставляющая функции сводного реферирования первых результатов, выдаваемых поисковой системой Microsoft Bing по набору ключевых слов.

• **Новостные агрегаторы**, поддерживающие автоматическую (автоматизированную) кластеризацию и сводное реферирование новостных потоков, например, «Google News» (http://news.google.com/). Автоматическое сводное реферирование русскоязычных текстов реализовано в русскоязычных новостных агрегаторах, таких, как «Яндекс. Новости», «Рамблер. Новости», «Новотека», а также в информационно-аналитической системе «InfoStream», разработанной в Информационном центре «ЭЛВИСТИ».

Обзор существующих систем автоматического сводного реферирования показал, что в настоящее время до уровня промышленной реализации доведено всего лишь несколько программных продуктов на основе различных комбинаций методов экстракции (в основном, на базе поверхностного подхода). Несмотря на многочисленные попытки решить проблему связности текста итогового реферата для методов экстракции это остается серьезным ограничением. Методы абстракции изначально лишены данного недостатка, однако в настоящее время находятся в рамках научно-исследовательских работ в силу ограниченной поддержки со стороны методов искусственного интеллекта, а также отсутствия необходимых лингвистических ресурсов (словарей, грамматик, тезаурусов) и соответствующих баз знаний должного объема. Практически все из существующих

программных продуктов автоматического реферирования являются коммерческими разработками, отсутствует какая-либо подробная информация об алгоритмах и методах, используемых авторами, все продукты ориентированы на лексические особенности какого-то конкретного языка, решение узкоспециализированной задачи реферирования, например, сжатия новостного кластера; ряд продуктов отличает относительно низкое качество получаемых рефератов и аннотаций. Растущая потребность информационно-аналитического направления в более совершенных системах сводного реферирования определяет необходимость развития новых подходов к решению этой задачи с применением более эффективных методов и алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Toffler, A.** Third Wave [Текст]/A. Toffler//Bantam Books.–N.Y.–1991.–544 с.

2. **Михайлов, А.И.** Основы научной информации [Текст]/А.И. Михайлов, А.И. Черный, Р.С. Гиляревский. –М.: Наука, 1965.–655 с.

3. **Леонов, В.П.** О методах автоматического реферирования (США 1958−1974 гг.) [Текст]/В.П. Леонов//Научно-техническая информация.−Сер.2.–1975. –№6.–С. 16−20.

4. **Пащенко, Н.А.** Проблемы автоматизации индексирования и реферирования [Текст]/Н.А. Пащенко, Л.В. Кнорина, Т.В. Молчанова [и др.]//Итоги науки и техники. −Сер. Информатика. –М.: ВИНИТИ, 1983. –Т.7. –С. 7−164.

5. **Севбо, И.П.** Структура связного текста и автоматизация реферирования: Монография [Текст]/ И.П. Севбо.–М.: Наука, 1969.–135 с.

6. **Hutchins, J.** Summarization: Some Problems and Methods [Текст]/J. Hutchins; K.P. Jones, ed. //Proc. Informatics 9: Meaning The Frontier of Informatics. −Aslib, London, 1987.–С. 151−173.

7. **van Dijk, T.A.** Semantic Macro-Structures and Knowledge Frames in Discourse Comprehension [Текст]/ T.A. van Dijk; M.A. Just, P.A. Carpenter, eds.//Cognitive Processes in Comprehension. –Lawrence Erlbaum, Hillsdale, N.J., 1977.–С. 3−32.

8. **Hahn, U.** Knowledge-Based Text Summarization: Salience and Generalization Operators for Knowledge-Based Abstraction [Текст]/U. Hahn, U. Reimer; I. Mani, M. Maybury, eds.//Advances in Automatic Text Summarization. −MIT Press, Cambridge, Mass., 1999.–С. 215−232.

9. **Хан, У.** Системы автоматического реферирования [Текст]/У. Хан, И. Мани//Открытые системы. 2000. –№ 12 (http://www.osp.ru/os/2000/12/067.htm).

10. **Luhn, H.P.** The automatic creation of literature abstracts [Текст]/H.P. Luhn // IBM Journal of Research and Development.–1958.−Вып. 2.–С. 159−165.

11. **Edmundson, H.P.** New Methods in Automatic Extracting [Текст]/H.P. Edmundson//Journal of the Association for Computing Machinery. −Apr. 1969. № 16(2), –С. 264–285.

12. **Pollock, J.J.** Automatic abstracting research at Chemical Abstracts Service [Текст]/J.J. Pollock, A. Zamora // Journal of Chemical Information and Computer Sciences.−1975. (15). –С. 226–233.

13. **Rush, J.E.** Automatic Abstracting and Indexing [Текст]/J.E. Rush, R. Salvador, A. Zamora//Production of Indicative Abstracts by Application of Contextual Inference and Syntactic Coherence Criteria. Journal of the American Society for Information Science.−July-Aug. 1971. –С. 260–274.

14. **Brandow, R.** Automatic Condensation of Electronic Publications by Sentence Selection [Текст]/R. Brandow, K. Mitze, L.F. Rau.//Information Processing & Management. −1995. –№ 31(5).–С. 675–685.

15. **Белоногов, Г.Г.** Компьютерная лингвистика и перспективные информационные технологии: Монография [Текст]/Г.Г. Белоногов, Ю.П. Калинин, А.А. Хорошилов.–М.: Русский мир, 2004.–246 с.

16. **Абрамова, Н.Н.** Автоматическое составление обзорных рефератов новостных сюжетов [Текст]/ Н.Н. Абрамова, В.Е. Абрамов//Интернет-математика. Сб. работ участников конкурса науч. проектов по информ. поиску.−Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007.−С. 1–11.

17. **Пиотровский, Р.Г.** Текст, машина, человек: Монография [Текст]/Р.Г. Пиотровский. −Л.: Наука, 1975.–327 с.

18. **Лахути, Д.Г.** Формализованное реферирование с использованием словесных клише (маркеров) [Текст]/Д.Г. Лахути, Д.И. Блюменау, Н.И. Гендина// НТИ. –1981.−Сер. 2.–№2.–С. 16–20.

19. **Fung, P.** Combining Optimal Clustering and Hidden Markov Models for Extractive Summarization [Текст]/P. Fung, G. Ngai, C. Cheung//Proc. of the ACL 2003 Workshop on Multilingual Summarization and Question Answering, 2003.–С. 21−28.

20. **Губин, М.В.** Эффективный алгоритм формирования контекстно-зависимых аннотаций [Текст]/ М.В. Губин, А.И. Меркулов//Тр. Междунар. конф. Диалог 2005.–М.: Наука, 2005.–С. 116–120.

21. **O'Neil, E.J.** An Optimality Proof of the LRU-K Page Replacement Algorithm [Текст]/E.J. O'Neil, P.E. O'Neil, G. Weikum//Journal of the ACM.−Jan. 1999. –Vol. 46.−№ 1.–С. 92–112.

22. **Гусев, В.Д.** Тематический анализ и квазиреферирование текста с использованием сканирующих статистик [Текст]/В.Д. Гусев, Л.А. Мирошниченко, Н.В. Саломатина//Тр. Междунар. конф. Диалог 2005: Компьютерная лингвистика и интеллектуальные тех-

нологии, Звенигород, 1-7 июня 2005.−М.: Наука, 2005. –С. 121–125.

23. **Yang, Ch. C** Fractal Summarization for Mobile Devices to Access Large Documents on the Web [Текст]/ Ch. C. Yang, F.L. Wang//In Proc. of the WWW2003, Budapest, Hungary, 2003.–С. 134−139.

24. **Endres-Niggemeyer, B.** How to Implement a Naturalistic Model of Abstracting: Four Core Working Steps of an Expert Abstractor [Текст]/B. Endres-Niggemeyer, E. Maier, A. Sigel//Information Processing & Management.−1995. № 31(5).–С. 631–674.

25. **Glaser, B.G.** The discovery of grounded theory; strategies for qualitative research [Текст]/B.G. Glaser, A.L. Strauss//Aldine de Gruyter.–N. Y., 1967.–271 с.

26. **Kupiec, T.** A trainable document summarizer. [Текст]/T. Kupiec, J. Pedersen, F. Chen//In Proc. of the 18th ACM/SIGIR Annual Conf. on Research and Development in Information Retrieval. –Seattle, WA, 1995.–С. 68−73.

27. **Jang, D.** Development of a document summarization system for effective information services [Текст]/D. Jang, S.H. Myaeng//In RIAO-97 Computer-Assisted Information Searching on Internet, 25th-27th June 1997.–С. 101–111.

28. **Hirao, T.** Extracting Important Sentences with Support Vector Machines [Текст]/T. Hirao, H. Isozaki, E. Maeda [et al.]//In Proc. of the 19 International Conf. on Computational Linguistics.−2002. –Vol. 1.–С. 1–7.

29. Aone, C. A Scalable Summarization System using Robust NLP [Текст]/C. Aone, M.E. Okurowski, J. Gorlinsky [et al.]; I Mani, M. Maybury, eds.//Proc. of the ACL/EACL'97Workshop on Intelligent Scalable Text Summarization. –Madrid, Spain, 11 July 1997.–С. 66–73.

30. **Hovy, E.** Automated Text Summarization in SUMMARIST [Текст]/E. Hovy, C-Y. Lin; I. Mani, M.T. Maybury, eds.//Advances in Automatic Text Summarization.−The MIT Press, 1999.–С. 81–94.

31. **Браславский, П.И.** Система автоматического реферирования новостных сообщений на основе машинного обучения [Текст]/П.И. Браславский, В. Густелев//Тр. IX Всерос. науч. конф. RCDL 2007.–Переславль-Залесский: Изд-во ун-та, 2007.–С. 142–147.

32. **Гальперин, И.Р.** Текст как объект лингвистического исследования [Текст]/И.Р. Гальперин.−М.: Наука, 1981.–140 с.

33. **Тураева, З.Я.** Лингвистика текста [Текст]/ З.Я. Тураева.−М.: Просвещение, 1986.–128 с.

34. **Хэллидей, М.А.К.** Когезия в английском языке [Текст]/М.А.К. Хэллидей, Р. Хасан//Исследования по теории текста: реферативный сб.–М., 1979. –С. 108−115.

35. **Boguraev, B.** Salience-based Content Characterization of Text Documents [Текст]/B. Boguraev, C. Kennedy; I. Mani, M. Maybury eds.//Proc. of the ACL/ EACL, 1997.–С. 2–9.

36. **Hearst, M.** TextTiling: Segmenting Text into Multi-Paragraph Subtopic Passages [Текст]/M. Hearst// Computational Linguistics.− 1997. № 23(1).–С. 33−64.

37. **Barzilay, R.** Using lexical chains for text summarization [Текст]/R. Barzilay, N. Elhadad//In Proc. of the ACL/EACL-97 Workshop on Intelligent Scalable Text Summarization.–Madrid, Spain, 1997.–С. 10-17.

38. **Brunn, M.** Text summarization using lexical chains [Текст]/M. Brunn, Y. Chali, C. J. Pinchak//In Proc. of DUC2001 Conf. –New Orleans, Louisiana, USA, 2001.–С. 135–140.

39. **Silber, H.** Efficient text summarization using lexical chains [Текст]/H. Silber, G.F. McCoy, K.F. Kathleen//In 2000 International Conf. on Intelligent User Interfaces.−New Orleans, USA, Jan. 2000. –С. 487−496.

40. **Kolla, M.** Automatic text summarization using lexical chains: algorithms and experiments [Текст]/M. Kolla, B. Tech.–Jawaharlal Nehru Technological University, 2002.–80 с.

41. **Morris, J.** Lexical cohesion computed by thesaural relations as an indicator of the structure of a text [Текст]/J. Morris, G. Hirst//Computational Linguistics.−1991. № 17(1). –С. 21−48.

42. **Лукашевич, Н.В.** Обработка потока новостей на основе больших лингвистических ресурсов [Текст]/Н.В. Лукашевич, Б.В. Добров, С.В. Штернов// Интернет-математика 2005. Автоматическая обработка веб-данных.−М.: 2005.–С. 461−484.

43. **Лукашевич, Н.В.** Автоматическое аннотирование новостного кластера на основе тематического представления [Текст]/Н.В. Лукашевич, Б.В. Добров// Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии по матер. ежегодной Междунар. конф. Диалог 2009. –М.: Наука, 2009.–Вып. 8(15).−С. 299−305.

44. **Marcu, D.** Discourse trees are good indicators of importance in text [Текст]/D. Marcu//Advances in automatic text summarization.–Cambridge, The MIT Press, 1999.–С. 123–136.

45. **Strzalkowski, T.** A robust practical text summarizer [Текст]/T. Strzalkowski, G. C. Stein, J. Wang [et al.]//In Advances in Automatic Text Summarization, COLING-ACL, 1999.–С. 137–154.

46. **Teufel, S.** Argumentative classification of extracted sentences as a first step towards flexible abstracting [Текст]/S. Teufel, M. Moens; Mani, M. Maybury eds.// Advances in automatic text summarization. –The MIT, 1999.–С. 155−171.

47. **Teufel, S.** Sentence Extraction and rhetorical classification for flexible abstracts [Текст]/S. Teufel, M. Moens//AAAI Spring Symp. on Intelligent Text summarization, 1998.–С. 89−97.

48. **Lehnert, W.G.** Plot Units and Narrative Summarization [Текст]/W. G. Lehnert//Cognitive Science. 1981.−Vol. 4.–С. 293–331.

49. **McKeown, K.R.** Generating concise natural language summaries [Текст]/K.R. McKeown, J. Robin, K. Kukich//Information Proc. & Management.−1995.

−№ 31(5), –С. 702–733.

50. **Maybury, M.T.** Generating summaries from event data [Текст]/M.T. Maybury//Information Proc. & Management.−1995.−31(5),–С. 735–751.

51. **Salton, G.** Automatic Text Structuring and Summarization [Текст]/G. Salton, A. Singhal, M. Mitra [et al.]//Information Proc. &Management.−1997. −№ 33(2),–С. 193–207.

52. **Mani, I.** Summarizing similarities and differences among related documents [Текст]/I. Mani, E. Bloedorn// Information Retrieval.−1999.−№ 1(1).–С. 35–67.

53. **Carbonell, J.** The use of MMR, diversity based reranking for reordering documents and producing summaries [Текст]/J.G. Carbonell, J. Goldstein//In Research and Development in Information Retrieval.−1998. –С. 335–336.

54. **Radev, D.R.** Centroid-based summarization of multiple documents: sentence extraction, utility-based evaluation, and user studies [Текст]/D.R. Radev, H. Jing, M. Budzikowska//In ANLP/NAACL Workshop on Summarization.−Seattle, WA, Apr. 2000.–С. 21–29.

55. **Nomoto, T.** The diversity-based approach to open-domain text summarization [Текст]/T. Nomoto, Y. Matsumoto//In Information Proc. & Management.−2003. −№ 39. –С. 363–389.

56. **Barzilay, R.** Inferring strategies for sentence ordering in multidocument news summarization [Текст]/R. Barzilay, T. Elhadad, K.R. McKeown// Journal of Artificial Intelligence Research.−2002. −№ 17. –С. 35–55.

57. **Evans, D.K.** Columbia Newsblaster: Multilingual News Summarization on the Web [Текст]/D.K. Evans, J.L. Klavans, K.R. McKeown//In Proc. of NAACL/ HLT.−2004.–С. 1–4.

58. **Allan, J.** Introduction to topic detection and tracking [Текст]/J. Allan //Event-based Information Organization.−Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.–С. 1–16.

59. **Braun, R.K.** Exploiting Topic Pragmatics For New Event Detection In TDT-2004 [Текст]/R.K. Braun, R. Kaneshiro//DARPA Topic Detection and Tracking Workshop.−Gaithersburg, 2004.–С. 189–192.

60. **Connel, M.** Umass at TDT2004 [Текст]/M. Connel, A. Feng, G. Kumaran [et al.]//Proc. DARPA Topic Detection and Tracking Workshop Report.−Gaithersburg, Dec. 2004.

УДК 517

А.Н. Фирсов

МЕТОД МОМЕНТОВ В ТЕОРИИ ОБОБЩЕННЫХ ФУНКЦИЙ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Хорошо известны принципы применения преобразований Фурье и Лапласа в прикладных задачах. Особенно популярно использование их свойства, позволяющего переходить от соотношений, содержащих линейные дифференциальные операторы, к чисто алгебраическим (полиномиальным) соотношениям. Проблема, однако, остается: далеко не всегда тривиальной (если вообще *аналитически* возможной) оказывается задача обращения этих преобразований на заключительном этапе исследования. Кроме того, *изображения* сами по себе мало информативны с точки зрения оценки свойств соответствующих *оригиналов*. Наконец, операторы типа $x\frac{d}{dx}$ переходят при упомянутых преобразованиях сами в себя, что делает в таких случаях неэффективным использование этих преобразований.

В предлагаемом исследовании строится метод, позволяющий трансформировать задачи, содержащие линейные дифференциальные операторы (вообще говоря, с переменными коэффициентами), к линейным алгебраическим задачам рекуррентного типа, лишенным указанных выше недостатков. Кроме того, величины, входящие в преобразованные соотношения, сами по себе оказываются имеющими содержательный смысл, что во многих случаях не требует обратного перехода к оригиналам.

Линейные функционалы (обобщенные функции) в пространствах целых функций изучались главным образом в связи с преобразованием Фурье. В книгах [1, 2] подробно исследованы свойства и структура линейных функционалов в пространстве Z целых функций экспоненциального

типа, убывающих при $Rez \to \infty$ быстрее любой степени $|z|$ [1, гл. 2] и [2, гл. 3], и в пространстве H всех целых функций [2, с. 189–191]. Имеется, однако, ряд задач математической физики, которые не попадают в «сферу влияния» упомянутых пространств обобщенных функций[1]. Например, задачи теории вероятностей и статистической физики, в которых естественным требованием является существование (степенных) моментов функции (плотности) распределения. В связи с этим, пространство Z' не подходит, поскольку полиномы от вещественных переменных основному пространству Z не принадлежат (и, следовательно, бессмысленно говорить о моментах функций из Z'). Что же касается пространства H', то оно имеет слишком малый для таких задач запас регулярных функционалов: «обычная» функция принадлежит H' только в случае, если она очень быстро убывает (быстрее $exp(-|z|^n)$ для всех n).

В данной работе исследуется пространство обобщенных функций E', для которого порождающее пространство основных функций E является, по существу, сужением на R^ν пространства целых функций многих комплексных переменных порядка роста ≤ 1 (и, в частности, неограниченных при $|x| \to \infty$)[2]. Оказывается, что обобщенные функции из E' допускают представление (его можно назвать «моментным»), которое естественным образом связано с основными операциями в E', и которое дает удобный *метод* решения некоторых классов задач математической физики.

Ниже изложение строится для случая функций многих вещественных переменных. Переформулировка основных результатов на случай функций многих комплексных переменных не представляет особого труда, но для наших целей не требуется. Кроме того, в виду ограниченности объема статьи, в ней, практически, отсутствуют приложения к конкретным задачам. Им будет посвящена отдельная работа.

Мы будем, в основном, придерживаться терминологии книги [2]. В настоящей статье приняты следующие обозначения.

$x=(x_1, x_2, ..., x_\nu)\in R^\nu (\nu=1,2,...)$; $|x|=|x_1|+|x_2|+...+|x_\nu|$;

$q=(q_1, q_2, ..., q_\nu)$, $q_j=0,1,2,...$;

$|q|=q_1+q_2+...+q_\nu$; $q!=q_1!q_2!...q_\nu!$

$x^q=x_1^{q_1}\cdot x_2^{q_2}\cdot ...\cdot x_\nu^{q_\nu}$; $D^q\varphi(x)=\dfrac{\partial^{|q|}\varphi(x)}{\partial x_1^{q_1}\partial x_2^{q_2}...\partial x_\nu^{q_\nu}}=\varphi^{(q)}(x)$;

$\begin{pmatrix} q \\ p \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} q_1 \\ p_1 \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} q_2 \\ p_2 \end{pmatrix}\cdot ...\cdot\begin{pmatrix} q_\nu \\ p_\nu \end{pmatrix}$; $0\leq p_j\leq q_j$, $j=1,2,...,\nu$;

$\begin{pmatrix} q_j \\ p_j \end{pmatrix}=\dfrac{q_j!}{q_j!\cdot(q_j-p_j)!}=C_{q_j}^{p_j}$ (биномиальные коэффициенты).

1. Основные пространства E_s и E

Определение 1.1. Пусть $s>0$. Через E_s будем обозначать пространство (комплекснозначных) функций $\varphi\in C^\infty(R^\nu)$ таких, что для любого $\rho>0$

$$\left|D^q\varphi(x)\right|\leq C(s+\rho)^{|q|}e^{(s+\rho)|x|},\quad x\in R^\nu. \qquad (1.1)$$

Здесь C – постоянная, зависящая, вообще говоря, от φ, s и ρ, но не зависящая от q.

Отметим сразу, что полиномы $P(x_1, x_1, ..., x_n)$ и функции $\exp(s_1x_1 + ... + s_\nu x_\nu)$, $\exp[i(s_1x_1 + ... + s_\nu x_\nu)]$ принадлежат E_s (последние – для $s\geq\max(|s_1|, ..., |s_\nu|)$. Это замечание будет дальше неоднократно использоваться.

Введем в E_s счетную систему норм

$$q_1>k_1\,\|\varphi\|_s^{(\rho)}=\sup_{q,x}\left[\frac{\left|D^q\varphi(x)\right|}{(s+\rho)^{|q|}}e^{-(s+\rho)|x|}\right], \qquad (1.2)$$

$$\rho=1,\frac{1}{2},\frac{1}{3},...$$

Теорема 1.1. Пространство E_s, наделенное системой норм (1.2), является полным счетно-нормированным пространством.

Доказательство этой теоремы полностью аналогично доказательству подобного результата для пространств типа S [2, с. 215–217].

Поскольку $E_{s+1}\supset E_s$ и из сходимости последовательности $\{\varphi_n\}$ в E_s следует ее сходимость в E_{s+1}, можно ввести счетное объединение $E=\bigcup_{s=1}^{\infty}E_s$; сходимость в E определяется обычным образом [2, гл. 1, §8]. Пространство E, очевидно, полно в смысле соответствующей сходимости. Следующее свойство пространств E_s является основным для дальнейшего.

Теорема 1.2. Пусть $\varphi\in E_s$, $a=(a_1, a_1, ..., a_\nu)\in\mathbf{R}^\nu$. Тогда:

1) ряд Тейлора для φ

[1] Последующие замечания относятся и к другим пространствам обобщенных функций: K', S', W' (обозначения из [2]).

[2] Отметим, что основные пространства подобного типа изучались в [3] в связи с преобразованием Фурье (см. также [4, с. 500–505]).

$$\varphi(x)=\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{|q|=l}\frac{\varphi^{(q)}(a)}{q!}(x-a)^q$$

сходится для всех $x\in R^v$;

2) частичные суммы

$$S_m(x)=\sum_{l=0}^{\infty}\sum_{|q|=l}\frac{\varphi^{(q)}(a)}{q!}(x-a)^q$$

сходится к φ в смысле сходимости в E_s.

Доказательство. Первое утверждение теоремы очевидно следует из (1.1). Докажем второе. Через C_j будем обозначать постоянные, зависящие, вообще говоря, от φ, s, ρ, но не зависящие от q. Отметим, прежде всего, что для любого $m = 1, 2, \ldots$ $S_m\in E_s$ и, следовательно, $\lambda_m(x) = \varphi - S_m\in E_s$. Имеем $\lambda_m(x)=\sum_{l=m}^{\infty}\sum_{|q|=l}\frac{\varphi^{(q)}(a)}{q!}(x-a)^q$.

Если $k = (k_1, k_2, \ldots, k_v)$, k = 0, 1, 2, ..., то $D^k\lambda_m(x)=\sum_{|q|=m}^{\infty}\frac{\varphi^{(q)}(a)}{(q-k)!}(x-a)^{q-k}$,

причем в последней сумме надо суммировать лишь по тем q с $|q| = l$, для которых $q > k$ (т. е. $q_1 > k_1, \ldots, q_v > k_v$), т. к. все остальные слагаемые будут равны нулю. Зафиксируем $\rho > 0$ и оценим

$$\|\lambda_m\|_s^{(\rho)}=\sup_{k,x}\left[\frac{\left|\lambda_m^{(k)}(x)\right|}{(s+\rho)^{|k|}}e^{-(s+\rho)|x|}\right]\le$$

$$\le\sum_{|q|=m}^{\infty}\sup_{\substack{k,x\\k\le q}}\frac{\left|\varphi^{(q)}(a)\right|\left|(x-a)^{q-k}\right|e^{-(s+\rho)|x|}}{(q-k)!(s+\rho)^{|k|}}\le$$

$$\le C_1\sum_{|q|=m}^{\infty}\sup_{k\le q}\frac{\left|\varphi^{(q)}(a)\right|\left|(q-k)^{q-k}\right|e^{-|q-k|}}{(q-k)!(s+\rho)^{|k|}(s+\rho)^{|q-k|}},$$

что следует из несложной оценки

$$\sup_x\left|(x-a)^q\right|e^{-(s+\rho)|x|}\le C_1e^{-|q|}\frac{q^q}{(s+\rho)^{|q|}}.$$

Положим $q - k = n = (n_1, \ldots, n_v)$. Так как должно быть $k \le q$, то $0 \le n \le q$. Очевидно, $|k| = |q - n| = |q| - |n|$. Оценим отдельно величину

$$A\equiv\sup_{k\le q}\frac{\left|\varphi^{(q)}(a)\right|e^{-|q-k|}\left|(q-k)^{q-k}\right|}{(q-k)!(s+\rho)^{|k|}(s+\rho)^{|q-k|}}=$$

$$=\frac{1}{(s+\rho)^{|q|}}\sup_{0\le n\le q}\frac{\left|\varphi^{(q)}(a)\right|e^{-|n|}n^n}{n!}\le$$

$$\le C_2\left(\frac{s+\rho_1}{s+\rho}\right)^{|q|}\sup_{0\le n\le q}\frac{e^{-|n|}n^n}{n!},$$

где использовано неравенство (1.1) для $\rho = \rho_1$. Так как по формуле Стирлинга $n!\ge n^n\exp\left(-|n|\right)$, то для A окончательно получаем $A \le C_2\gamma^{|q|}$, где положено $\gamma = (s + \rho_1)/ (s + \rho)$. Если взять $\rho_1 < \rho$, то будет $0 < \gamma < 1$. Вернемся к оценке для $\|\lambda_m\|_s^{(\rho)}$. Так как число слагаемых в сумме $\sum_{|q|=l}$ равно $\binom{\nu+l+1}{l}\le 2^{\nu-1}l^{\nu-1}/(\nu-1)!$, то из предыдущих оценок получаем окончательно $\|\lambda_m\|_s^{(\rho)}\le C_3\sum_{l=m}^{\infty}l^{\nu-1}\gamma^l\to 0$ $m\to\infty$ (ибо $0 < \gamma < 1$). Теорема доказана.

Замечание. Мы, в частности, показали, что ряд Тейлора для $\varphi\in E_s$ сходится нормально в каждой из норм $\|.\|_s^{(\rho)}$, $\rho=1,\frac{1}{2},\ldots$.

Следующие леммы указывают на ряд других свойств пространства E.

Лемма 1.1. Если φ, $\psi\in E$, то и произведение $\varphi\psi\in E$.

Доказательство. Пусть $\varphi\in E_{s_1}$, $\psi\in E_{s_2}$.Зафиксируем $\rho > 0$ и рассмотрим

$$\left|(\varphi\psi)^{(q)}\right|\le\sum_{n\le q}\binom{q}{n}\left|\varphi^{(q-n)}\psi^{(n)}\right|\le$$

$$\le\sum_{n\le q}\binom{q}{n}C_{\varphi,\psi}\left(s_1+\frac{1}{3}\rho\right)^{|q-n|}\left(s_2+\frac{1}{3}\rho\right)^{|n|}e^{\left(s_1+s_2+\frac{2}{3}\rho\right)|x|}.$$

Здесь $n = (n_1, n_2, \ldots, n_v)$. Полагая $s_3 = \max(s_1, s_2)$, будем иметь

$$\left(s_1+\frac{1}{3}\rho\right)^{|q-n|}\left(s_2+\frac{1}{3}\rho\right)^{|n|}\le\left(s_3+\frac{1}{3}\rho\right)^{|q|}.$$

Далее, $\binom{q}{n}\le 2^{|q|}$, а число слагаемых в сумме $\sum_{n\le q}$ не больше, чем $2^{\nu-1}|q|^{\nu}/(\nu-1)!$ Поэтому, $\left|(\varphi\psi)^{(q)}\right|\le C_{\varphi,\psi}(s+\rho)^{|q|}e^{(s+\rho)|x|}$, где можно положить, например, $s = 3s_3$. Лемма доказана.

Лемма 1.2. Если $\varphi_n\to\varphi$, $\psi_n\to\psi$ в E, $\varphi_n\psi_n\to\varphi\psi$ в E.

Доказательство. Пусть φ_n, $\varphi\in E_{s_1}$; ψ_n, $\psi\in E_{s_2}$. По предыдущей лемме $\varphi_n\psi_n$, $\varphi\psi\in E_s$, $s = 3\max(s_1, s_2)$. Зафиксируем $\rho > 0$ и рассмотрим

$$\|\varphi_n\psi_n-\varphi\psi\|_s^{(\rho)}\le\|\varphi(\psi_n-\psi)\|_s^{(\rho)}+\|\psi_n(\varphi_n-\varphi)\|_s^{(\rho)}.\ (*)$$

Оценим

$$\|\psi_n(\varphi_n-\varphi)\|_s^{(\rho)}=\sup_{q,x}\frac{\left|\left(\psi_n(\varphi_n-\varphi)\right)^{(q)}\right|}{(s+\rho)^{|q|}}e^{-(s+\rho)|x|}\le$$

$$\le \sup_{q,x} \frac{e^{-(s+\rho)|x|}}{(s+\rho)^{|q|}} \sum_{m<q} \binom{q}{m} e^{(s_2+\rho_2)|x|} (s_2+\rho_2)^{|m|} \times$$

$$\times \|\psi_n\|_{s_2}^{(\rho_2)} (s_1+\rho_1)^{|q-m|} e^{(s_1+\rho_1)|x|} \|\varphi_n - \varphi\|_{s_1}^{(\rho_1)} \le$$

$$\le C \|\psi_n\|_{s_2}^{(\rho_2)} \|\varphi_n - \varphi\|_{s_1}^{(\rho_1)} \sup_q |q|^{\nu} 2^{|q|} \gamma^{|q|} \le$$

$$\le C' \|\psi_n\|_{s_2}^{(\rho_2)} \|\varphi_n - \varphi\|_{s_1}^{(\rho_1)},$$

где $\gamma = \max((s_1 + \rho_1)/(s + \rho), (s_2 + \rho_2)/(s + \rho)) = \frac{1}{3}$ для $\rho_1 = \rho_2 = \frac{1}{3}\rho$, $s = 3\max(s_1, s_2)$. Первое слагаемое в правой части (∗) оценивается аналогично. Лемма доказана.

Лемма 1.3. Если $\varphi \in E_s$, то $D^q\varphi \in E_s$.

Лемма 1.4. Если $\varphi_n \to \varphi$ в E_s, то и $D^q\varphi_n \to D^q\varphi$ в E_s.

2. Структура обобщенных функций из E'

Пространство E' вводится стандартным образом как сопряженное к E. В нем обычным образом определяются линейные операции, операция умножения на функции из E и дифференцирование. Эти операции, как следует из результатов §1, являются непрерывными в смысле сходимости в E' (т. е. в смысле слабой сходимости). По теореме о полноте пространства, сопряженного к полному счетно-нормированному [2, с. 67], пространство E' будет полным (относительно слабой сходимости). Отметим тут же, что запас регулярных функционалов в E' достаточно велик. Так, всякая суммируемая в R^ν функция $f(x)$, удовлетворяющая условию

$$f(x) = \underset{\alpha>0,\varepsilon>0}{O}\left(\exp\left(\alpha|x|^{1+\varepsilon}\right)\right), \quad |x| \to \infty, \quad (2.1)$$

порождает в E' функционал $\hat{f}$ по формуле

$$\left(\hat{f}, \varphi\right) = \int_{R^\nu} f(x)\varphi(x)dx, \quad \varphi \in E. \quad (2.2)$$

Имеет место

Лемма 2.1. Если $f \in L_1(R^\nu)$ и для всех $\varphi \in E \int_{R^\nu} f(x)\varphi(x)dx = 0$, то $f(x) = 0$ почти всюду.

Доказательство. Как отмечалось в §1, для всех $s_i \in (-\infty, +\infty)$ функции $\exp[i(s_1x_1 + ... + s_\nu x_\nu)] \in E$; поэтому $\int_{R^\nu} f(x)\exp[i(s_1x_1 + ... + s_\nu x_\nu)]dx = 0$ для всех $(s_1, ..., s_\nu) \in R^\nu$. Но тогда утверждение леммы следует из теоремы единственности для преобразования Фурье суммируемой функции. Лемма доказана.

Так что по терминологии книги [2], пространство E содержит достаточно много функций.

Отметим еще следующее. Если «обычная» функция $f(x)$ дифференцируема в «обычном» смысле и f и $f^{(q)}$ порождают регулярные функционалы $\hat{f}$ и $\widehat{f^{(q)}}$, то $\widehat{f^{(q)}} = \hat{f}^{(q)}$, где справа стоит производная функционала $\hat{f}$ в смысле дифференцирования в пространстве E'. Наконец, дельта-функция $\delta_a = \delta(x - a)$, определяемая обычным образом, т. е. $(\delta_a, \varphi) = \varphi(a)$, $\varphi \in E$, тоже принадлежит E' и является сингулярным функционалом. Следует, правда, отметить, что в E' теряют смысл слова «$\delta(x - a)$ сосредоточена в точке a», но этому не следует удивляться, поскольку в пространстве целых функций не имеет смысла понятие носителя функции.

Установим теперь основное свойство обобщенных функций из E' [2, с. 189–191].

Теорема 2.1. Пусть $a \in R^\nu$. Всякую обобщенную функцию $f \in E'$ можно единственным образом представить в виде

$$f = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{|q|=l} C_a^{(q)} \delta_a^{(q)}, \quad (2.3)$$

где

$$C_a^{(q)} = C_a^{(q)}(f) = (-1)^{|q|}\left(f, (x-a)^q\right)/q! \quad (2.4)$$

Доказательство. Пусть $\varphi \in E$. По теореме 1.2

$$\varphi(x) = \sum_{|q|=0}^{\infty} \frac{\varphi^{(q)}(a)}{q!}(x-a)^{|q|}, \quad (2.5)$$

где ряд сходится в смысле сходимости в E. Так как $f \in E'$, то

$$(f, \varphi) = \lim_{m\to\infty}\left(f, \sum_{|q|=0}^{m} \frac{\varphi^{(q)}(a)}{q!}(x-a)^{|q|}\right) =$$

$$= \lim_{m\to\infty} \sum_{|q|=0}^{m} \frac{\left(f, (x-a)^{|q|}\right)}{q!} \varphi^{(q)}(a) =$$

$$= \lim_{m\to\infty} \sum_{|q|=0}^{m} C_a^{(q)}\left(\delta_a^{(q)}, \varphi\right) = \lim_{m\to\infty}\left(\sum_{|q|=0}^{m} C_a^{(q)}\delta_a^{(q)}, \varphi\right),$$

что и требовалось. Предположим теперь, что f имеет другое разложение вида (2.3) с коэффициентами $d_a^{(q)}$. Тогда для всякого $\varphi \in E$

$$\sum_{|q|=0}^{\infty} (-1)^{|q|} C_a^{(q)} \varphi^{(q)}(a) = \sum_{|q|=0}^{\infty} (-1)^{|q|} d_a^{(q)} \varphi^{(q)}(a).$$

Полагая в этом равенстве последовательно $\varphi = (x_1 - a_1)^{q_1} ... (x_\nu - a_\nu)^{q_\nu}$, $q_i = 0, 1, 2, ...$, получим $C_a^{(q)} = d_a^{(q)}$. Теорема доказана.

Замечание. Укажем на одно важное свойство коэффициентов $C_a^{(q)}$. Выше отмечалось (см. заме-

чание к теореме 1.2), что ряд (2.5) сходится к φ по каждой из норм (1.2). С другой стороны, начиная с некоторого ρ, функционал $f \in E'$ будет ограничен в норме (1.2) и, следовательно,

$$\left|(f,\varphi)\right| \le C_f \left\|\varphi\right\|_s^{(\rho)}, \quad \varphi \in E_s.$$

Обозначая члены ряда (2.5) через ψ_q, будем иметь

$$\sum_{|q|=0}^{\infty}\left|(f,\psi_q)\right| \le C_f \sum_{|q|=0}^{\infty}\left\|\psi_q\right\|_s^{(\rho)} < \infty,$$

то есть $\sum_{|q|=0}^{\infty} C_a^{(q)}\varphi^{(q)}(a) < \infty \quad \forall \varphi \in E_s$.

Полагая здесь $\varphi = \exp[s(x_1 - a_1 + ... + x_v - a_v)]$, получим:

$$\sum_{|l|=0}^{\infty} s^l \sum_{|q|=l}\left|C_a^{(q)}\right| < \infty. \qquad (2.6)$$

Теорема 2.2. Для того чтобы $f \in E'$, необходимо и достаточно, чтобы ряд (2.6) сходился для всех $s > 0$.

Доказательство. Необходимость этого условия уже установлена. Докажем его достаточность. Пусть ряд (2.6) сходится для всех $s > 0$. Рассмотрим $f_n = \sum_{|q|=0}^{n} C_a^{(q)}\delta_a^{(q)}(a) \in E'$ и покажем, что последовательность $\{f_n\}$ фундаментальна в E', т. е. для любого $\varphi \in E$ $\left|(f_n - f_m, \varphi)\right| \to 0$ $(n, m \to \infty)$.

Действительно, если $\varphi \in E$, то для $s > s_0$ $\left|\varphi^{(q)}(a)\right| \le C_\varphi s^{(q)}$; отсюда $(n > m)$:

$$\left|(f_n - f_m, \varphi)\right| \le C_\varphi \sum_{|q|=m}^{n} s^{|q|}\left|C_a^{(q)}\right| \to 0 \ \ (n,m \to \infty)$$

в силу (2.6). Так как пространство E' полно (в смысле слабой сходимости), то f_n сходятся в E' к некоторому элементу $f \in E'$. Теорема доказана.

Замечание. Поскольку коэффициенты $(-1)^{|q|} q! C_a^{(q)}$ можно интерпретировать как степенные моменты функционала f, то теорема 2.2 дает решение проблемы степенных моментов в E'.

В заключение этого параграфа приведем несколько примеров.

1) Если $a, b \in R^\nu$, то

$$\delta_a = \sum_{l=0}^{\infty}(-1)^l \sum_{|q|=l}\frac{(a-b)^q}{q!}\delta_b^{(q)}$$

(ср. [1, с. 202, формула (5)]).

2) Пусть $\Omega = \left\{x \in R^\nu; -r < x_i < r\right\}$. Обозначим

$$1_\Omega(x) = \begin{cases} 1, & x \in \Omega \\ 0, & x \notin \Omega \end{cases}$$

Тогда

$$1_\Omega = \sum_{l=0}^{\infty}(-1)^l r^{l+\nu} \sum_{|q|=l}\frac{\prod_{i=1}^{\nu}\left(1+(-1)^{q_i}\right)}{\prod_{i=1}^{\nu}(q_i+1)!}\delta_0^{(q)}.$$

Если $\Omega = \{x^2 + y^2 < R^2; x > 0, y > 0\}$, то

$$1_\Omega = \sum_{l=0}^{\infty}(-1)^l \frac{R^{l+2}}{2(l+2)} \sum_{q_1+q_2=l}\frac{\Gamma\left(\frac{q_1+1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{q_1+1}{2}\right)}{q_1!q_2!\Gamma\left(\frac{q_1+q_2}{2}+1\right)}\delta_0^{(q_1,q_2)}$$

3) Если

$$h_a(x) = \begin{cases} 1, & 0 < x < a \\ 0, & x \notin (0,a) \end{cases},$$

то

$$h_a = \sum_{l=0}^{\infty}\frac{a^{l+1}}{(l+1)!}\delta_a^{(l)}.$$

3. Дальнейшие свойства пространства E'

В этом параграфе мы установим связь разложений (2.3) с основными операциями в E'.

Теорема 3.1. Пусть $f, g \in E'$; $C_a^{(q)}, d_a^{(q)}$ – коэффициенты разложений (2.3) f и g соответственно. Тогда:

1) $\alpha f + \beta g = \sum_{|q|=0}^{\infty}\left(\alpha C_a^{(q)} + \beta d_a^{(q)}\right)\delta_a^{(q)}$ $(\alpha, \beta \in \mathbb{C})$;

2) $D^k f = \sum_{|q|=0}^{\infty} C_a^{(q)}\delta_a^{(q+k)}$, $k = (k_1, ..., k_\nu)$;

3) Если $\psi \in E$, то $\psi f = \sum_{|q|=0}^{\infty} h_a^{(q)}\delta_a^{(q)}$,

где $$h_a^{(q)} = \sum_{r=0}^{\infty}(-1)^r \sum_{\substack{|n|=r+|q| \\ n \ge q}}\binom{n}{n-q}C_a^{(n)}\psi^{(n-q)}(a). \qquad (3.1)$$

В частности, если $\psi(x) = (x-a)^m$, то

$$h_a^{(q)} = (-1)^m \frac{(q+m)!}{q!}C_a^{(q+m)}. \qquad (3.2)$$

Доказательство. Первое утверждение очевидно. Для доказательства второго заметим, что если $\varphi \in E$, то и $\varphi^{(q)} \in E$ (лемма 1.3) и, следовательно, ряд Тейлора для $\varphi^{(q)}$

$$\varphi^{(q)}(x) = \sum_{|k|}^{\infty}\frac{\varphi^{(k+q)}(a)}{k!}(x-a)^k$$

сходится к $\varphi^{(q)}$ в E. Дальнейшее аналогично доказательству теоремы 2.1. Докажем третье утверждение. Так как $\varphi\psi \in E$ (лемма 1.1), то положим $(\psi f, \varphi) = (f, \psi\varphi)$. Лемма 1.2 показывает, что $\psi f \in E'$. Но тогда по теореме 2.1:

$$\psi f = \sum_{|q|=0}^{\infty} h_a^{(q)} \delta_a^{(q)},$$

и, следовательно,

$$(\psi f, \varphi) = \sum_{|q|=0}^{\infty} (-1)^{|q|} h_a^{(q)} \varphi^{(q)}(a).$$

С другой стороны,

$$(\psi f, \varphi) = (f, \psi\varphi) = \sum_{|q|=0}^{\infty} (-1)^{|q|} C_a^{(q)} (\psi\varphi)^{(q)}(a) =$$

$$= \sum_{|q|=0}^{\infty} (-1)^{|q|} C_a^{(q)} \sum_{m \le q} \binom{q}{m} \psi^{(m)}(a) \varphi^{(q-m)}(a).$$

Положим здесь $\varphi(x) = (x-a)^n$. Так как $\varphi^{(q)}(a) \ne 0$ лишь для $q = n$, то

$$n!(-1)^{|n|} h_a^{(n)} = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{\substack{|q|=l+|n| \\ n \le q}} C_a^{(q)} (-1)^{|q|} \binom{q}{q-n} n! \psi^{(q-n)}(a),$$

откуда и следует (3.1). Чтобы получить (3.2), достаточно заметить, что $\psi(x) = (x-a)^m \psi^{(q)}(a) \ne 0$ лишь для $q = m$. Теорема доказана.

Следствие. Обобщенная функция $f \in E'(R')$ имеет (единственную) первообразную $F \in E'$ тогда и только тогда, когда в разложении (2.3) $C_a^{(0)} = 0$. При этом, если $C_a^{(k)} = 0$, $k = 0, 1, ..., m-1$, а $C_a^{(m)} \ne 0$, то $F = \sum_{l=m}^{\infty} C_a^{(l)} \delta_a^{(l-1)}$.

Рассмотрим теперь случай, когда обобщенная функция $f \in E'$ зависит от некоторого (вообще говоря, комплексного) параметра λ. В этом случае

$$C_a^{(q)}(\lambda) = (-1)^{|q|} \frac{\left(f(\lambda), (x-a)^q\right)}{q!}.$$

Отсюда, если $f(\lambda)$ непрерывна в точке λ_0 (т. е. $\left(f(\lambda), \varphi\right) \underset{\lambda \to \lambda_0}{\to} \left(f(\lambda_0), \varphi\right)$ $\varphi \in E$), то $C_a^{(q)}(\lambda)$ непрерывны в точке λ_0 для всех q; если $f(\lambda)$ дифференцируема по λ в точке λ_0 (т. е. существует $\lim_{\lambda \to \lambda_0} \left(f(\lambda) - f(\lambda_0)/(\lambda - \lambda_0), \varphi\right)$ $\varphi \in E$), то и $C_a^{(q)}(\lambda)$ дифференцируемы в точке λ_0, причем

$$\frac{df(\lambda)}{d\lambda} = \sum_{|q|=0}^{\infty} \frac{d}{d\lambda} C_a^{(q)}(\lambda) \delta_a^{(q)}, \quad \lambda = \lambda_0. \qquad (3.3)$$

Обратный результат дает следующая

Теорема 3.2. Пусть для любого λ из некоторой окрестности $U(\lambda_0)$ точки λ_0 задана последовательность (комплексных) чисел $\{C^{(q)}(\lambda_0)\}_{|q|=0}^{\infty}$ такая, что для любого $s > 0$ и любого $\lambda \in U(\lambda_0)$

$$\sum_{l=0}^{\infty} s^l \sum_{|q|=l} \left| C^{(q)}(\lambda) \right| < \infty. \qquad (3.4)$$

Пусть далее для $\lambda \in U(\lambda_0)$

$$C^{(q)}(\lambda) - C^{(q)}(\lambda_0) = d_q(\lambda) \beta(\lambda), \quad \beta(\lambda) \underset{\lambda \to \lambda_0}{\to} 0, \qquad (3.5)$$

и для любого $s > 0$

$$\sup_{q,\lambda} \left| d_q(\lambda) s^{|q|} \right| < \infty, \quad \lambda \in U(\lambda_0). \qquad (3.6)$$

Тогда ряд

$$f(\lambda) = \sum_{|q|=0}^{\infty} C^{(q)}(\lambda) \delta_a^{(q)} \qquad (3.7)$$

определяет обобщенную функцию $f(\lambda) \in E'$, непрерывную по λ в точке λ_0.

Если $C^{(q)}(\lambda)$ непрерывно дифференцируемы по λ в $U(\lambda_0)$, и для $\frac{d}{d\lambda} C^{(q)}(\lambda)$ имеют место соотношения вида (3.4)–(3.6), то ряд (3.7) определяет непрерывно дифференцируемую обобщенную функцию $f(\lambda) \in E'$, и имеет место соотношение (3.3).

Доказательство. Не умаляя общности, можно считать, что $C^{(q)}(\lambda_0) = 0$ для всех q. Нужно показать, что для $f(\lambda)$, определяемой рядом (3.7), справедливо соотношение

$$\left(f(\lambda), \varphi\right) \to 0 \quad (\lambda \to \lambda_0) \quad \forall \varphi \in E.$$

Зададимся произвольной $\varphi \in E$ и пусть s таково, что $\left|\varphi^{(q)}(a)\right| \le C_\varphi s^{|q|}$. Тогда имеем:

$$\left(f(\lambda), \varphi\right) \le C_\varphi \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{s}{s_1}\right)^l \sum_{|q|=l} \left| d_q(\lambda) \beta(\lambda) \right| s_1^l \le$$

$$\le C_\varphi \left|\beta(\lambda)\right| \sup_{q,\lambda} \left| d_q(\lambda) s_1^{|q|} \right| \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2^{\nu-1}}{(\nu-1)!} l^{\nu-1} \left(\frac{s}{s_1}\right)^l \equiv R(\lambda).$$

Если выбрать $s_1 > s$ и учесть, что $\beta(\lambda) \to 0$ $(\lambda \to \lambda_0)$, то в виду (3.6), $R(\lambda) \to 0$ $(\lambda \to \lambda_0)$, что и требовалось.

Случай производной разбирается аналогично. Теорема доказана.

Покажем теперь, что в пространстве E' можно ввести счетную систему норм, превратив, тем самым, E' в счетно-нормированное пространство.

Действительно, положим для $f \in E'$ и $s = 1, 2, ...$

$$\|f\|_s \equiv \sum_{l=0}^{\infty} s^l \sum_{|q|=l} \left| C^{(q)} \right|, \qquad (3.8)$$

где $C^{(q)}$ – коэффициенты в разложении (2.3) для f (здесь точка $a \in R^\nu$ предполагается фиксированной, так что мы явно ее не указываем). Равенство (3.8) задает в E' норму. Кроме того, очевидно, $\|f\|_{s+1} \ge \|f\|_s$. Покажем, что нормы (3.8) согласованы. Пусть $\|f_n\|_{s_1} \to 0$, $\|f_n - f_m\|_{s_1} \to 0$, $\|f_n - f_m\|_{s_2} \to 0$ $(n, m \to \infty)$.

Обозначим через l_{1s} пространство последовательностей $\{C^{(q)}\}_{|q|=0}^{\infty}$, для которых сходится ряд (3.8). Очевидно, l_{1s} есть (замкнутое) под-

пространство l_1. Если функционалу $f_n \in E$ соответствует последовательность $\{C_n^{(q)}\}_{|q|=0}^{\infty}$, то в виду полноты l_{1s_2}, $C_n^{(q)}$ сходится при $n \to \infty$ к некоторому $C_\infty^{(q)}$ в норме l_{1s_2}; но в силу условия $\|f_n\|_{s_1} \to 0$, $C_n^{(q)}=0$ для всех q. Отсюда следует, что $\|f_n\|_{s_2} \to 0$. Если теперь последовательность $f_n \in E'$ фундаментальна по каждой из норм (3.8), $s = 1, 2, \ldots$, то аналогичными рассуждениями, с учетом теоремы 2.2 легко показать, что f_n сходится в каждой из норм (3.8) к некоторому элементу $f \in E'$. Таким образом, пространство E' является полным счетно-нормированным пространством с системой норм (3.8). Пространство E', рассматриваемое как счетно-нормированное, будем обозначать через $E'_{(N)}$. Легко также видеть, что из сходимости f_n по топологии пространства $E'_{(N)}$ следует сходимость f_n в смысле E' (но не наоборот). В этом смысле можно записать $E'_{(N)} \subset E'$.

4. Некоторые дополнения

1. Наряду с пространствами E_s, E можно рассматривать и несколько более широкие классы целых функций. Пусть $b > 1$ и $0 < \beta < (b-1)/b$. Обозначим через $E_{s,\beta}$ пространство функций $\varphi \in C^\infty(R^v)$, удовлетворяющих для всех $\rho > 0$, $\varepsilon > 0$, $x \in R^v$ и всех мультииндексов q неравенству

$$\left|D^q\varphi(x)\right| \le C(s+\rho)^{|q|}\left|q\right|^{(\beta+\varepsilon)|q|} e^{(s+\rho)|x|^b}, \qquad (4.1)$$

где C не зависит от q и x. Вводя в $E_{s,\beta}$ счетную систему норм

$$\|\varphi\|_{s,\beta}^{(\rho,\varepsilon)} = \sup_{q,\,x}\left[\frac{\left|D^q\varphi(x)\right|}{(s+\rho)^{|q|}\left|q\right|^{(\beta+\varepsilon)|q|}} e^{-(s+\rho)|x|^b}\right], \qquad (4.2)$$

$\rho, \varepsilon = 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \ldots$

мы получим полное счетно-нормированное пространство. Полагая $\beta_n = \frac{b-1}{b} - \frac{1}{n}$, введем пространство $E_b = \bigcup_{s=1}^{\infty}\bigcup_{n=1}^{\infty} E_{s,\beta_n}$ и, соответственно, пространство обобщенных функций E'_b. Для этого пространства справедливы, с очевидными изменениями, все результаты предыдущих параграфов. Отметим, к примеру, что неравенство (2.6) перейдет в случае пространства E'_b, в неравенство

$$\sum_{|l|=0}^{\infty} s^l l^{\beta l} \sum_{|q|=l}\left|C^{(q)}\right| < \infty. \qquad (4.3)$$

для всех $s > 0$ и $\beta = \frac{b-1}{b}$. Отметим также, что запас регулярных функционалов в E'_b меньше, чем в E' (и тем меньше, чем больше b).

2. В пространстве E' можно с помощью обычной процедуры [2, 3] определить свертку $f * g$ двух функционалов f и g в E'. При этом свертка в E' существует всегда (в отличие от других пространств обобщенных функций), обладает обычными свойствами, и для нее справедлива следующая

Теорема 4.1. Если $f, g \in E'$ и $f = \sum_{|q|=0}^{\infty} C_a^{(q)}\delta_a^{(q)}$, $g = \sum_{|q|=0}^{\infty} d_a^{(q)}\delta_a^{(q)}$, то $f * g = \sum_{|q|=0}^{\infty} h_a^{(q)}\delta_a^{(q)}$,

где $$h_a^{(q)} = \sum_{i,j\le q}(-1)^{|q-i-j|}\frac{a^{q-i-j}}{(q-i-j)!}C_a^{(i)}d_a^{(j)},$$

$$i = (i_1, i_2, \ldots, i_v),\ j = (j_1, j_2, \ldots, j_v).$$

В частности, при $a = 0$

$$h_0^{(q)} = \sum_{i+j=q} C_0^{(i)} d_0^{(j)}.$$

Доказательство этой теоремы, а также ряд приложений будут представлены в другой статье. Некоторые приложения описаны в [5].

В работе построен и строго обоснован новый метод решения задач математической физики, описывающих процессы, достаточно быстро затухающие на бесконечности. В основе метода лежит построение и анализ нового класса обобщенных функций (в смысле Л. Шварца–Гельфанда–Шилова) – линейных функционалов в пространствах целых функций многих вещественных переменных. В частности, прослеживается конструктивная связь между указанными функциями и последовательностью их «степенных моментов», что позволяет, помимо прочего, дать для функций рассматриваемых классов полное и конструктивное решение «проблемы моментов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гельфанд, И.М.** Обобщенные функции и действия над ними. Обобщенные функции [Текст]/ И.М. Гельфанд, Г.Е. Шилов. –М.: Физматгиз, 1959. –Вып. 1. –2-е изд.–470 с.

2. **Гельфанд, И.М.** Пространства основных и обобщенных функций. Обобщенные функции [Текст]/ И.М. Гельфанд, Г.Е. Шилов. –М.: Физматгиз, 1958. –Вып. 2.–307 с.

3. **Паламодов, В.П.** Преобразования Фурье быстро растущих бесконечно дифференцируемых функ-

ций [Текст]/В.П. Паламодов // Тр. Моск. матем. об-ва. –1962. –Т.11. –С. 309–350.

4. Функциональный анализ [Текст]/Под ред. С.Г.Крейна//Сер. СМБ. –М.: Физматлит, 1972.– 2-е изд. –544 с.

5. **Фирсов А.Н.** Моментное представление быстро убывающих функций и его приложения [Текст]/Фирсов А.Н.// Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке: Матер. XVII Междунар. науч.-метод. конф. 11-12 февр. 2010. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –С. 114–124.

УДК 004.896(06)

К.Н. Бискуб, А.И. Писарев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ПЛАВИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Процесс плавки медно-никелевого штейна в плавильных электропечах сопровождается выделением технологического газа, содержащего SO_2, CO, CO_2 и пыль цветных металлов. Для исключения выбросов неочищенного газа в атмосферу предусмотрена газоочистка, которая осуществляется в два этапа. Первый этап происходит в мокром механическом пылеуловителе – скруббере-охладителе, в котором улавливается крупная фракция пыли. Второй этап очистки осуществляется в сухом механическом пылеуловителе – рукавном фильтре, в котором улавливается более мелкая фракция пыли.

На рис. 1 изображена технологическая схема охлаждения и очистки газов плавильных электропечей. Газ из электропечи по газоходу поступает в скруббер-охладитель и попутно дожигается через три ступени дожига CO. Охлажденные в

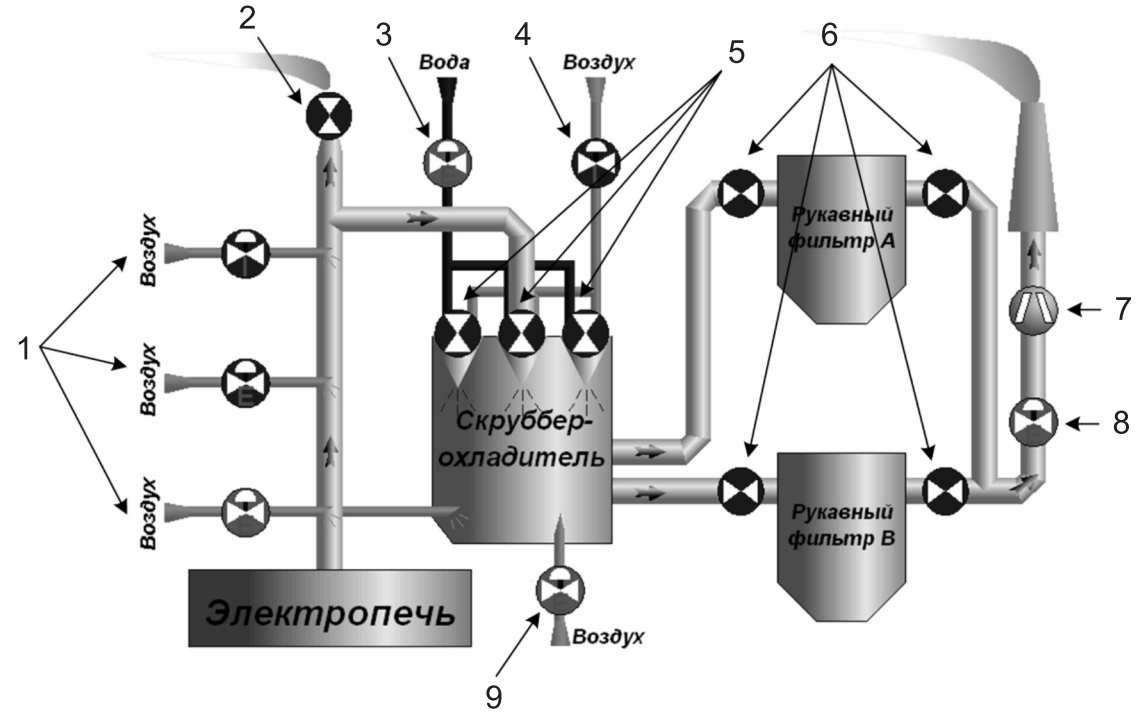


Рис. 1. Технологическая схема охлаждения и очистки газов плавильных электропечей
1 – три ступени дожига CO; 2 – аварийная заслонка (свеча); 3 – регулятор распылительной воды; 4 – регулятор распылительного воздуха; 5 – распылительные форсунки; 6 – запирающие клапаны рукавных фильтров А и В; 7 – дымосос; 8 – направляющая задвижка; 9 – аварийная задвижка

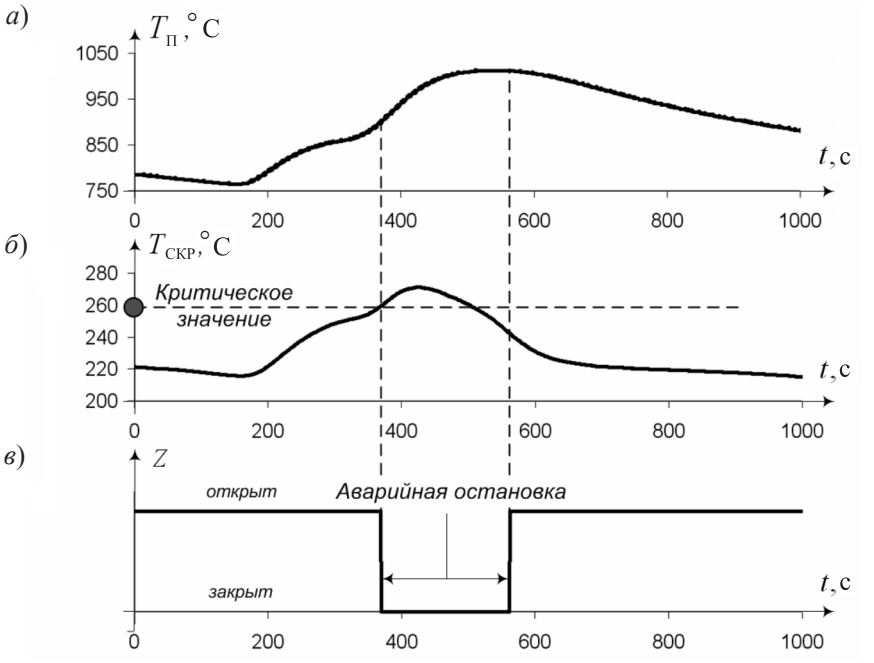


Рис. 2. Графики аварийного отключения рукавных фильтров:
а – температура в печи; *б* – температура на выходе скруббера-охладителя;
в – положение запорных клапанов рукавных фильтров

скруббере газы по двум газоходам поступают на вторую ступень очистки – в рукавный фильтр. В рукавном фильтре улавливается пыль за счет фильтрации газов через пористые перегородки рукавов [1].

При температуре технологических газов на выходе скруббера выше 260 °C запирающие клапаны рукавных фильтров закрываются (т. к. срабатывает автоматика безопасности), и весь неочищенный газ поступает в атмосферу через клапан аварийной свечи, минуя очистку в рукавных фильтрах.

На рис. 2 приведен пример аварийного срабатывания автоматики отключения рукавных фильтров. Из графиков видно, что при повышении температуры в печи с 760 °C до 1000 °C температура на выходе скруббера выросла с 220 °C до 270 °C, что привело к отключению фильтров.

Чтобы не допустить отключения рукавных фильтров, необходимо определить основные причины, которые приводят к повышению температуры технологических газов на выходе скруббера-охладителя $T_{СКР}$ до аварийных значений. Исходя из технологии ведения процесса охлаждения технологических газов, на рис. 3 представлен перечень

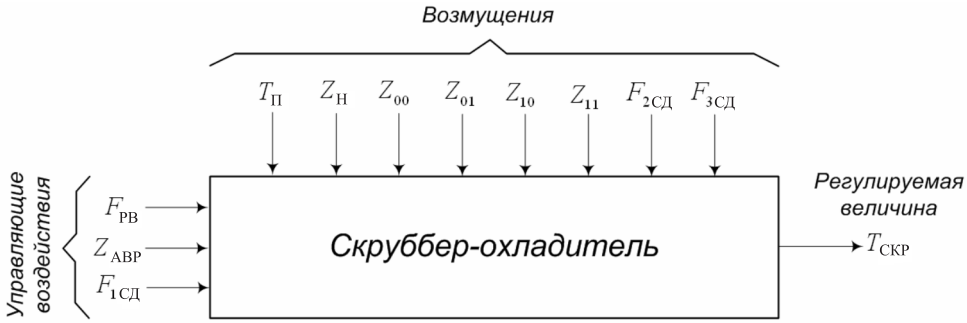


Рис. 3. Структурная схема объекта управления (скруббера-охладителя):
$F_{РВ}$ – расход распылительной воды, подаваемой в скруббер; $Z_{АВР}$ – положение аварийной задвижки; $T_П$ – температура в печи; Z_{00}, Z_{01}, Z_{10}, Z_{11} – положения входных и выходных запирающих клапанов рукавных фильтров *A* и *B*; $Z_Н$ – положение направляющей задвижки; $F_{1СД}$, $F_{2СД}$, $F_{3СД}$ – расход воздуха на 1-й, 2-й и 3-й ступени дожига СО

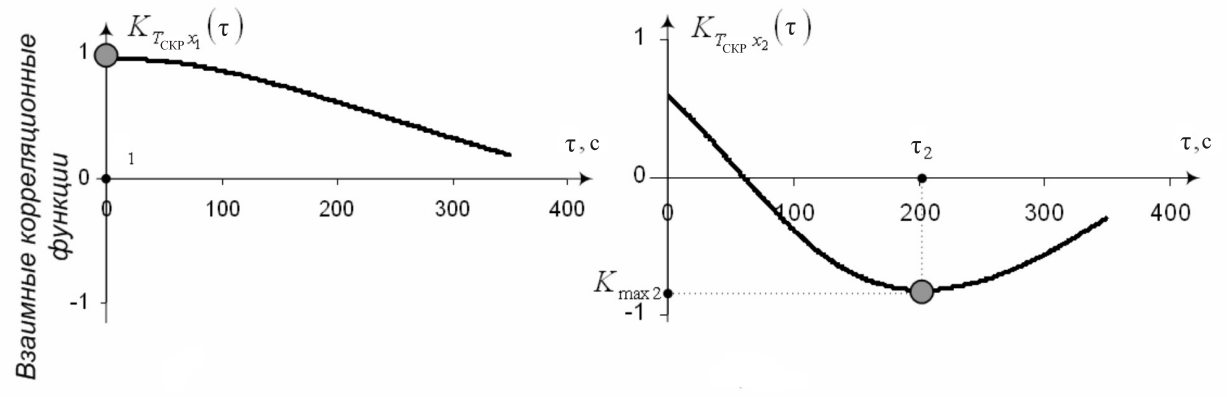


Рис. 4. Графики взаимных корреляционных функций:
а– канал «температура в печи – температура на выходе скруббера»;
б– канал «расход распылительной воды – температура на выходе скруббера»

управляющих воздействий и измеряемых возмущений, влияющих на регулируемый параметр.

В дальнейшем, для удобства вычислений, обозначим вектор факторов, влияющих на $T_{СКР}$ через $X = \{x_0, x_1, ..., x_1\}$, где x_1 – температура в печи; x_2 – расход распылительной воды, подаваемой в скруббер; x_3 – положение аварийной задвижки; x_4, x_5, x_6, x_7 – положения входных и выходных запирающих клапанов рукавных фильтров *A* и *B*; x_8 – положение направляющей задвижки; x_9 – расход воздуха на 1-й ступени дожига СО; x_{10} – расход воздуха на 2-й ступени дожига СО; x_{11} – расход воздуха на 3-й ступени дожига СО.

Для создания математической модели необходимо определить степень влияния перечисленных выше факторов на $T_{СКР}$ при помощи взаимных корреляционных функций, которые определяются по формуле:

$$K_{T_{СКР}x_j}(\tau) = \frac{\sum_{i=0}^{N-\tau}\left(T_{СКР_i} - \overline{T}_{СКР}\right)\left(x_{j(i+\tau)} - \overline{x}_j\right)}{(N-\tau)\,\sigma_{T_{СКР}} \cdot \sigma_{x_j}} \text{ при } \tau \geq 0,$$

где τ – временной сдвиг; N – объем выборки; $T_{СКР_i}$ – значения регулируемого параметра на *i*-м шаге; $\overline{T}_{СКР}$ – среднее значение регулируемого параметра; x_{ji} – значения *j*-го фактора *i*-м шаге; $\overline{x}_j$ – среднее значение *j*-го фактора; $\sigma_{T_{СКР}}$ – среднеквадратическое отклонение регулируемого параметра; σ_{x_j} – среднеквадратическое отклонение *j*-го фактора.

Для выявления влияния отдельных факторов на выходной параметр проведены активные эксперименты. В процессе исследований один из факторов ступенчато изменялся, а все остальные были стабилизированы. Пример графиков взаимных корреляционных функций представлен на рис. 4.

Показатели взаимных корреляционных функций по факторам

j	Фактор x_j	Экстремум K_{max_j} функции $K_{T_{СКР}X_j}(\tau)$, ед.	Временной сдвиг τ_j в точке экстремума K_{max_j}, с
1	Температура в печи	+0,98	0
2	Расход распылительной воды	–0,91	202
3	Положение аварийно задвижки	–0,82	235
4	Положение входного клапана фильтра А	+0,91	203
5	Положение выходного клапана фильтра А	+0,93	195
6	Положение входного клапана фильтра В	+0,82	240
7	Положение выходного клапана фильтра В	+0,83	234
8	Положение направляющей задвижки	+0,75	151
9	Расход воздуха на 1-й ступени дожига СО	–0,83	163
10	Расход воздуха на 2-й ступени дожига СО	–0,87	140
11	Расход воздуха на 3-й ступени дожига СО	–0,16	123

В таблице сведены основные показатели взаимных корреляционных функций по каждому фактору.

Как видно из таблицы и графиков взаимных корреляционных функций, между факторами x_1, …, x_{10} и $T_{СКР}$ имеются либо положительные зависимости, либо отрицательные зависимости с соответствующими задержками, но отсутствует зависимость между x_{11} и $T_{СКР}$.

На основании описанных выше предположений, на рис. 5 представлена математическая модель с учетом динамики переходных процессов. Она представляет собой нелинейную регрессионную модель второго порядка с элементами динамики, где конечное состояние объекта определяется совокупностью входных факторов и предысторией их действия на скруббер-охладитель. На рисунке обозначены: K_j – коэффициент усиления j-го фактора; $\sum$ – суммирование; $\prod$ – произведение; $\frac{1}{T_j p+1}$ – апериодическое звено 1-го порядка j-го фактора с постоянной времени T_j; $e^{-\tau_j p}$ – звено запаздывания j-го фактора с временем запаздывания τ_j; где T_0 – константа смещения; K_0, ..., K_9 – коэффициенты усиления факторов; 0,01 – масштабируемый коэффициент; $Z_Н(0{,}5 \cdot Z_{00} \cdot Z_{01} + 0{,}5 \cdot Z_{10} \cdot Z_{11})$ – множитель, который объясняет поведение объекта при отключении и включении газоочистки, т. к. этот множитель условно связан с объемом технологического газа, проходящего через газоочистку в единицу времени. Например, достаточно нулевого положения направляющей задвижки $Z_Н$ или закрытия запирающих клапанов Z_{00}, Z_{01}, Z_{10} и Z_{11} как в этот момент объем охлаждаемого технологического газа снижается до минимального значения, и температура газа начинает падать независимо от значений других факторов. При этом сделано допущение, что объем газа в рукавных фильтрах делится поровну.

Так как параметры τ_j (где $2 \le j \le 10$) по факторам x_2, …, x_{10} отличаются незначительно, это позволяет объединить их в одно звено $e^{-\tau_1 p}$.

Аналогично произведено тестирование объекта ступенчатыми сигналами для анализа переходных процессов. В результате анализа по фактору x_1 переходной процесс можно описать апериодическим звеном 1-го порядка $\frac{1}{T_0 p+1}$ (где $T_0 = 1$), а по факторам x_2, …, x_{10} – $\frac{1}{T_1 p+1}$ (где $T_1 = 200$). В результате модель упрощается; при этом, как показывают эксперименты, ошибка моделирования незначительна.

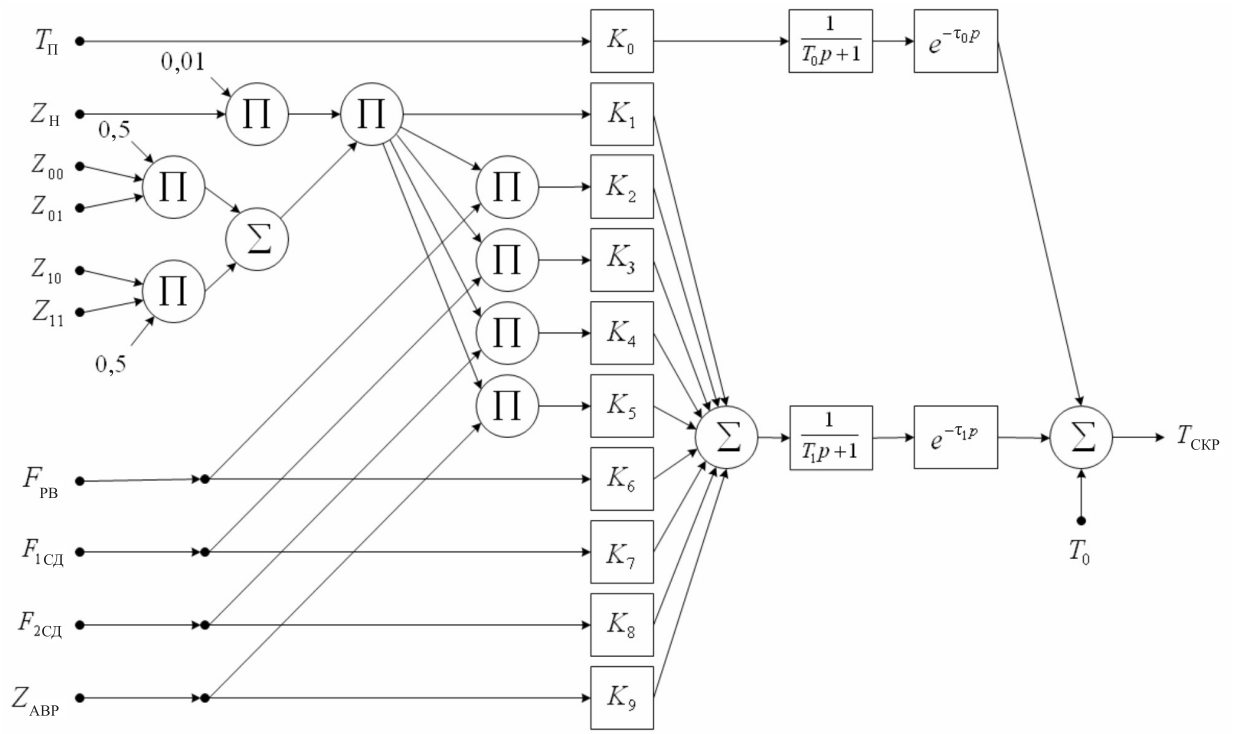


Рис. 5. Математическая модель скруббера-охладителя

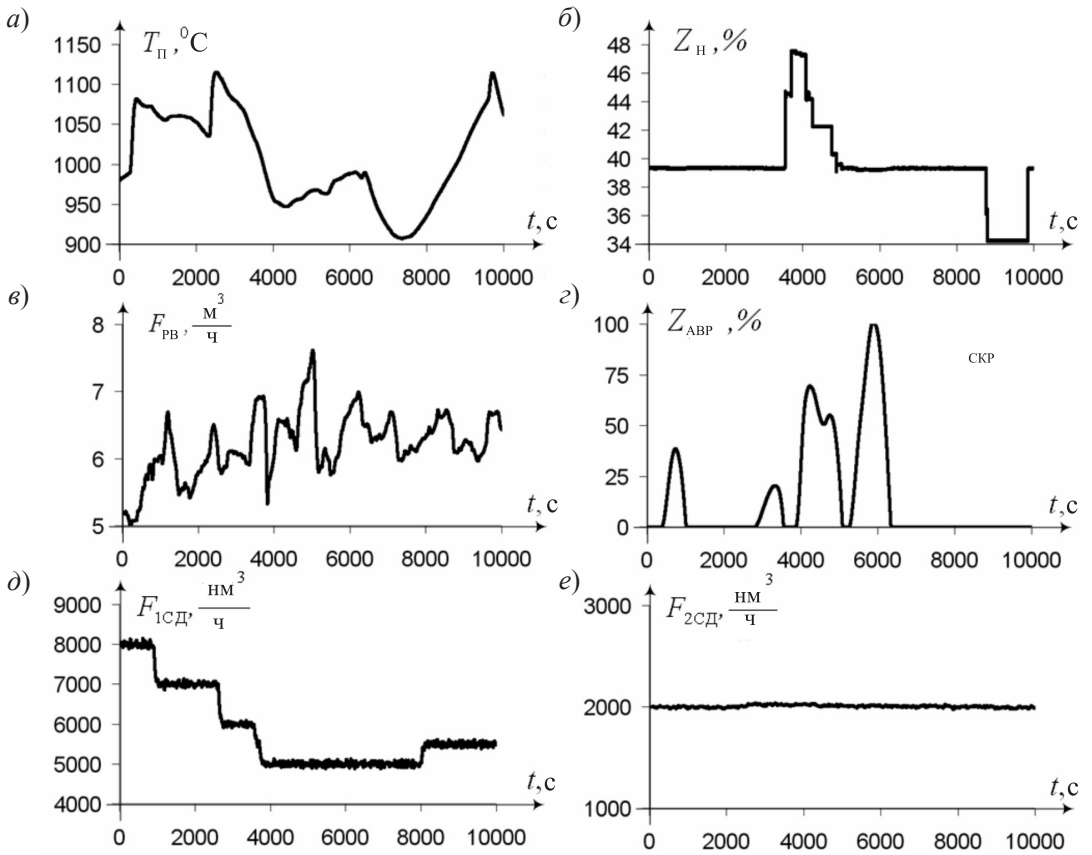


Рис. 6. Графики входных значений:
а – температура в печи; *б* – положение направляющей задвижки; *в* – расход распылительной воды, *г* – положение аварийной задвижки; *д* – расход воздуха на 1-й ступени дожига СО; *е* – расход воздуха на 2-й ступени дожига СО

Для точной оценки параметров математической модели $K_0, K_1, ..., K_9, T_0, T_1, \tau_0, \tau_1$ был использован метод наименьших квадратов (МНК–идентификация), т. е. методом оценки параметров математической модели путем минимизации ошибки моделирования:

$$J(M) = \frac{1}{2}\sum_{i=0}^{N}\left(T(M)_i - T_{iЭ}\right)^2 \to \min,$$

где $M = \{K_0, K_1, ..., K_9, T_0, T_1, \tau_0, \tau_1\}$ – точка многомерного пространства (параметры математической модели скруббера-охладителя), где $T(M)_i$ – рассчитанное значение температуры технологических газов на выходе скруббера-охладителя на *i*-шаге; $T_{iЭ}$ – экспериментальное значение температуры технологических газов на выходе скруббера-охладителя на *i*-шаге. В качестве алгоритма МНК–идентификации математической модели использовался покоординатный спуск (Гаусса–Зейделя) [3].

Начальные значения параметров математической модели выбираются не произвольно, а из экспериментальных данных над объектом исследования. Для расчетов выбраны следующие начальные значения: $K_0 = +0{,}5$, $K_1 = +500$, $K_2 = -30$, $K_3 = -0{,}05$, $K_4 = -0{,}05$, $K_5 = -0{,}3$, $K_6 = -10$, $K_7 = -0{,}001$, $K_8 = -0{,}001$, $K_9 = -0{,}3$, $T_0 = 1$, $\tau_0 = 1$, $T_1 = 200$, $\tau_1 = 50$, $T_0 = +100$.

Для построения математической модели использованы экспериментальные данные, их количество составило 10 000 значений при шаге квантования 1 с (рис. 6). При этом входные и выходные запирающие клапаны рукавного фильтра *A* и *B* были постоянно открыты в процессе исследования.

Уточненные параметры математической модели *J*(*M*), найденные при помощи МНК-идентификации, имеют следующие значения: $K_0 = 0{,}31$, $K_1 = +453{,}3$, $K_2 = -35{,}3$, $K_3 = -0{,}024$, $K_4 = -0{,}023$, $K_5 = -0{,}25$, $K_6 = -11{,}5$, $K_7 = -0{,}002$, $K_8 = -0{,}002$, $K_9 = -0{,}15$, $T_0 = 5$, $\tau_0 = 10$, $T_1 = 278$, $\tau_1 = 82$, $T_0 = +115{,}9$.

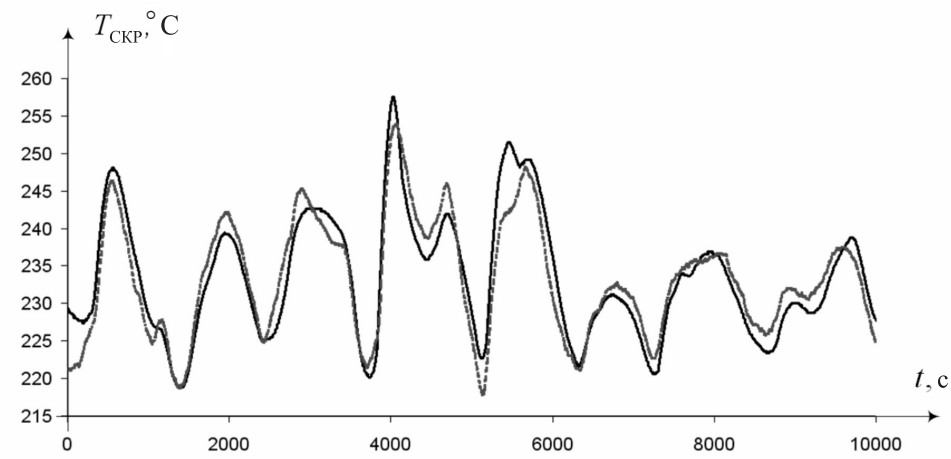


Рис.7. Экспериментальные и рассчитанные значения температуры газов на выходе скруббера-охладителя
(————) Экспериментальные значения; (– – – – –) Рассчитанные значения

Была произведена проверка адекватности математической модели реальному процессу. На рис. 7 представлены графики теоретических и экспериментальных значений температуры технологических газов на выходе скруббера-охладителя.

Вычисленный индекс корреляции [2] $R = \sqrt{\dfrac{\sum_i^N \left(T_{Pi} - \overline{T}_Э\right)^2}{\sum_i^N \left(T_{Эi} - \overline{T}_Э\right)^2}} \approx 0{,}95$ показывает достаточно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Использование представленной модели позволяет построить прогнозирующую систему управления, которая значительно улучшает качество регулирования температуры технологических газов.

Рассмотренная модель успешно используется в прогнозирующей системе управления, которая внедрена в АСУТП Надеждинского металлургического завода имени Б.И. Колесникова в плавильном цеху № 1.

Разработана модель охлаждения технологических газов плавильных электропечей, позволяющая прогнозировать температуру технологических газов при возникновении возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологическая инструкция пульта управления № 2 плавильного цеха №1 Надеждинского металлургического завода имени Б.Н. Колесникова ЗФ ОАО «ГМК «Норильский Никель» [Текст]. –С.115–119.

2. **Дрейпер, Н.** Прикладной регрессионный анализ. [Текст]/Н Дрейпер, Г. Смит; Пер. с англ.–М.: Финансы и статистика,1986. – В 2-х кн; кн. 1.–С.77–78.

3. **Самарский, А.А.** Численные методы [Текст]/ А.А. Самарский, А.В. Гулин. −М.: Наука, 1989. –2-е изд., перераб. и доп.–С.234–235.

УДК 519.83

В.И. Соловьев, Н.А. Ильина

РАВНОВЕСИЕ ШТАКЕЛЬБЕРГА В МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ АППАРАТНОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Программное обеспечение (ПО) как интеллектуальный товар существенно отличается от традиционных материальных товаров нематериальностью, идемпотентностью и наличием института защиты авторских прав (*нематериальность* означает физическую неосязаемость, которая влечет за собой сложность в оценке себестоимости разработки таких товаров, а *идемпотентность* понимается в алгебраическом смысле: два одинаковых интеллектуальных товара полностью эквивалентны одному такому товару). Программное обеспечение, будучи однажды создано, может, не теряя своих свойств, использоваться многократно (бесконечно много раз) одним или многими потребителями (и не исчезать в процессе потребления, в отличие от традиционных товаров).

В приложении к товарам рынка ПО это означает возможность установки неограниченного числа копий одного и того же программного продукта на различные компьютеры. При этом стоимость копирования ПО бесконечно мала по сравнению со стоимостью его разработки, что приводит к эффекту возрастания отдачи от масштаба распространения.

При этом ПО существенно отличается от других интеллектуальных товаров, поскольку является комплементарным товаром к аппаратному обеспечению и не может быть использовано без аппаратного обеспечения.

Данная статья посвящена исследованию рыночных стратегий участниками рынка аппаратного и программного обеспечения. В ней рассматривается использование стратегий ценового лидерства участниками смешанной олигополии – производителями аппаратного обеспечения Intel и AMD и разработчиками коммерческого ПО Windows и некоммерческого ПО Linux.

В классической модели дуополии применение стратегии ценового лидерства (стратегии Штакельберга) одним из конкурентов, в то время как другой конкурент максимизирует свою прибыль, согласно стратегии Курно, приводит к увеличению прибыли первого игрока и снижению прибыли второго игрока по сравнению с равновесием Курно.

Результаты использования стратегий ценового лидерства участниками смешанной олигополии – производителями аппаратного обеспечения и разработчиками коммерческого и некоммерческого ПО – существенно отличаются от своих аналогов для рынков традиционных товаров, что объясняется особенностями ПО как товара.

В работе [1] была построена модель взаимодействия разработчиков коммерческой операционной системы Windows и некоммерческой операционной системы Linux с монопольным поставщиком аппаратного обеспечения Intel, и в этой модели было найдено равновесие Нэша.

В той же работе [1] была предложена модель взаимодействия производителей аппаратного обеспечения Intel и AMD и разработчиков операционных систем Windows и Linux. При этом корпорации Intel и AMD, максимизирующие прибыль, образуют традиционную олигополию, тогда как корпорация Microsoft и сообщество разработчиков Linux образуют смешанную дуополию, в которой только первый участник стремится максимизировать прибыль. Данная модель строилась в следующих основных предположениях.

1. На рынке представлены компьютеры на базе процессоров Intel и AMD, каждый из которых может продаваться с одной из двух операционных систем (Windows и Linux), т. е. потребитель выбирает один из четырех продуктов: компьютер на

базе процессора Intel /AMD с операционной системой Windows / Linux.

Операционная система Windows распространяется корпорацией Microsoft на коммерческой основе путем продажи лицензий, а операционная система Linux распространяется сообществом разработчиков свободно и бесплатно.

Операционная система (ОС) устанавливается перед продажей компьютера, поэтому возможность использования пиратских копий коммерческой ОС не рассматривается.

Сборщики компьютеров образуют рынок совершенной конкуренции и не могут, в отличие от производителей процессоров и коммерческой ОС, влиять на цену комбинированного продукта (компьютера с ОС), поэтому цена компьютера складывается из цены процессора и цены ОС.

Цены всех продуктов предполагаются существенно большими, чем переменные издержки по производству этих продуктов.

2. Функции спроса на комбинированные продукты предполагаются линейными, потребительская ценность Windows − большей, чем потребительская ценность Linux, а потребительская ценность компьютера на базе Intel − большей, чем потребительская ценность компьютера на базе AMD. Также предполагается, что разница в потребительской ценности компьютеров на базе разных процессоров меньше, чем разница в потребительской ценности одинаковых компьютеров с разными ОС.

Пользователь приобретет комбинированный продукт (компьютер с ОС) тогда и только тогда, когда потребительская ценность продукта для данного пользователя превышает его цену, при этом из двух продуктов, потребительская ценность каждого из которых больше его цены, потребитель выбирает продукт с наименьшей ценой, а из двух продуктов, за которые потребитель готов заплатить одинаковую цену, он выбирает (если это возможно) продукт с большей потребительской ценностью.

3. Используются следующие обозначения: $q_{\max}$ – емкость рынка персональных компьютеров; α_I и α_A − максимально возможные цены персональных компьютеров на базе процессоров Intel и AMD соответственно; α_{I+W} и α_{A+W} – максимально возможные цены персональных компьютеров на базе процессоров Intel и AMD с предустановленной коммерческой ОС Windows; p_I и p_A − цены процессоров Intel и AMD, устанавливаемые производителями; p_W – цена лицензии на ОС Windows, устанавливаемая корпорацией Microsoft; q_{I+W}, q_{I+L}, q_{A+W} и q_{A+L} − спрос на персональные компьютеры на базе процессора Intel/AMD с ОС Windows/Linux; $q_I = q_{I+W} + q_{I+L}$ и $q_A = q_{A+W} + q_{A+L}$ − спрос на процессоры Intel и AMD; $q_W = q_{I+W} + q_{A+W}$ и $q_L = q_{I+L} + q_{A+L}$ − спрос на ОС Windows и Linux; f_I, f_A и f_W − постоянные издержки компаний Intel, AMD и Microsoft; v_I, v_A и v_W − переменные издержки компаний Intel, AMD и Microsoft; π_I, π_A и π_W – их прибыль.

В работе [1] были определены зависимости спроса на все товары от их цен, в частности,

$$q_I = q_{\max}(\alpha_A - 2p_I + p_A)/\alpha_A,$$

$$q_A = 2q_{\max}(p_I + p_A)/\alpha_A,$$

$$q_W = q_{\max}(P_A - p_A + p_W)/\alpha_A,$$

поставлены задачи максимизации прибыли коммерческих производителей

$$\pi_I = q_I(p_I - v_I) - f_I = q_{\max}(\alpha_A - 2p_I + p_A)\times \times(p_I - v_I)/\alpha_A - f_I \to \max,$$

$$\pi_A = q_A(p_A - v_A) - f_A = 2q_{\max}(p_I - p_A)\times \times(p_A - v_A)/\alpha_A - f_A \to \max,$$

$$\pi_W = q_W(p_W - v_W) - f_W = q_{\max}(\alpha_A - p_A - p_W)\times \times(p_W - v_W)/\alpha_A - f_W \to \max,$$

и показано, что в этой модели равновесие Нэша отсутствует.

В работах [2, 3] рассматривалась так называемая *ситуация Курно* в данной модели. Конкретнее, к сформулированным ранее предположениям было добавлено еще одно о том, что производители аппаратного обеспечения и ОС не сговариваются и не взаимодействуют другими способами. Каждый производитель принимает решение об установлении цены, исходя из имеющейся на рынке информации о ценах продуктов прочих игроков. Таким образом, при принятии решения об установлении цены каждый производитель считает, что прочие игроки не реагируют на изменение цены его продукта, т. е. перекрестные эластичности цен равны нулю.

Теоретически, возможны два варианта порядка цен комбинированных продуктов, не противоречащие сформулированным предположениям. Компьютер на базе процессора AMD с ОС Windows может оказаться дороже, чем компьютер на базе процессора Intel с ОС Linux:

$$p_I + p_W > p_A + p_W > p_I > p_A, \qquad (1)$$

или дешевле:

$$p_I + p_W > p_I > p_A + p_W > p_A. \qquad (2)$$

В работе [2] для двух данных вариантов порядков цен были определены стратегии Курно для каждого участника рынка (стратегия Курно определяется как такая цена продукта, предлагаемого данным участником рынка, которая обеспечивает ему максимум прибыли в предположении, что остальные участники не будут изменять цен). Также было доказано, что в равновесии возможна только ситуация, в которой порядок цен удовлетворяет неравенству (1), при этом стратегии Курно определяются выражениями:

$$p_I = p_I(p_A, p_W) = (\alpha_A + 2v_I + p_A)/4,$$

$$p_A = p_A(p_I, p_W) = (p_I + v_A)/2$$

$$p_W = p_w(p_I, p_A) = (\alpha_A + v_W - p_A)/2,$$

равновесные цены Курно равны

$$p_I^{\text{РК}} = (2\alpha_A - 4v_I + v_A)/7,$$

$$p_A^{\text{РК}} = (\alpha_A + 2v_I + 4v_A)/7,$$

$$p_W^{\text{РК}} = (6\alpha_A + 7v_W - 2v_I - 4v_A)/14,$$

прибыли участников рынка в равновесии Курно равны

$$\pi_I^{\text{РК}} = 2q_{\max}(2\alpha_A - 3v_I + v_A)^2/(49\alpha_A) - f_I,$$

$$\pi_A^{\text{РК}} = 2q_{\max}(\alpha_A + 2v_I - 3v_A)/(49\alpha_A) - f_A,$$

$$\pi_W^{\text{РК}} = 2q_{\max}(6\alpha_A - 2v_I - 4v_A - 7v_W)/(196\alpha_A) - f_W,$$

Если пренебречь переменными издержками, то

$$p_I^{\text{РК}} \approx 2\alpha_A/7,\ p_A^{\text{РК}} \approx \alpha_A/7,\ p_W^{\text{РК}} \approx 3\alpha_A/7;$$

$$p_I^{\text{РК}} + p_W^{\text{РК}} \approx 5\alpha_A/7,\ p_A^{\text{РК}} + p_W^{\text{РК}} \approx 4\alpha_A/7;$$

$$\pi_I^{\text{РК}} \approx 8q_{\max}\alpha_A/49 - f_I,\ \pi_A^{\text{РК}} \approx 2q_{\max}\alpha_A/49 - f_A,$$
$$\pi_W^{\text{РК}} \approx 9q_{\max}\alpha_A/49 - f_W.$$

Видим, что самый дорогой продукт (компьютер на базе Intel с ОС Windows) в равновесии Курно оказывается примерно в 5 раз дороже самого дешевого продукта (компьютера на базе AMD с ОС Linux), процессор Intel стоит приблизительно в 2 раза дороже процессора AMD, а лицензия на Windows − примерно в 1,5 раза дороже процессора Intel и примерно в 3 раза дороже процессора AMD.

При этом (без учета постоянных издержек) прибыль Intel превышает прибыль AMD в 4 раза, а прибыль Microsoft превышает прибыль Intel на 12,5 %.

Проанализируем ситуации равновесия Штакельберга в модели взаимодействия двух конкурирующих поставщиков аппаратного обеспечения с разработчиками коммерческого и некоммерческого ПО.

Рассмотрим вначале стратегию ценового лидерства компании Intel, которая в такой стратегии назначает цену, исходя из предположения, что AMD и Microsoft будут реагировать в соответствии со своими ценовыми стратегиями Курно:

$$p_I^*(p_A, p_W) = \frac{\alpha_A + (2 - \partial p_A/\partial p_I)v_I + p_A}{4 - \partial p_A/\partial p_I},$$

$$p_A^*(p_I, p_W) = \frac{p_I + (1 - \partial p_I/\partial p_A)v_A}{2 - \partial p_I/\partial p_A},$$

$$p_W^*(p_A, p_I) = \frac{\alpha_A + v_W(1 + \partial p_A/\partial p_W) - p_A}{2 + \partial p_A/\partial p_W}.$$

При этом $\partial p_I/\partial p_A$ считается равной нулю, поэтому $p_A = (p_I + v_A)/2$, и $\partial p_A/\partial p_I = 1/2$, откуда

$$p_I^{\text{РШ-}I}(p_A, p_W) = (2\alpha_A + 3v_I + v_A)/6,$$

$$p_A^{\text{РШ-}I}(p_I, p_W) = (2\alpha_A + 3v_I + 7v_A)/12,$$

$$p_W^{\text{РШ-}I}(p_A, p_I) = (10\alpha_A - 3v_I - 7v_A + 12v_W)/24;$$

$$\pi_I^{\text{РШ-}I} = q_{\max}(2\alpha_A - 3v_I + v_A)^2/(24\alpha_A) - f_I,$$

$$\pi_A^{\text{РШ-}I} = q_{\max}(2\alpha_A + 3v_I - 5v_A)^2/(72\alpha_A) - f_A,$$

$$\pi_W^{\text{РШ-}I} = q_{\max}(10\alpha_A - 3v_I - 7v_A - 12v_W)^2/(576\alpha_A) - f_W.$$

Пренебрегая переменными издержками, получим:

$$\pi_I^{\text{РШ-}I} \approx q_{\max}\alpha_A/6 - f_I,$$

$$\pi_A^{\text{РШ-}I} \approx q_{\max}\alpha_A/18 - f_A,$$

$$\pi_W^{\text{РШ-}I} \approx 25q_{\max}\alpha_A/144 - f_W.$$

Видим, что стратегия ценового лидерства Intel приводит к увеличению прибыли Intel (по сравнению с ситуацией равновесия Курно) всего на 0,3 %, при этом прибыль AMD увеличивается приблизительно на 1,5 %, а прибыль Microsoft снижается примерно на 1 %.

Анализируя устойчивость стратегии ценового лидерства Intel, можно заметить, что и AMD, и Microsoft могут увеличить свою прибыль по сравнению с равновесием Штакельберга, соответствующим образом реагируя на цену Intel.

В стратегии ценового лидерства компании AMD аналогичные рассуждения приводят к следующим выражениям:

$$p_I^{\text{РШ-}A}(p_A, p_W) = (7\alpha_A + 14v_I + 3v_A)/24 \approx \alpha_A/24,$$

$$p_A^{\text{РШ-}A}(p_I, p_W) = (\alpha_A + 2v_I + 3v_A)/6 \approx \alpha_A/6,$$

$$p_W^{\text{РШ-}A}(p_A, p_I) = (5\alpha_A - 2v_I - 3v_A + 6v_W)/12 \approx 5\alpha_A/12;$$

$$\pi_I^{\text{РШ-}A} = q_{\max}(7\alpha_A - 10v_I + 3v_A)^2/(288\alpha_A) - f_I \approx 49q_{\max}\alpha_A/288 - f_I,$$

$$\pi_A^{\text{РШ-}A} = q_{\max}(\alpha_A + 2v_I - 3v_A)^2/(24\alpha_A) - f_A \approx q_{\max}\alpha_A/24 - f_A,$$

$$\pi_W^{\text{РШ-}A} = q_{\max}(5\alpha_A - 2v_I - 3v_A - 6v_W)^2/(144\alpha_A) - f_W \approx 25q_{\max}\alpha_A/144 - f_W.$$

Заметим, что стратегия ценового лидерства приводит к снижению прибыли компании AMD по сравнению с тем, как если бы AMD выступала ведомой, а стратегия ценового лидерства применялась бы компанией Intel. Таким образом, ценовое лидерство AMD также оказывается неустойчивым.

В заключение отметим, что корпорация Microsoft не может выступать ценовым лидером, поскольку функции реакции обоих производителей аппаратного обеспечения не зависят от цены ОС.

Полученные результаты кардинально отличаются от своих аналогов на рынках традиционных товаров. Эти отличия объясняются, во-первых, тем, что на рынке практикуется инновационный способ распространения товаров − свободное распространение программного обеспечения, и, во-вторых, спецификой рынка информационных технологий, на котором переменные издержки пренебрежимо малы, часть товаров (ПО) не обладает свойством редкости.

Работа поддержана грантом Президента РФ МК-3663.2009.6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соловьев, В.И.** Экономико-математическое моделирование рынка программного обеспечения [Текст]/ В.И. Соловьев.−М.: Вега-Инфо, 2009.−176 с.

2. **Соловьев, В.И.** Равновесие Курно в модели взаимодействия производителей аппаратного и программного обеспечения на рынке информационных технологий[Текст]/В.И.Соловьев,Н.А.Ильина,М.В.Самоявчева//Вестник университета. −ГУУ. −2009. −№ 33. −С. 418−427.

3. **Soloviev, V.I.** Cournot equilibrium in a model of hardware and software manufacturers' interaction [Text]/ V.I. Soloviev, N.A. Iliina, M.V. Samoyavcheva//Annales Universitatis Apulensis: Series Oeconomica.−2009. −Vol. 11.−№ 1.−P. 43−53.

УДК 519.711.3

А.В. Матвеев, М.В. Иванов, А.Б. Шевченко

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ АЭС

Промышленные объекты ядерной энергетики имеют высокую потенциальную опасность, связанную с возможностью массового поражения людей в случае возникновения крупных аварий и пожаров. Авария и пожар на Чернобыльской атомной электростанции (АЭС) − убедительное подтверждение того, что недостаточная защищенность таких объектов приводит к губительным последствиям для населения не только конкретного региона, на территории которого расположен аварийный объект, но и огромных окружающих территорий. Поэтому повышение пожарной безопасности АЭС − одно из наиболее важных направлений обеспечения безопасности не только данных промышленных объектов, но и техносферы в целом.

Статистика пожаров, взрывов и других аварий на АЭС показывает, что пожарная безопасность АЭС не удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к безопасности АЭС в целом. Интенсивность возникновения пожаров на АЭС значительно выше интенсивности возникновения других аварийных ситуаций, например, таких, как разгерметизация первого контура, паропровода или трубопровода питательной воды и др. Согласно имеющимся данным, на АЭС всего мира происходит от 35 до 50 пожаров и взрывов в год. Эта статистика свидетельствует о том, что существующая система обеспечения пожарной безопасности на АЭС является недостаточно эффективной.

Таким образом, в настоящее время существует настоятельная необходимость совершенствования интеграции автоматизированной системы управления технологическими процессами предприятий атомной энергетики с системами противопожарной защиты. Необходимы системные исследования, направленные на повышение эффективности противопожарной защиты на объектах АЭС.

При создании систем пожарной безопасности на АЭС отечественные специалисты руководствуются общими требованиями пожарной безопасности, изложенными в [1–3]. При разработке проектов на строительство объектов ядерной энергетики в России учитываются требования руководства МАГАТЭ по безопасности [4].

В соответствии с этими документами концепции пожаровзрывозащиты АЭС предусматривают многоуровневую глубокоэшелонированную защиту, целью которой является обеспечение безопасности при нормальной эксплуатации ядерных реакторов и в аварийных ситуациях; создание систем обнаружения и предотвращения распространения огня, локализации и ликвидации пожара; разработка превентивных мер защиты, ограничивающих ущерб от пожара при проектных и гипотетических авариях на АЭС до приемлемого уровня.

Пожары на АЭС могут быть причиной возникновения радиационной опасности, а также непосредственно наносят большой ущерб как прямой, в результате гибели людей, уничтожения и повреждения материальных ценностей, сооружений, оборудования, так и косвенный, вследствие недовыдачи электроэнергии в единую энергосистему. Анализ аварийности ядерных установок, проведенный комиссией по атомной энергии в США, показал, что материальный ущерб от пожаров превышает 60 % общего ущерба от всех аварий и неполадок на АЭС, причем отмечено немало пожаров с прямым ущербом свыше 1 млн долл. США [5].

За последнее десятилетие на зарубежных АЭС доля крупных пожаров (с выходом радио-

активных веществ за пределы станций) составила 0,5 %, средних (с выходом радиоактивных веществ в пределах реакторного здания) – 8–9 %, остальное – незначительные пожары, не связанные с выходом радиоактивных веществ из активной зоны ядерного реактора.

К внешним причинам природного характера, приводящим к пожарам на АЭС, относятся экстремальные воздействия ветра (смерчи, торнадо и т. п., возникающие с частотой 10^{-6}–10^{-3} в год, наводнение – 10^{-7}–10^{-2} в год, сейсмические – 10^{-5}–10^{-2} в год и др.). Внешние причины, приводящие к пожарам, вызванные человеческой деятельностью, связаны с авиационными катастрофами, транспортными авариями, саботажем, терроризмом и др.

Под внутренними причинами техногенного характера понимаются:

проектные аварии – течь теплоносителя первого контура с частотой $3\cdot10^{-4}$ в год;

потеря теплоносителя – $2\cdot10^{-5}$ в год;

разгерметизация корпуса ядерной энергетической установки –10^{-7} в год и др.

К внутренним причинам организационного характера относятся:

неудовлетворительная организация технического обслуживания, неправильные действия операторов;

дефекты проекта и монтажа, в т. ч. отсутствие надежной технической защиты от несанкционированных (ошибочных или умышленных) аварийных действий обслуживающего персонала, способных привести к взрыву реактора, пожару и выбросу радиоактивных материалов;

неудовлетворительное качество инструкций и руководящих документов.

Проведенный анализ [4–6] показал, что наиболее часто к пожарам приводят ошибочные действия персонала, повреждения электроустановок, повреждения оборудования, нарушение технологической операции.

Анализ пожаров, происшедших на АЭС с реакторами всех типов в мире, показывает, что наиболее часто пожары возникают в машинных залах, реакторных отделениях, открытых распределительных устройствах, деаэраторных этажерках и участках с размещением электротехнических устройств. Опубликованные в [4] результаты позволяют сделать вывод, что основными причинами пожаров являются короткие замыкания и перегрузки, нарушения правил пожарной безопасности при проведении огневых работ, неисправность и нарушение правил эксплуатации технологического оборудования, неосторожное обращение с огнем, нарушение правил эксплуатации электроустановок и электробытовых приборов, самовозгорание материалов.

Наиболее подвержены [4–5] преждевременному старению и являются «инициаторами» возгорания: изоляция кабеля – 38 %, насосы первого и второго контуров – 12 %, турбогенераторы – 11 %, маслопроводы – 24 %, электронное оборудование – 6 %, трансформаторы – 6 % и вентиляционные системы – 3 %. Анализ причин пожаров показал, что в машинном зале АЭС от возгорания трансформаторного масла происходит пожаров – 29 %, загораний изоляции кабеля – 25 %, взрывов и загораний масла в системах регулирования и охлаждения – 12 %, горения пускателей и переключателей – 9 %, возгорания смазки подшипников – 11 %, взрывов и горения водорода в системе охлаждения турбогенератора – 14 %.

Традиционно сложилось два направления в обеспечении пожарной безопасности объектов. Первое включает методы и средства предотвращения пожаров и взрывов на объектах, второе – непосредственно тушение пожаров на месте их возникновения [7]. Достижение предельно допустимых значений опасных факторов для большинства пожаров происходит за 5–10 мин после его начала, потеря несущей способности металлических конструкций – за 10–15 мин. В то же время эффективные действия пожарных подразделений начинаются через 25 мин, с учетом прибытия их на пожар в среднем за 17 мин. Тяжесть последствий от пожаров усугубляется из-за 50 % отказов систем автоматической пожарной защиты. Общий принципиальный недостаток всех существующих систем пожарной автоматики – высокий процент ложных срабатываний, достигающий в отдельных случаях 90 %. Данные факторы и определяют, что наиболее приоритетным должно являться первое направление, выраженное в прогнозировании и предотвращении возникновения пожаров на АЭС.

В рамках решения комплексной проблемы управления пожарной безопасностью на АЭС создается соответствующая система.

За основную функцию системы управления пожарной безопасностью (СУПБ) АЭС принято обеспечение требуемых показателей эффективности управления пожарной безопасностью

на АЭС. В качестве показателя эффективности функционирования СУПБ рассматривается количество пожаров на АЭС за определенный период времени.

При разработке системы управления пожарной безопасностью АЭС в целом необходимо подразделить ее на ряд подсистем: целевую, защитную, обеспечивающую. Эти подсистемы образуют механизм управления, представляющий собой совокупность органов управления, средств, методов и инструментов, с помощью которых они воздействуют на объект управления для гарантированного достижения цели, стоящей перед системой.

Технология управления пожарной безопасностью есть преобразование информационных, технических, временных, финансовых ресурсов в интересах обеспечения требуемого уровня пожарной безопасности АЭС.

Функциями целевой подсистемы СУПБ на АЭС предложено выбрать мероприятия по сбору, обработке, выдаче информации в области противопожарной защиты, осуществление мониторинга, выявление негативных факторов и нарушений, способных потенциально привести к реализации пожарной ситуации.

Функциями обеспечивающей подсистемы выступают мероприятия, направленные на ликвидацию выявленных нарушений и факторов, потенциально приводящих к реализации пожарной ситуации на АЭС.

Функциями защитной подсистемы выступают мероприятия, направленные на обнаружение и предотвращение распространения огня в случае наступления пожара на АЭС, локализации и ликвидации пожара; разработка превентивных мер защиты, ограничивающих ущерб от пожара на АЭС до приемлемого уровня.

При моделировании системы управления пожарной безопасностью АЭС необходимо учитывать, что она функционирует в условиях воздействия внешней среды. Внешняя среда осуществляет негативные воздействия, выраженные в появлении негативных факторов и нарушений, приводящих к реализации пожаров на АЭС.

Предложенный подход к управлению пожарной безопасностью в рамках отношений двух сторон (СУПБ, состоящей из трех подсистем, и внешней среды) позволил разработать совокупность конструктивных методов и модели построения и использования компонентов системы.

Обычно система имеет определенный количественный состав (элементы системы), распределенный в пространстве с соответствующими зонами воздействия (влияния), выполняющий определенные функции.

Применение методов декомпозиции и агрегирования позволило представить процесс управления пожарной безопасностью на АЭС в виде трех базовых компонентов:

интенсивность появления негативных факторов и нарушений, приводящих к пожарам на АЭС;

интенсивность идентификации целевой подсистемой СУПБ опасных негативных факторов и нарушений;

интенсивность действий обеспечивающей подсистемы СУПБ, направленных на нейтрализацию выявленных негативных факторов и нарушений.

Для оценивания показателя эффективности управленческих решений по предотвращению возникновения пожаров на АЭС необходимо определить вероятность нейтрализации выявленных негативных факторов и нарушений.

Требуется сформировать адекватную аналитическую модель системы управления пожарной безопасностью, в зависимости от различной организационно-технической и социально-экономической обстановки, а также сформировать показатель эффективности управленческих решений по предотвращению возникновения пожаров на АЭС и показатель эффективности функционирования СУПБ в целом, основанный на установлении формальной аналитической зависимости между тремя базовыми компонентами.

Для оценивания эффективности управления пожарной безопасностью необходимо установить зависимость показателя эффективности от пространственно-временных состояний компонентов системы, организационно-технических возможностей и управляющих воздействий.

Метод оценивания показателя эффективности управленческих решений по предупреждению возникновения пожаров на АЭС состоит из двух последовательных этапов:

обоснование оценивания;

формирование показателя эффективности управленческих решений.

Этап 1. Обоснование оценивания.

1. Оценивание требует:

типизировать воздействия поражающих негативных факторов, потенциально приводящих к реализации пожаров на АЭС;

установить уровень пожарной опасности в зависимости от воздействий поражающих факторов;

разработать методику обоснования путей снижения уровня опасности до допустимого уровня.

2. Оценивание предполагает:

формализацию процессов воздействий в рамках теории нестационарных потоков Пуассона;

формализацию деятельности СУПБ по предупреждению возникновения пожаров на АЭС в рамках теории обслуживания нестационарных потоков Пуассона по показательному закону с переменной интенсивностью;

разработку аналитической модели процесса взаимодействия СУПБ на АЭС и окружающей среды;

представление общего количества пожаров на АЭС уравнением результативности действий;

выбор пути повышения эффективности СУПБ по предупреждению возникновения пожаров на АЭС.

3. Оценивание позволяет обосновать рациональные действия и способы их реализации на основе разработанной модели.

Этап 2. Формирование показателя эффективности управленческих решений по предупреждению возникновения пожаров на АЭС и эффективности функционирования СУПБ в целом.

Базовыми компонентами в процессе управления пожарной безопасностью на АЭС являются:

$\lambda(t)=(\lambda_1(t), \lambda_2(t),..., \lambda_n(t))$ – интенсивности появления негативных факторов и нарушений, приводящих к пожарам на АЭС, n – количество негативных факторов;

$\nu^{ц}(t)=(\nu_1^{ц}(t), \nu_2^{ц}(t),\nu_3^{ц}(t), ..., \nu_n^{ц}(t))$ – интенсивность идентификации целевой подсистемой СУПБ опасных негативных факторов и нарушений;

$\nu^{о}(t)=(\nu_1^{о}(t), \nu_2^{о}(t),\nu_3^{о}(t), ..., \nu_n^{о}(t))$ – интенсивность действий обеспечивающей подсистемы СУПБ, направленных на нейтрализацию выявленных нарушений.

Промежутки времени между моментами идентификации факторов являются величинами случайными. Обнаруженные факторы во времени образуют поток, который весьма близок к потоку Пуассона. Время обработки данных о требуемом факторе также случайная величина. Обработанные в системе данные о факторах распределяются далее между выделенными структурами, решающими соответствующие задачи по нейтрализации негативных факторов и нарушений.

Не нарушая общности рассуждений, рассматривается случай, когда время пребывания требуемых негативных факторов в области действия подразделений целевой подсистемы весьма ограничено и соизмеримо со временем, которое необходимо для их идентификации, а также обработки данных и принятия адекватных действий по этим выявленным негативным факторам. Поэтому такую сложную систему можно в первом приближении рассматривать как систему с отказами.

На основе данных допущений и предположений была сформирована система дифференциальных уравнений, описывающих функционирование рассматриваемой системы при реализации процесса обнаружения и нейтрализации «i»-го негативного фактора или нарушения:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}P_i^{00}(t) = -P_i^{00}(t)\cdot\lambda_i(t) + P_i^{01}(t)\cdot\nu_i^{о}(t); \\ \frac{d}{dt}P_i^{01}(t) = -P_i^{01}(t)\cdot\left(\lambda_i(t)+\nu_i^{о}(t)\right)+ \\ +P_i^{11}(t)\cdot\nu_i^{ц}(t) + P_i^{10}(t)\cdot\nu_i^{ц}(t); \\ \frac{d}{dt}P_i^{10}(t) = P_i^{00}(t)\cdot\lambda_i(t) - P_i^{10}(t)\cdot\nu_i^{ц}(t)+ \\ +P_i^{11}(t)\cdot\nu_i^{о}(t); \\ \frac{d}{dt}P_i^{11}(t) = P_i^{01}(t)\cdot\lambda_i(t) - P_i^{11}(t)\cdot\left(\nu_i^{ц}(t)+\nu_i^{о}(t)\right), \end{cases} \quad (1)$$

при граничных условиях: $P_i^{00}(t_0) = 1$, $P_i^{10}(t_0) = P_i^{01}(t_0) = P_i^{11}(t_0) = 0$.

При решении данной системы уравнений для стационарных процессов оказалось возможным получить аналитическое значение $P_i(t)$ – вероятности обнаружения и нейтрализации «i»-го негативного фактора или нарушения, способного потенциально привести к реализации пожара:

$$P_i(t) = \frac{\nu_i^{ц}(t)\cdot\nu_i^{о}(t)}{\lambda_i(t)\cdot(\lambda_i(t)+\nu_i^{ц}(t)+\nu_i^{о}(t)) + \nu_i^{ц}(t)\cdot\nu_i^{о}(t)}. \quad (2)$$

Показатель эффективности управления пожарной безопасностью на АЭС можно определить из следующего выражения:

$$I = \sum_{i=1}^{n}\int_T \lambda_i(t)(1-P_i(t))P_i^{п}(t)dt, \quad (3)$$

где I – количество пожаров, произошедших на объектах АЭС за период времени T; $\lambda_i(t)$ – интен-

сивности появления «i»-го негативного фактора, приводящего к пожарам на АЭС, $i=\overline{1,n}$; $P_i^{\text{п}}(t)$ – вероятность того, что существующий негативный фактор или нарушение приведет к наступлению пожара.

При этом необходимо учитывать ограничения на ресурсы соответствующих подсистем СУПР на АЭС:

$$\sum_{i=1}^{n}\int_T v_i^{\text{ц}}(t)=R^{\text{ц}},$$

$$\sum_{i=1}^{n}\int_T v_i^{\text{о}}(t)=R^{\text{о}}, \qquad (4)$$

где $R^{\text{ц}}$ – ресурсы целевой подсистемы СУПБ; $R^{\text{о}}$ – ресурсы обеспечивающей подсистемы СУПБ.

Предложенная аналитическая модель системы управления пожарной безопасностью на АЭС позволяет в условиях воздействий негативных факторов определить интенсивности деятельности соответствующих подсистем СУПБ, удовлетворяющих требуемым показателям эффективности функционирования модели системы при дифференциальных связях, наложенных на вероятности состояний системы, ограничениях на интенсивности деятельности соответствующих подсистем СУПБ, ресурсы СУПБ, соответствующих граничных условиях.

Разработанный инструмент позволяет оценивать эффективность проведения профилактических мероприятий, прогнозировать результаты деятельности СУПБ на АЭС и вырабатывать определенные требования к ее деятельности для поддержания необходимого показателя эффективности. Предложенный методический аппарат может быть применен для разработки исходных данных и выработки решений руководящим составом АЭС, а также систем поддержки принятия решения при управлении пожарной безопасностью АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12.1.004.91 Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования [Текст].

2. ВСН–001–87. Противопожарные нормы проектирования АЭС [Текст].

3. НПБ 88–2001. Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования [Текст].

4. **Топольский, Н.Г.** Автоматизация систем предотвращения предпожарных режимов на АЭС [Текст]/ Н.Г. Топольский, С.Г. Гордеев//Матер. IV Междунар. конф. Информатизация систем безопасности.–ИСБ–95.–М.: МИПБ МВД России, 1995.–С. 143–45.

5. **Землянухин, М.В.** Задачи совершенствования систем пожарной сигнализации объектов атомной энергетики [Текст]/М.В. Землянухин//Матер. XIII Междунар. конф. Системы безопасности–СБ–2004. –М.: Академия ГПС МЧС России, 2004. –С. 223–225.

6. **Членов, А.Н.** Анализ тенденций развития технических средств пожарной сигнализации [Текст]/ А.Н. Членов, М.В. Землянухин., А.В. Родионов// Матер. XIII науч.–техн. конф. Системы безопасности–СБ 2004.–М.: Академия ГПС МЧС России, 2004. –С. 220–223.

7. **Матвеев, А.В.** Системное моделирование управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций: Дисс. … канд. техн. наук [Текст]/А.В. Матвеев. –СПб УГПС МЧС России, 2007.

8. **Матвеев, А.В.** Обеспечение безопасности хозяйствующего субъекта на основе управления пожарным рискомпьютер [Текст]/А.В. Матвеев, М.В. Иванов, А.Б. Шевченко// Матер. XII Всерос. конф. по проблемам науки и высш. шк; Сб. Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах. –СПб., 2008.

9. **Гнеденко, Б.В.** Введение в теорию массового обслуживания [Текст]/Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. –М.: Наука, 1966.

УДК 621.43.001.5

В.А. Атрощенко, Ю.Д. Шевцов, Р.А. Дьяченко, Н.А. Брагин

К ВОПРОСУ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ДЭС ПО ПАРАМЕТРАМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛЯНОГО ОЧИСТИТЕЛЯ

Исследование и сравнительный анализ диагностических параметров ДВС на информативность позволил определить наиболее информативную систему двигателя – систему смазки, позволяющую получить обобщенную оценку технического состояния двигателя в целом:

по гидравлическим сопротивлениям масляных очистителей (фильтра и центрифуги), изменяющимся в зависимости от количественного и качественного состава отложений на фильтрующей перегородке и роторе центрифуги;

по уровню, составу и кинетике накопления загрязнений в смазочном масле.

Существует множество комбинаций подключения очистителей в системах смазки различных двигателей. Выбор оптимальной схемы системы очистки определяется, во-первых, ее эффективностью, с точки зрения защиты пар трения и удаления из масла загрязнений, во-вторых, обеспечением на ее выходе заданных гидравлических параметров.

Анализ конструктивных решений, способов и устройств улучшения систем очистки различных типов показывает, что с точки зрения эффективности очистки наилучшая защита пар трения достигается при использовании полнопоточной тонкой очистки масла фильтром и установке частичнопоточной центрифуги на ответвлении.

Одновременная установка на двигателе фильтров тонкой очистки и реактивной масляной центрифуги продиктована следующими соображениями. В начальный период работы идет интенсивный процесс окисления масла и, следовательно, увеличение количества загрязнений в нем. Однако до определенного момента, пока достаточно эффективно действуют диспергирующие присадки, размеры механических примесей, накапливающихся в масле, невелики (0,5–1 мкм). Поэтому фильтр тонкой очистки с порами фильтрующей перегородки до 30 мкм не в состоянии отделять такие частицы. В этот период основную функцию берет на себя реактивная центрифуга. С течением времени процессы окислительной полимеризации в масле стабилизируются. Но при неработающем фильтре уровень концентрации загрязняющих примесей велик. Основная масса загрязнений имеет органическое происхождение и при определенной величине концентрации они оказывают положительное действие на процессы трения, нивелируя соприкасающиеся поверхности и, тем самым, снижая износ. Но при дальнейшем увеличении их концентрации диспергирующее действие присадок уменьшается, частицы укрупняются и откладываются на различных деталях. В этот период начинают работать в полную силу фильтры. При этом они отбирают в основном частицы менее плотные, но крупные, препятствуя образованию лаков и низкотемпературных отложений, а центрифуги отбирают частицы, имеющие большую плотность (продукты износа, пыль и т. д.), снижая, таким образом, интенсивность абразивного износа.

Эффективность работы реактивной центрифуги зависит как от температурного режима, определяющего вязкость масла μ, так и от давления масла p, определяемого режимом работы и степенью изношенности двигателя. При номинальном режиме эффективность очистки у центрифуги выше, чем у фильтра тонкой очистки с одинаковыми массо-габаритными показателями. Однако эффективность очистки существенно снижается в период пуска двигателя, когда давление в магистрали мало, а частота вращения ротора не достигла своих номинальных оборотов. В связи с этим, считается нецелесообразным ставить центрифугу на очистку полного потока, поскольку в момент запуска к трущимся деталям могут попасть крупные частицы загрязнений.

В связи со сказанным, особую важность приобретает требование, которое должно предъявляться к выбору максимально допустимой величины гидравлического сопротивления полнопоточных фильтров, состоящее в том, что эта величина должна исключать возможность открытия предохранительного клапана в первый момент после пуска.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что параметры очистителей, подключенных различными способами, дающие информацию о степени, характере и составе загрязнений, откладывающихся на роторе центрифуги и фильтроэлементах, и гидравлические параметры масляной магистрали являются важными диагностическими параметрами, по которым можно оценивать фактическое техническое состояние двигателя

Обосновано, что для получения наиболее полной информации о техническом состоянии двигателя целесообразно использовать способы и средства функционального диагностирования, основанные на определении параметров частотных характеристик очистителей масла и отслеживании динамики их изменения в процессе эксплуатации агрегата. С этой целью необходимо получить модели очистителей в виде передаточных функций.

Получение математической модели реактивной масляной центрифуги осуществляется так же, как и модели полнопоточного масляного фильтра согласно теории пневмогидравлических цепей, используя электрическую аналогию при описании поведения гидравлических элементов системы смазки [1]. Модель центробежного очистителя была получена по следующей методике.

1. Экспериментальное определение амплитудных и фазовых частотных характеристик очистителя.

2. Получение вида передаточной функции по экспериментальным логарифмическим амплитудным (ЛАЧХ) и фазовым (ЛФЧХ) частотным характеристикам.

3. Синтез схемы замещения в электрических аналогах элемента очистки по виду передаточной функции с учетом его конструктивных особенностей.

4. Составление системы уравнений по синтезированной электрической схеме и получение вида передаточной функции.

5. Определение параметров полученных частотных характеристик, которые однозначно изменяются по мере загрязнения очистителей в процессе эксплуатации двигателя.

6. Получение эталонных частотных характеристик центрифуги при нормальном функционировании двигателя для чистого и максимально загрязненного ротора.

В результате проведения экспериментальных исследований получены частотные характеристики реактивной масляной центрифуги для различных схем подключения, различных режимов ее работы и степени загрязнения, и по ним определен вид передаточной функции. По виду передаточной функции синтезирована схема замещения в электрических аналогах. Схемы замещения реактивной центрифуги представлены на рис. 1.

Система дифференциальных уравнений, со-

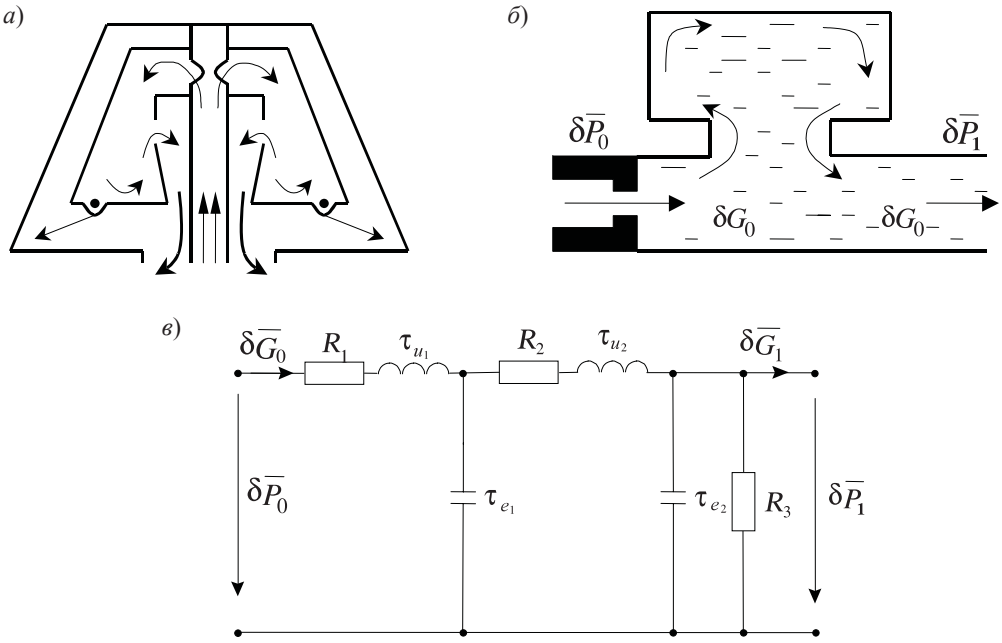


Рис. 1. Схемы замещения реактивной масляной центрифуги:
а – конструктивная; *б* – гидравлическая; *в* – в электрических аналогах

ставленная по электрической схеме замещения, имеет вид:

$$\left.\begin{aligned}
&\delta\overline{G}_0-\delta\overline{G}_{\tau_{e_1}}-\delta\overline{G}_{R_2}=0;\\
&\delta\overline{G}_{R_2}-\delta\overline{G}_{\tau_{e_2}}-\delta\overline{G}_{R_3}-\delta\overline{G}_1=0;\\
&\delta\overline{G}_0\cdot R_1+\tau_{u_1}\cdot\frac{d(\delta\overline{G}_0)}{dt}+\frac{1}{\tau_{e_1}}\cdot\int\delta\overline{G}_{\tau_{e_1}}\cdot dt-\delta\overline{P}_0=0;\\
&\delta\overline{G}_{R_2}\cdot R_2+\frac{1}{\tau_{e_2}}\cdot\int\delta\overline{G}_{R_3}\cdot dt+\tau_{u_2}\cdot\frac{d(\delta\overline{G}_{R_4})}{dt}-\frac{1}{\tau_{e_1}}\cdot\int\delta\overline{G}_{\tau_{e_1}}\cdot dt=0;\\
&-\frac{1}{\tau_{e_2}}\cdot\int\delta\overline{G}_{R_3}\cdot dt+\delta\overline{G}_{R_3}\cdot R_3=0;\\
&-\delta\overline{G}_{R_3}\cdot R_3+\delta P_1=0.
\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

Используя преобразование Лапласа для составленных уравнений, определяем два вида передаточных функций $W_{ц_1}(s)=\dfrac{\delta\overline{p}_0}{\delta\overline{G}_0}$ и $W_{ц_2}(s)=\dfrac{\delta\overline{p}_1}{\delta\overline{p}_0}$, описывающих поведение частично-поточной реактивной центрифуги, т. е. подключенной в сливную магистраль, когда $Z_н = 0$. Передаточные функции, АЧХ и ФЧХ реактивной центрифуги определяются следующими выражениями.

1. Передаточная функция, оценивающая входное сопротивление:

$$W_{ц_1}(s)=\frac{\delta\overline{p}_0}{\delta\overline{G}_0}=Z_{вх}=\frac{k_1(T_5^2s^2+2\xi_5T_5s+1)(Ts+1)}{T_5^2s^2+2\xi_5T_5s}.\quad(2)$$

Модуль и аргумент выражения (2) определяют амплитудную и фазовую частотные характеристики входного сопротивления реактивной центрифуги:

$$A_{ц_1}(\omega)=\frac{k_1\sqrt{(1-T_5^2\omega^2)^2+4\cdot\xi_5^2T_5^2\omega^2}\cdot\sqrt{1+T^2\omega^2}}{\sqrt{T_5^4\omega^4+4\cdot\xi_5^2T_5^2\omega^2}},\quad(3)$$

$$\varphi_{ц_1}(\omega)=\operatorname{arctg}\frac{2\xi_5T_5\omega}{1-T_5^2\omega^2}-\operatorname{arctg}\frac{2\cdot\xi_5T_5\omega}{T_5^2\omega^2}+\operatorname{arctg}T\omega,\quad(4)$$

где $A_{ц_1}(\omega)$ – амплитудная частотная характеристика (АЧХ); $\varphi_{ц_1}(\omega)$ – фазовая частотная характеристика (ФЧХ); $T=\dfrac{\tau_{u_1}}{R_1}$; $T_5=\sqrt{\tau_{u_1}\tau_{e_1}}$ – постоянные времени; $\xi_5=\dfrac{R_1\tau_{e_1}}{2\sqrt{\tau_{u_1}\tau_{e_1}}}$ – коэффициент демпфирования; $k_1 = R_1$ – коэффициент усиления.

Передаточная функция, оценивающая входное сопротивление $W_{ц_1}(s)=\dfrac{\delta\overline{p}_0}{\delta\overline{G}_0}=Z_{вх}$ может использоваться для получения модели системы смазки в целом, необходимой для описания ее работы в динамике с целью управления процессами смазки, трения и износа трущихся деталей двигателя.

2. Передаточная функция, оценивающая соотношение давлений на входе и выходе центрифуги и ее АЧХ и ФЧХ:

$$W_{ц_2}(s)=\frac{\delta\overline{p}_1}{\delta\overline{p}_0}=\frac{k}{(T_1^2s^2+2\xi_1T_1s+1)(T_2^2s^2+2\xi_2T_2s+1)};\quad(5)$$

$$A_ц(\omega)=\frac{k}{\sqrt{(1-T_1^2\omega^2)^2+4\cdot\xi_1^2T_1^2\omega^2}\cdot\sqrt{(1-T_2^2\omega^2)^2+4\cdot\xi_2^2T_2^2\omega^2}},\quad(6)$$

$$\varphi_ц(\omega)=-\operatorname{arctg}\frac{2\cdot\xi_1T_1\omega}{1-T_1^2\omega^2}-\operatorname{arctg}\frac{2\cdot\xi_2T_2\omega}{1-T_2^2\omega^2},\quad(7)$$

где $A_ц(\omega)$ – амплитудная частотная характеристика; $\varphi_ц(\omega)$ – фазовая частотная характеристика; $k=\dfrac{R_3}{R_2+R_3}$ – коэффициент усиления; $T_1=\sqrt{\tau_{u_1}\tau_{e_1}}$, $T_2=\sqrt{\dfrac{R_3\tau_{u_2}\tau_{e_2}}{R_2+R_3}}$ – постоянные времени;

$\xi_1=\dfrac{R_1\tau_{e_1}}{2\cdot\sqrt{\tau_{u_1}\tau_{e_1}}}$, $\xi_2=\dfrac{\dfrac{R_2R_3\tau_{e_2}+\tau_{u_2}}{R_2+R_3}}{2\cdot\sqrt{\dfrac{R_3\tau_{u_2}\tau_{e_2}}{R_2+R_3}}}$ – коэффициенты демпфирования.

Передаточная функция, оценивающая соотношение давлений на входе и выходе центрифуги $W_{ц_2}(s)=\dfrac{\delta\overline{p}_1}{\delta\overline{p}_0}$, может быть использована для диагностики технического состояния очистителей масла в исследуемой схеме системы смазки и двигателя в целом.

Для реактивной центрифуги определяющим параметром схемы замещения ее гидравлического сопротивления является емкостная составляющая τ_{e_1}, которая изменяется пропорционально уменьшению объема жидкости по мере загрязнения ротора центрифуги $\tau_{e_1}=\dfrac{V_ж p}{a_ж^2G}$, где $a_ж$ – скорость звука в жидкости; $V_ж$ – объем непроточной емкости (объем ротора центрифуги); p, G – текущие значения давления и расхода жидкости (моторного масла) в магистрали.

Изменение этой составляющей приведет к изменению всех параметров АЧХ и ФЧХ центрифуги. Остальные параметры, входящие в выражения АЧХ и ФЧХ центрифуги R_1, R_2, R_3, τ_{u_1}, τ_{u_2}, τ_{e_2} определяют местные сопротивления в конструкции центрифуги, инерционные и упругие свойства жидкости, которые в процессе отсеивания загрязняющих частиц из масла остаются постоянными.

Оценка технического состояния системы смазки и двигателя в целом по параметрам центробежного масляного очистителя осуществляется следующим образом, согласно способу, описанному в [2]. Здесь измеряется величина сдвига фаз между пульсациями давления масла на входе и выходе масляной центрифуги. Информация о величине сдвига фаз используется для определения объема осадка V, масса которого m определяется путем измерения продолжительности истечения масла при выбеге двигателя с заданного режима холостого хода. По величинам объема и массы осадка вычисляют его плотность

$$\rho_{ос} = \frac{V}{m} \qquad (8)$$

и по ней определяют место повышенного износа механически сопряженных деталей.

Алгоритм работы технических средств, выполненный согласно описанному способу, заключается в следующем: сначала определяют параметры (например, ω_{ci} – собственную частоту, φ_i – величину сдвига фаз между пульсациями давления масла на входе и выходе масляной центрифуги и $\rho_{ос}$ – плотность осадка центрифуги), оценивающие техническое состояние самого очистителя, а затем, по изменению этих параметров и другим признакам представляют информацию о техническом состоянии всей системы и двигателя в целом.

Структурная схема устройства определения информации о техническом состоянии очистителя двигателя ДЭС по интенсивности накопления отложений в роторе центробежного очистителя представлена на рис. 2. Работа основных элементов устройства заключается в следующем:

датчики давления Д1 и Д2 выдают электрический сигнал, пропорциональный изменению давлений в масляной магистрали на входе и выходе центрифуги, блоки разложения БР1 и БР2 раскладывают сигналы пульсаций давления масла на гармонические составляющие, блок сравнения БС определяет отклонение частотных характеристик центрифуги $\Delta A_ц(\omega)$ и $\Delta\varphi_ц(\omega)$ от эталонных, соответствующих определенной величине объема осадка в роторе центрифуги $V_{ос}$, и подают сигнал на вход вычислительного устройства ВУ;

измеритель времени истечения масла из ротора центробежного очистителя измеряет указанное время при выбеге двигателя с заданного режима холостого хода и подает соответствующий сигнал, пропорциональный массе осадка $m_{ос}$ в роторе, на другой вход ВУ; вычислительное устройство определяет величину объема осадка $V_{ос}$ в роторе

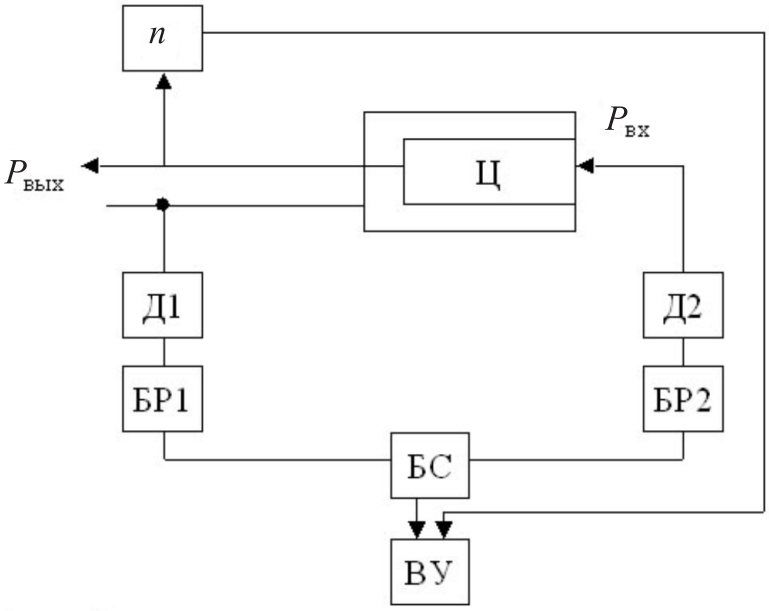


Рис. 2. Структурная схема устройства
Ц – центробежный очиститель масла

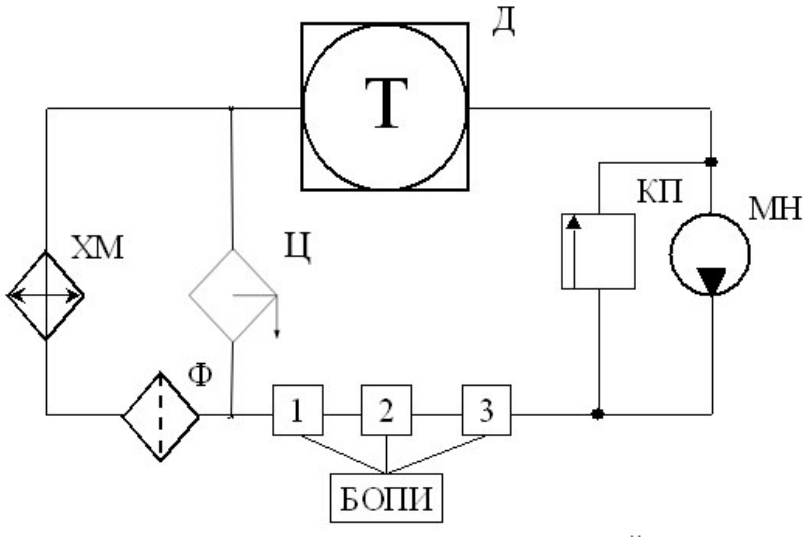


Рис. 3. Структурная схема устройства

центробежного очистителя и его плотность по выражению $\rho_{ос} = \frac{m_{ос}}{V_{ос}}$ и выдает заключение о степени износа узлов двигателя.

Структурная схема устройства, предложенного в способе оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания [3], предназначенного для получения информации о техническом состоянии двигателя ДЭС по изменению физико-химических параметров масла, представлена на рис. 3 (где ХМ – холодильник масляный; Д – двигатель; КП – клапан перепускной; МН – масляный насос; Ц – центрифуга; Ф – фильтр). Функционирование основных элементов устройства заключается в следующем:

датчик 1 обеспечивает выделение и контроль наличия магнитных металлических примесей; датчик 2 обеспечивает выделение и контроль металлических немагнитных примесей; датчик 3 обеспечивает контроль органических примесей в масле.

Информация о степени изменения электрических параметров указанных датчиков поступает в блок обработки и представления информации БОПИ, где анализируются условия работы и материал трущихся деталей. Затем выдается вероятностный диагноз для принятия решения о техническом состоянии двигателя.

Таким образом, разработанная математическая модель очистителя масла двигателя дает возможность получить эталонные характеристики изменения степени загрязнения и качественного состава осадка в роторе центрифуги. Предложенные способы и реализующие его устройства позволяют оценивать техническое состояние двигателя в целом, путем сравнения совокупности контролируемых параметров с эталонным комплексом.

Автор выражает благодарность А.И. Красову за помощь при подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гликман, Б.Ф.** Математические модели пневмогидравлических систем [Текст]/Б.Ф. Гликман.–М.: Наука, 1986.–368 с.

2. **Атрощенко, В.А.** Технические возможности повышения ресурса автономных электростанций энергетических систем: Монография [Текст]/В.А. Атрощенко, Ю.Д. Шевцов, П.В. Яцынин, Р.А. Дьяченко [и др.].–Краснодар: Издат. Дом «Юг», 2010.–192 с.

3. **Козицкий, В.М.** Способ оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания [Текст]/В.М. Козицкий, М.Л. Лысенко, Ю.Д. Шевцов// АС(СССР) №1814044. Опубл. Б.И. 1993.–№ 17.

УДК 004.932

Ю.В. Блохин

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Наиболее сложную и важную часть подвижных объектов составляет система управления. Именно от того, какие задачи может решать система управления, зависят функциональные и «интеллектуальные» возможности этих объектов. В идеале система управления должна решать следующие основные задачи:

восприятие и обработка информации об окружающей среде;

поиск, обнаружение, захват и сопровождение целей;

планирование и управление работой объекта.

Кроме сложностей чисто алгоритмического плана при создании систем распознавания и сопровождения подвижных объектов возникает не менее сложная проблема обеспечения режима реального времени при решении перечисленных выше задач. Действительно, решение всего комплекса задач, возлагаемых на систему, должно осуществляться в темпе с процессом, т. е. в реальном времени. Последнее обстоятельство затрудняет использование стандартных средств вычислительной техники для реализации систем управления автономных подвижных объектов и требует принципиально новых технических решений, отличающихся от известных спецификой, производительностью, малыми габаритами и высокой надежностью [1].

Цель данной статьи – исследование процессов, происходящих в устройстве обработки видеоизображения, на основе которых возможен выбор аппаратных компонентов для реализации системы технического зрения (СТЗ) и определения задержки передачи видеоинформации оператору.

До начала построения системы обработки видеоизображения необходимо определить требования, предъявляемые к оборудованию. В системах реального времени особое значение занимает качество изображения и задержка отображения видеоизображения оператору. Рассмотрим систему в целом и определим зависимости от исходных и требуемых параметров.

Система технического зрения состоит из двух частей: бортовой системы и системы отображения видеоинформации оператору (рис. 1). В бортовой системе осуществляется получение видеоизображения, последующая обработка и передача в канал связи. На стороне оператора происходит прием информации, последующая ее расшифровка и вывод изображения на монитор оператора. В зависимости от предъявляемых требований к СТЗ могут изменяться параметры оборудования, но в целом компоненты системы остаются неизменными.

Как говорилось ранее, основными параметрами СТЗ являются качество изображения и задержка получения информации. Качество определяется разрешением и скоростью обновления изображений, а задержка зависит от оборудования, применяемого в системе, и алгоритмов об-

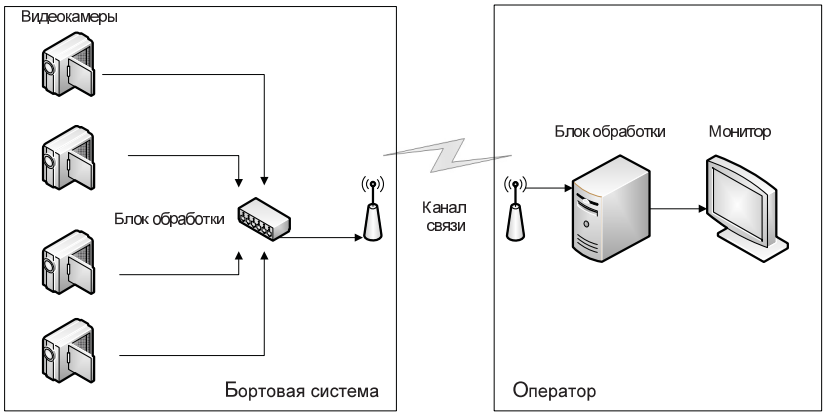


Рис. 1. Состав системы технического зрения

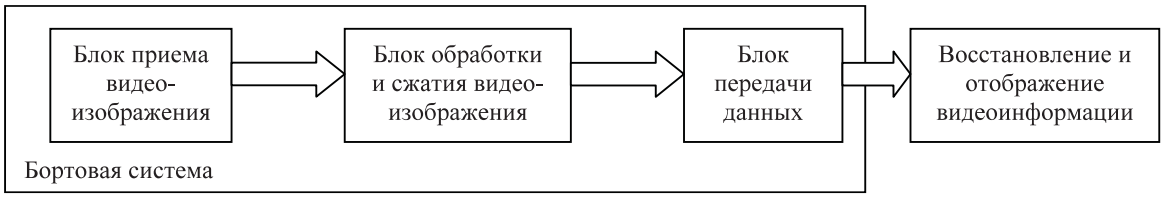


Рис. 2. Структурная схема обработки видеоинформации

работки. Требования к параметрам можно задать в числовом выражении для подбора необходимых видеокамер и монитора оператора СТЗ.

Для определения необходимых минимальных требований к остальному оборудованию и вычисления задержки требуется построить математическую модель СТЗ. Передачу обработанной информации будем осуществлять по сети Ethernet.

Построение модели. Обобщенно блок бортовой системы для обработки и передачи видеоизображения можно представить в виде трех частей, как видно на рис. 2.

На основе данной структуры построим модель СТЗ [2]. С помощью модели мы можем проанализировать необходимые ресурсы и мощности для реализации устройств обработки видеоинформации [3]. Рассмотрим каждый из блоков и связи между ними [4].

Блок приема. Блок приема видеоизображения можно разделить на два типа: прием с цифровой видеокамеры и прием с аналоговой камеры. Оба типа приема видеоизображения имеют одинаковое свойство передачи оцифрованных данных блоками с пропусками между линиями и кадрами. Различие между ними – в форматах цифровых данных, выдаваемых на выходе.

Для оцифровки видеоизображения с аналоговых камер используются специализированные ИС – видео АЦП [5]. Формат цифровых данных определяется в зависимости от выбора и настроек конкретной ИС.

Для примера построим модель источника видеосигнала PAL/SECAM.

Период вертикальной синхронизации будет равен:

$$T_{\text{верт}} = 1/U = 1/50 = 0{,}02 \text{ с}.$$

В сигнале PAL 625 строк. Из них 576 строк несут информацию о самом видеоизображении. Так как в одном кадре находятся два поля видеоизображения, получаем следующую скважность импульсов:

$$S_{\text{верт}} = \frac{625-576}{2\times 625}\times 100\,\% = 3{,}92\ \%.$$

Период горизонтальной синхронизации (HREF) будет равен:

$$T_{\text{гориз}} = \frac{2\times T_{\text{верт}}}{625} = 0{,}04/625 = 0{,}000064 = 64 \text{ мкс}.$$

Скважность горизонтальной синхронизации можно получить, оценив количество данных, выданных источником за время $T_{\text{гориз}}$, и, соответственно, отношения общего количества к реальному объему данных (active video data):

$$S_{\text{гориз}} = \frac{C}{T_{\text{гориз}}\times \upsilon_{llc}} = 1440/(64\times 10^{-6}\times 27\times 10^{6})\times 100\,\% = 83{,}33\ \%.$$

Период четности поля определяется из следующего выражения:

$$T_{\text{четн}} = \frac{2}{N_{\text{полей}}} = 2/50 = 0{,}04 \text{ с}.$$

Скважность сигнала четности поля:

$$S_{\text{четн}} = \frac{1}{N_{\text{полей}}} = 1/50\times 100\,\% = 50\ \%.$$

Блок обработки. Обработку видеоизображения можно разделить на три составляющие:

буферизация данных;

обработка данных;

пересылка блока обработанных данных.

В результате процесса оцифровки видеоизображения образуется большой объем цифровой информации (данных). Каждая секунда видеоданных эквивалентна 170 млн бит (Мб) данных. Сигнал необходимо сжимать для уменьшения потока передаваемой информации.

Сжатие видеоданных означает уменьшение количества данных с помощью математических формул. Для выполнения этого процесса применяют несколько математических функций. Это дискретное косинусное преобразование (ДКП) [6], адаптивное квантование и применение кодов с переменной длиной [7].

Обработка видеоинформации осуществляется блоками. Например, для получения ДКП-блоков необходима буферизация потока видеоданных в восемь видеострок. Так как изображение передается построчно, возникают задержки буферизации, величина которых рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{буф}} = T_{\text{гориз}}\times N = \frac{N\times S_{\text{гориз}}}{\upsilon} = 8\times 64 = 512 \text{ мкс},$$

где N – размерность ДКП-блока.

Время простоя шины между каждой линией кадра можно оценить по следующей формуле:

$$T_{\text{простоя}} = \frac{S - S_{\text{поле}}}{N_{\text{линий}} \times \upsilon}.$$

Время, необходимое для компрессии одного ДКП-блока, можно оценить по следующему выражению:

$$T_{\text{ДКП_комп}} = \frac{N_{\text{сжат}} \times N_{\text{ДКП_общ}}}{\upsilon_{\text{сжат}}}.$$

Из времени задержки буферизации $T_{\text{буф}}$ мы можем определить максимальное время обработки одного блока. Если значение времени обработки больше максимального, то устройство не будет справляться с поставленной задачей:

$$T_{\text{ДКП}} = \frac{T_{\text{буф}}}{N_{\text{ДКП}}} = 512/90 = 5{,}7 \text{ мкс},$$

где $N_{\text{дкп}}$ – количество блоков в буфере.

Определим $U_{\text{сжат}}$, минимальную тактовую частоту работы. Оценка сложности алгоритма обработки позволяет оценить среднее количество тактов, затрачиваемых на сжатие одного ДКП-блока, например, для одного ядра процессора DSP TMS320DM620 это составляет около 3000 тактов:

$$\upsilon_{\text{сжат}} = \frac{N_{\text{сжат}} \times N_{\text{ДКП_общ}}}{T_{\text{ДКП}}} = 3000/0{,}0000057 = 527 \text{ МГц}.$$

Учитывая, что данная тактовая частота является минимальной, процесс компрессии необходимо распараллеливать для уменьшения тактовой частоты. Например, при двух блоках обработки видеоданных мы получаем минимальную частоту, равную 264 МГц. При N_{cpu} блоков обработки видеоданных получаем выражение:

$$\upsilon_{\text{сжат}} = \frac{N_{\text{сжат}} \times N_{\text{ДКП_общ}}}{T_{\text{ДКП}} \times N_{\text{cpu}}}.$$

Данная структура содержит N_{cpu} блоков обработки данных, работающих независимо друг от друга, а также две памяти, в которых хранятся отдельно сжатые и несжатые данные. Блок управления и арбитраж шин обеспечивает разрешение конфликтов доступа к шинам данных, а также управление блоками обработки данных.

Оценим пропускную способность шины. По шине передаются как сжатые, так и несжатые видеоданные. Для одного источника видеоданных мы имеем следующий поток входных данных:

$$\upsilon_{\text{вх_данные}} = \upsilon_{\text{данных}} \times S_{\text{данных}} = 45 \times 10^6 \times 0{,}5 = 22{,}5 \text{ МБ/с}.$$

Для черно-белого изображения соответственно:

$$\upsilon_{\text{вх_данные_чб}} = \upsilon_{\text{данных_чб}} \times S_{\text{данных_чб}} = 45 \times 10^6 \times 0{,}25 = 11{,}25 \text{ МБ/с}.$$

То есть нет разницы между потоками от одной видеокамеры с цветным изображением и двумя камерами с черно-белым изображением. Что позволяет увеличить количество каналов или качество передаваемого изображения. Коэффициент сжатия блока обработки данных будем считать равным 30–50, что соответствует стандарту JPEG. Соответственно, получаем объем данных:

$$\upsilon_{\text{вых_данных}} = \frac{\upsilon_{\text{вх_данных}}}{K} = \frac{22{,}5}{30} = 0{,}75 \text{ МБ/с}.$$

Общий объем данных через шину будет составлять:

$$\upsilon_{\text{общ_данных}} = \upsilon_{\text{вых_данных}} + \upsilon_{\text{вх_данных}} = 24 \text{ МБ/с}.$$

При внутренней частоте шины памяти более 40 МГц такой объем данных можно переслать.

Минимальное время ожидания накопления блока данных для сжатия составляет 512 мкс. Суммируя возможную задержку, полученную на входе, получаем задержку в 768 мкс.

Передача данных. Передатчик осуществляет передачу данных по сети Ethernet по протоколу UDP. UDP простой, ориентированный на передачу датаграмм, протокол транспортного уровня: за один раз процесс выдает одну UDP датаграмму, в результате чего передается одна IP датаграмма. Формирование заголовка производится с помощью копирования шаблонного заголовка с указанием портов источника и назначения, кроме контрольной суммы. Контрольная сумма UDP охватывает UDP заголовок и UDP данные и вычисляется самостоятельно.

В итоге получаем задержку на вычисление контрольной суммы:

$$T_{\text{общ}} = \frac{N_{\text{общ}} \times V_{\text{пакета}}}{\upsilon} = \frac{10 \times 1500}{20 \times 10^6} = 750 \text{ мкс}.$$

Также оценим время считывания блока данных:

$$T_{\text{чтения}} = \frac{V_{\text{пакета}}}{\upsilon} = \frac{1500}{20 \times 10^6} = 75 \text{ мкс}.$$

Учитывая задержки передачи по сети Ethernet, суммарную задержку можно представить для пакетов UDP в следующем виде:

$$T_{\text{общ_передачи}} = T_{\text{общ}} + T_{\text{чтение}} = T.$$

T – задержка определяется оборудованием, используемым в сети. При прямом соединении

источников она может составлять 100–150 мкс в одну сторону. В результате получаем:

$$T_{\text{общ_передачи}} = 750 + 75 + 150 = 975 \text{ мкс}.$$

В данном выражении не учтены задержки, возникающие при обработке пакетов на стороне клиента и оборудовании между передатчиком и клиентом. Так как мы знаем минимальную задержку передачи, требуемую на формирование пакета, мы можем оценить максимальный поток данных, передаваемый блоком передатчика:

$$V_{\text{общ_передачи}} = \frac{V_{\text{пакета}}}{T_{\text{общ}} + T_{\text{чтения}}} = 1{,}43 \text{ МБ/с}.$$

Исходя из этого значения, зная суммарный поток данных, мы можем определить минимальные требования, предъявляемые к сжатию. Минимальный коэффициент сжатия должен составлять:

$$K_1 = \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{общ_передачи}}} = 22{,}5 / 1{,}43 = 16.$$

Для двух видеокамер соответственно:

$$K_2 = 2 \times K_1 = 32.$$

Также оценим задержку записи в буфер данных:

$$T_{\text{буф_передачи}} = \frac{V_{\text{пакета}}}{\upsilon} + T,$$

где T – возможная задержка доступа к шине.

Получаем:

$$T_{\text{буф_передачи}} = 0{,}0000666 = 67 \text{ мкс}.$$

Использование протокола UDP позволяет не заботиться об установке соединения. То есть сервер может не знать о том, сколько клиентов обрабатывают данные сервера. Это позволяет упростить работу модуля передачи, но при этом необходимо добавлять в каждый UDP пакет заголовок с меткой. По данной метке приемная сторона будет определять, к какой области видеоизображения относится данный пакет.

Таким образом, исходя из характеристик передатчика получаем задержку передачи данных от 1–2 мс и более. При этом коэффициент сжатия должен быть не менее 32 для двух видеокамер.

Результаты. Построенная модель проанализирована по каждому из блоков. Сделаны выводы для каждой из частей модели. Теперь просуммируем полученные результаты.

Время задержки в буфере входных данных может составлять до 256 мкс. Минимальное время ожидания накопления блока данных для сжатия составляет 512 мкс. Суммируя задержку, получаем 768 мкс. Задержка передачи данных передатчиком Ethernet от 1–3 мс и более. Задержка отображения составляет менее 1 мс.

В результате получаем задержку примерно в 4–5 мс. При этом коэффициент сжатия должен быть не менее 32 для двух видеокамер. Для достижения такого результата необходим микропроцессор, работающий на частоте более 2×527 МГц = 1054 МГц или 1100 MIPS.

Все внутренние шины обмена данных между блоками устройства должны работать на частоте не ниже 45 МГц. Такая частота работы предъявляет требования к разводке платы и организации памяти, т. к. устройство будет использоваться в бортовой системе, в жестких условиях.

Выведем результирующую зависимость задержки от параметров устройства:

$$T_{\text{СТЗ}} = T_{\text{вх}} + T_{\text{сжат}} + T_{\text{вых}}.$$

Рассмотрим каждое значение в отдельности: $T_{\text{вх}}$ – задержка приема видеоданных, $T_{\text{вх}} = V_{\text{ДКП_блок}} / \upsilon$; $V_{\text{ДКП_блок}}$ – минимальный размер макроблока данных, предназначенный для сжатия; υ – частота внутренней шины данных.

Максимальное время сжатия не может превышать время между двумя макроблоками:

$$T_{\text{сжат}} = T_{\text{гориз}} \times N = \frac{N \times S_{\text{линии}}}{\upsilon},$$

где T_{compress} – максимальное время сжатия; $T_{\text{гориз}}$ – время записи одной строчки видеоизображения; υ – частота источника данных; N – количество строчек.

Задержка сжатия привязана к стандарту видеоизображения и алгоритму сжатия:

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{общ_передачи}} + T_{\text{чтения}} + T =$$
$$= \frac{N_{\text{общ}} \times V_{\text{пакета}}}{\upsilon} + \frac{V_{\text{пакета}}}{\upsilon} + T_{\text{eth}},$$

где $T_{\text{вых}}$ – задержка передачи данных; $V_{\text{пакета}}$ – объем пакета передачи данных; υ – частота работы блока передачи данных;

Таким образом, мы получили обобщенную формулу задержки прохождения данных через устройство обработки видеоизображений.

На основе данных исследований можно провести выбор компонентов для построения системы технического зрения.

На рис. 3 показана зависимость времени задержки от внутренней частоты шины устройства. При частоте шины ниже 45 МГц данные начнут

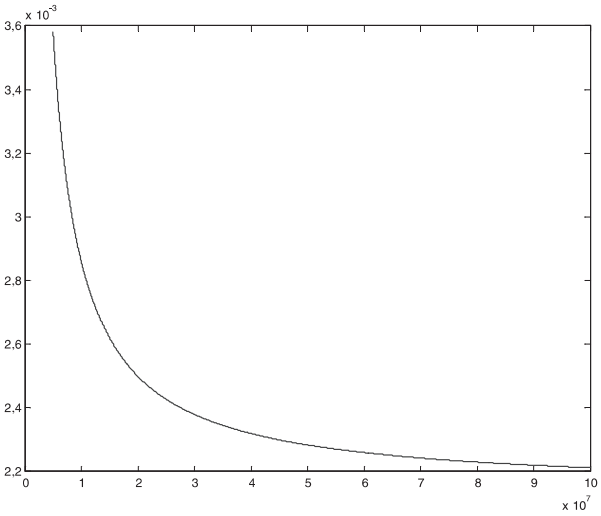


Рис. 3. График зависимости внутренней частоты и времени задержки

теряться, т. е. изображение не будет успевать полностью обновляться. Для буферизации данных потребуется минимум 1,77 Мбайт памяти.

Реализация устройства обработки видеоинформации возможна как на FPGA, так и с применением DSP процессоров. На основе данной модели был подобран процессор TMS320DM620 (6200MIPS, 16 исполнительных устройств) для параллельной обработки с четырех аналоговых камер.

Считаем, что на стороне оператора стоит мощная станция обработки информации. Так как она стационарная, то к ней не предъявляются такие жесткие требования по устойчивости к внешним воздействиям и размерам. Поэтому подробно рассматривать ее работу не будем, т. к. необходимо только декодировать полученную информацию через Ethernet и вывести ее на монитор. При работе станции под управлением операционной системы реального времени (RTOS), задержка обработки и отображения будет составлять не более 1 мс, что было подтверждено экспериментально.

В статье рассмотрен пример расчета требований, предъявляемых к оборудованию и программному обеспечению для системы технического зрения, а также предложена обобщенная структура обработки видеоинформации с минимальной задержкой для системы технического зрения дистанционно управляемого подвижного объекта. В данном примере блок обработки видеоизображений использует в качестве сжатия стандарт JPEG. Используя формулы, описанные выше, можно рассчитать задержку для более сложных алгоритмов потокового сжатия и обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках мероприятия 2 аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 гг.)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Строев, В.** Системы с искусственным интеллектом в сухопутных войсках [Текст]/В. Строев//Зарубежное военное обозрение.–1997.–№3.–С. 27–30.

2. **Терентьев, А.И.** Информационные технологии для моделирования систем автоматического управления [Текст]/А.И. Терентьев, П.К. Можаев. VIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Тезисы докладов. –М.: 28 февр. –1 марта 2002. Т. 1.–С. 373–374.

3. **Джон, М.Смит** Математическое и цифровое моделирование для инженеров исследователей [Текст]/Смит. Джон М. –М., 1980.

4. **Терентьев, А.И.** Имитационно-структурная система моделирования [Текст]/А.И. Терентьев, П.К. Можаев//IX Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Тезисы докладов.–Зеленоград, 17–18 апр. 2002. –С. 138.

5. **Калиткин, Н.Н.** Численные методы [Текст]/Н.Н. Калиткин.–М., 1996.

6. **Бахвалов, Н.С.** Численные методы [Текст]/Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков.–М., 1998.

7. **Преснухин, Л.Н.** Основы теории проектирования вычислительных приборов и машин управления [Текст]/Л.Н. Преснухин, Л.А. Соломонов.–М., 1970.

УДК 519.6; 519.17

Е.С. Букка, Р.А. Кочкаров

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА ВНУТРЕННЕГО ЦЕНТРА ПРЕДФРАКТАЛЬНОГО ГРАФА

В статье предложен параллельный алгоритм поиска внутреннего центра предфрактального графа, смежность старых ребер которого сохраняется. Алгоритм α_2^* построен для PRAM (Parallel Random Access Machine) – модели параллельной вычислительной системы [1].

Алгоритм α_2^*

Рассмотрим взвешенный предфрактальный граф $G_L = (V_L, E_L)$, порожденный ориентированной затравкой $H = (W, Q)$, смежность старых ребер которого сохраняется [2]. Затравка H является сильно связным графом, т. е. каждая вершина достижима из всякой другой вершины. Это означает также, что каждая вершина всего предфрактального графа достижима из всякой другой его вершины.

Алгоритм α_2^* использует k процессоров $\mathrm{Pr}_1, \mathrm{Pr}_2, ..., \mathrm{Pr}_k$, где $k = n^{L-1}$ [1, 3].

Опишем принцип работы алгоритма α_2^*. Алгоритм начинает свою работу с подграф-затравок L-го ранга $z_{s_L}^{(L)}$, $s_L = \overline{1, n^{L-1}}$. На последнем шаге порождения предфрактального графа G_L каждая вершина графа G_{L-1} была замещена затравкой H. Поскольку при порождении предфрактального графа действует правило сохранения смежности старых ребер, к каждой вершине G_{L-1} «привязываются» затравки одной из своих вершин. Назначим каждой подграф-затравке $z_{s_L}^{(L)}$ по одному процессору из Pr_{s_L}, $s_L = 1, 2, ..., n^{L-1}$.

Рассмотрим подграф-затравку $z_1^{(L)}$, т. к. затравка H является сильно связной, то для всякой ее вершины можно найти путь к любой другой. Процессор Pr_1 находит кратчайшие пути от $(n - 1)$ вершин $v_{j_1}^{(L)}$ подграф-затравки $z_1^{(L)}$ до «общей» вершины $x_1^{(L)}$. Среди кратчайших путей найдем максимальный и определим число $s_t(x_1^{(L)}) = \max\limits_{j_1=\overline{1,n-1}}[d(v_{j_1}^{(L)}, x_1^{(L)})]$, которое назовем *числом внутреннего разделения* вершины $x_1^{(L)}$ подграф-затравки $z_1^{(L)}$.

Таким образом, на первом шаге k процессоров $\mathrm{Pr}_1, \mathrm{Pr}_2, ..., \mathrm{Pr}_k$ параллельно и независимо друг от друга, находят числа внутреннего разделения $s_t(x_{s_L}^{(L)})$, каждый на своей подграф-затравке L-го ранга $z_{s_L}^{(L)}$:

$$s_t(x_{s_L}^{(L)}) = \max_{j_L=\overline{1,n-1}}[d(v_{j_L}^{(L)}, x_{s_L}^{(L)})], \text{ где } d(x_{s_L}^{(L)}, x_{s_L}^{(L)}) = 0.$$

Поиск кратчайших путей осуществляется с помощью известного алгоритма Дейкстры [4]. Алгоритм Дейкстры будет использоваться в качестве процедуры, вызываемой по мере необходимости.

Рассмотрим далее подграф-затравки $(L - 1)$-го ранга $z_{s_{L-1}}^{(L)}$, $s_{L-1} = \overline{1, n^{L-2}}$. Каждая из них в процессе порождения предфрактального графа G_{L-1} была привязана к вершинам предыдущего в траектории графа G_{L-2}, т. к. действует правило сохранения смежности старых ребер. Тогда каждая подграф-затравка $(L - 1)$-го ранга $z_{s_{L-1}}^{(L)}$ также имеет одну общую вершину с соответствующими затравками $(L - 2)$-го ранга $z_{s_{L-2}}^{(L)}$, $s_{L-2} = \overline{1, n^{L-3}}$. Назначим каждой подграф-затравке $z_{s_{L-1}}^{(L)}$ по одному процессору из $\mathrm{Pr}_{s_{L-1}}$, $s_{L-1} = \overline{1, n^{L-2}}$.

На втором шаге n^{L-2} процессоров $\mathrm{Pr}_{s_{L-1}}$ параллельно находят числа внутреннего разделения каждый для своей подграф-затравки $(L - 1)$-го ранга $z_{s_{L-1}}^{(L)}$, $s_{L-1} = \overline{1, n^{L-2}}$:

$$s_t(x_{s_{L-1}}^{(L-1)}) = \max_{j_{L-1}=\overline{1,n-1}}[d(v_{j_{L-1}}^{(L-1)}, x_{s_{L-1}}^{(L-1)}) + s_t(x_{s_L}^{(L)})],$$

где $d(x_{s_{L-1}}^{(L-1)}, x_{s_{L-1}}^{(L-1)}) = 0$. То есть осуществляется поиск кратчайших путей от $(n - 1)$ вершин $v_{j_{L-1}}^{(L-1)}$ подграф-затравки $z_{s_{L-1}}^{(L)}$ до общей вершины $x_{s_{L-1}}^{(L-1)}$. Далее, к длине кратчайшего пути $d(v_{j_{L-1}}^{(L-1)}, x_{s_{L-1}}^{(L-1)})$ добавляется соответствующее число разделения $s_t(x_{s_L}^{(L)})$, найденное для подграф-затравок предыдущего ранга, и среди получившихся сумм выбирается максимальная. Заметим, что $s_t(x_{s_L}^{(L)})$ – число внутреннего разделения той вершины, от которой начинается путь $d(v_{j_{L-1}}^{(L-1)}, x_{s_{L-1}}^{(L-1)})$. Можно считать, что добавляем $s_t(x_{s_L}^{(L)}) = s_t(v_{j_{L-1}}^{(L-1)})$. Сумма $d(x_{s_{L-1}}^{(L-1)}, x_{s_{L-1}}^{(L-1)}) + s_t(x_{s_L}^{(L)}) = s_t(x_{s_L}^{(L)})$, так как $d(x_{s_{L-1}}^{(L-1)}, x_{s_{L-1}}^{(L-1)}) = 0$.

Указанным способом находим числа внутреннего разделения $s_t(x_{s_l}^{(l)})$ для общих вершин $x_{s_l}^{(l)}$ подграф-затравок $z_{s_l}^{(l)}$, $s_l = \overline{1, n^{l-1}}$ до 2-го ранга включительно, т. е. для всех $l = L, L-1, ..., 2$. На каждом шаге $l = L, L-1, ..., 2$ подграф-затравкам $z_{s_l}^{(l)}$ назначаются процессоры Pr_{s_l}, $s_l = \overline{1, n^{l-1}}$.

На последнем шаге $l = 2$ найдены числа разделения $s_t(x_{s_2}^{(2)})$, $s_2 = \overline{1, n}$ для общих вершин $x_{s_2}^{(2)}$ подграф-затравок 2-го ранга $z_{s_2}^{(2)}$ и одной подграф-затравки первого ранга $z_{s_1}^{(1)} = z_1^{(1)}$. Подграф-затравка $z_1^{(1)}$ по сути соответствует графу G_1 из траектории G_1, G_1, ..., G_L. Тогда для каждой вершины подграф-затравки $z_1^{(1)}$ найдено число $s_t(x_{s_2}^{(2)})$, $s_2 = \overline{1, n}$.

Далее рассматриваем подграф-затравку $z_1^{(1)}$, которой назначим процессор Pr_1. Процессор Pr_1 находит для каждой ее вершины $x_{s_1}^{(1)}$ число внутреннего разделения: $s_t(x_{s_1}^{(1)}) = \max\limits_{j_1=\overline{1,n-1}}[d(v_{j_1}^{(1)}, x_{s_1}^{(1)}) + s_t(x_{s_2}^{(2)})]$. Вершина x_o^*, для которой число внутреннего разделения $s_t(x_t^*)$ минимальное является внутренним центром предфрактального графа G_L: $s_t(x_t^*) = \min\limits_{s_1=1, 2, ..., n}[s_t(x_{s_1}^{(1)})]$.

Представим далее алгоритм α_2^*, где для поиска кратчайшего пути между двумя любыми вершинами графа используется процедура Дейкстры.

Алгоритм α_2^*

Вход: взвешенный предфрактальный граф $G_L = (V_L, E_L)$.

Выход: x_t^* – внутренний центр предфрактального графа G_L.

Шаг 1. (1) Назначим каждый из $k = n^{L-1}$ процессоров Pr_1, Pr_2, ..., Pr_k подграф-затравкам $z_{s_L}^{(L)}$, $s_L = \overline{1, n^{L-1}}$. Каждый процессор будет обрабатывать только назначенную ему подграф-затравку.

(2) Одновременно k процессоров Pr_1, Pr_2, ..., Pr_k параллельно и независимо друг от друга находят числа внутреннего разделения $s_t(x_{s_L}^{(L)})$, каждый на назначенной ему подграф-затравке L-го ранга $z_{s_L}^{(L)}$: $s_t(x_{s_L}^{(L)}) = \max\limits_{j_L=\overline{1,n-1}}[d(v_{j_L}^{(L)}, x_{s_L}^{(L)})]$, где $d(x_{s_L}^{(L)}, x_{s_L}^{(L)}) = 0$. Поиск кратчайших путей между вершинами осуществляется с помощью процедуры Дейкстры.

Для всех $l = L-1, L-2, ..., 2$ выполнить:

Шаг $L-l+1$. (1) Назначим каждый из n^{l-1} процессоров Pr_{s_l} подграф-затравкам $z_{s_l}^{(l)}$, $s_l = \overline{1, n^{l-1}}$. Каждый процессор будет обрабатывать только назначенную ему подграф-затравку.

(2) Одновременно n^{l-1} процессоров Pr_{s_l} параллельно и независимо друг от друга находят числа внутреннего разделения $s_t(x_{s_l}^{(l)})$, каждый на назначенной ему подграф-затравке l-го ранга $z_{s_l}^{(l)}$: $s_t(x_{s_l}^{(l)}) = \max\limits_{j_l}[d(v_{j_l}^{(l)}, x_{s_l}^{(l)}) + s_t(x_{j_l}^{(l+1)})]$, где $d(x_{s_l}^{(l)}, x_{s_l}^{(l)}) = 0$. Поиск кратчайших путей между вершинами осуществляется с помощью процедуры Дейкстры.

Шаг L. (1) Назначим каждый из n процессоров Pr_{s_1} подграф-затравкам первого ранга $z_1^{(1)}$, $s_1 = \overline{1, n}$. Каждый процессор будет работать с подграф-затравкой $z_1^{(1)}$ как с отдельным графом.

(2) Одновременно n процессоров Pr_{s_1} параллельно и независимо друг от друга находят числа внутреннего разделения $s_t(x_{s_1}^{(1)})$, каждый на назначенной ему подграф-затравке первого ранга $z_1^{(1)}$: $s_t(x_{s_1}^{(1)}) = \max\limits_{j_1=\overline{1,n-1}}[d(v_{j_1}^{(1)}, x_{s_1}^{(1)}) + s_t(x_{j_1}^{(2)})]$, где $d(x_{s_1}^{(1)}, x_{s_1}^{(1)}) = 0$. Поиск кратчайших путей между вершинами осуществляется с помощью процедуры Дейкстры.

Шаг $L+1$. Используя процессор Pr_{s_1} из всех вершин $x_{s_1}^{(1)}$, $s_1 = 1, 2, ..., n$ в качестве внутреннего центра предфрактального графа G_L выбрать вершину x_t^* с наименьшим числом разделения: $s(x_t^*) = \min\limits_{s_1=1, 2, ..., n}[s_t(x_{s_1}^{(1)})]$.

Процедура Дейкстры.

Вход: взвешенный граф $G = (V, E)$.

Выход: кратчайшее расстояние $d(v_i, v_j)$.

Теорема 1. Вычислительная сложность алгоритма α_2^* равна $O(4n^2 \cdot N)$.

Доказательство. На первом шаге алгоритм работает на подграф-затравках L-го ранга $z_{s_L}^{(L)}$, где находит числа внутреннего разделения вершин $x_{s_L}^{(L)}, s_L = 1, 2, ..., n^{L-1}$. Поиск числа внутреннего разделения на отдельно взятой подграф-затравке состоит из поиска кратчайших путей $d(v_{j_L}^{(L)}, x_{s_L}^{(L)}$ и выбора максимального из кратчайших путей. Поиск кратчайших путей осуществляется с помощью процедуры Дейкстры, вычислительная сложность которого равна n^2 [2], а выбор максимального элемента или, в худшем случае, сортировка элементов по возрастанию требует выполнения также n^2 операций. Тогда поиск числа внутреннего разделения на одной подграф-затравке требует в сумме $2n^2$ операций. Число всех подграф-

затравок L-го ранга равно n^{L-1}, для выполнения шага 1 или поиска всех $s_t(x_{s_L}^{(L)})$, $s_L = 1, 2, ..., n^{L-1}$ требуется $2n^2 \cdot n^{L-1} = 2n^{L+1}$ операций.

На следующем шаге осуществляется поиск чисел внутреннего разделения для вершин $x_{s_{L-1}}^{(L-1)}, s_L = 1, 2, ..., n^{L-2}$, что требует $2n^2 \cdot n^{L-2} = 2n^L$ операций. Продолжая поиск внутренних центров вершин до второго ранга включительно получаем: $2n^{L+1} + 2n^L + 2n^{L-1} + ... + 2n^3$. На шаге L осуществляется поиск кратчайших путей попарно между всеми вершинами $x_{s_1}^{(1)}, s_1 = 1, 2, ..., n$, что требует $n^2 \cdot n = n^3$ операций плюс поиск максимального элемента на шаге $L+1$.

В сумме получаем:

$$2n^{L+1} + 2n^L + 2n^{L-1} + ... + 2n^3 + n^3 + n^2 \le$$
$$\le 2n^{L+1} + 2n^L + 2n^{L-1} + ... + 2n^3 + 2n^2 + n^3 =$$
$$= 2 \cdot \frac{n^{L+1} \cdot n - n^2}{n-1} + n^3 \le 2n^{L+2} - n^2 + n^3 \le 2n^{L+2} +$$
$$+ n^3 \le 2n^{L+2} + 2n^{L+2} = 4n^2 \cdot n^L = 4n^2 \cdot N.$$

Таким образом, вычислительная сложность алгоритма α_2^* равна $O(4n^2 \cdot N)$.

Отметим, что в качестве процедуры Дейкстры можно использовать другие известные последовательные алгоритмы поиска кратчайших путей, тогда будет меняться и вычислительная сложность алгоритма α_2^*.

Теорема 2. Временная сложность алгоритма α_2^* равна $O(4n^3 \cdot L)$.

Доказательство. На первом шаге алгоритм α_2^* находит числа внутреннего разделения на подграф-затравках L-го ранга $z_{s_L}^{(L)}$, $s_L = \overline{1, n^{L-1}}$. На каждой подграф-затравке работает назначенный ей процессор Pr_{s_L}. Поиск числа внутреннего разделения на отдельно взятой подграф-затравке состоит из поиска кратчайших путей до вершины $x_{s_l}^{(L)}$ от других вершин подграф-затравки и выбора максимального из кратчайших путей. Поиск кратчайших путей осуществляется с помощью процедуры Дейкстры, вычислительная сложность которого равна n^2, а выбор максимального элемента требует выполнения также $(n-1)$ операций [5]. Тогда поиск числа внутреннего разделения на одной подграф-затравке требует в сумме не более $2n^2$ операций. Поскольку процессоры работают параллельно, первый шаг займет $2n^2$ времени.

На втором шаге также каждой подграф-затравке $(L-1)$-го ранга $z_{s_{L-1}}^{(L-1)}$, $s_L = \overline{1, n^{L-2}}$ назначается процессор $\mathrm{Pr}_{s_{L-1}}$. Поиск числа внутреннего разделения на одной подграф-затравке требует $2n^2$ операций. Поскольку процессоры работают параллельно, второй шаг также займет $2n^2$ времени.

Таким образом, осуществляя поиск чисел внешнего разделения на подграф-затравках разных рангов, на каждом шаге до $(L-1)$-го шага включительно требуется $2n^2$ времени. Сложив время, потраченное на всех $(L-1)$ шагах, получим $2n^2 \cdot L$.

На шаге L осуществляется поиск кратчайших путей попарно между всеми вершинами $x_{s_1}^{(1)}, s_1 = 1, 2, ..., n$, что требует n^2 времени, а шаг $(L+1)$ требует затрат $(n-1)$ времени на поиск максимального элемента.

Складывая время, необходимое для поиска внутреннего центра предфрактального графа, получим: $2n^2 \cdot L + n^2 + (n-1) \le 2n^2 \cdot (L+1)$. Таким образом, время исполнения алгоритма α_2^* равно $O(2n^2 \cdot (L+1)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воеводин, В.В.** Параллельные вычисления [Текст]/В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин.–СПб.: БХВ-Петербург, 2002. –608 с.

2. **Кочкаров, А.М.** Распознавание фрактальных графов. Алгоритмический подход [Текст]/А.М. Кочкаров//Нижний Архыз: РАН САО, 1998. –170 с.

3. **Кочкаров, А.А.** Параллельные алгоритмы на предфрактальных графах [Текст]/А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров//Препринт ИПМ имени М.В. Келдыша РАН.–2003.–№ 84. –20 с.

4. **Кристофидес, Н.** Теория графов. Алгоритмический подход [Текст]/Н. Кристофидес.–М.: Мир, 1978.–432 с.

5. **Асанов, М.О.** Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы [Текст]/М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин.–Ижевск: НИЦ «РХД», 2001. –288 с.

УДК 519.6; 519.17

И.Н. Рубежная, Р.А. Кочкаров

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСКРАСКИ ПРЕДФРАКТАЛЬНОГО ГРАФА, ПОРОЖДЕННОГО МНОЖЕСТВОМ ЗАТРАВОК

В статье предложен параллельный алгоритм вершинной раскраски предфрактального графа, порожденного множеством затравок $H = \{H_t\}$, смежность старых ребер которого сохраняется. Параллельный алгоритм β_3^* построен для PRAM (Parallel Random Access Machine) – модели параллельной вычислительной системы [1].

Для правильной работы алгоритма β_3^* важна следующая теорема.

Теорема 1. Предфрактальный граф $G_L = (V_L, E_L)$, порожденный множеством затравок $H = \{H_t\} = \{H_1, H_2, ..., H_t, ..., H_T\}$, $T \geq 2$ с сохранением смежности старых ребер, является f-хроматическим, т. е. $\chi(G_L) = f$, где $f = \max\limits_{t=\overline{1,T}} \chi(H_t)$.

Доказательство теоремы изложено в [2].

Алгоритм β_3^*

Рассмотрим предфрактальный граф $G_L = (V_L, E_L)$, порожденный множеством затравок $H = \{H_t\} = \{H_1, H_2, ..., H_t, ..., H_T\}$, $T \geq 2$, смежность старых ребер которого сохраняется. Каждая из затравок H_t является f_t-хроматическим графом. Алгоритм использует k процессоров $p_1, p_2, ..., p_k$, где $k = n^{L-1}$ [3, 4].

Опишем принцип работы алгоритма β_3^*. Поскольку каждая порождающая затравка H_t является f_t-хроматической, то для ее правильной и одновременно минимальной раскраски понадобится ровно f_t цветов, т. е. хроматическое число $\chi(H_t) = f_t$, $f \leq |W_t|$. Отметим, что для раскраски затравки H_t будет использоваться известный алгоритм минимальной раскраски [5]. Алгоритм минимальной раскраски представим в виде процедуры МинРаскраска, которая вызывается основным алгоритмом в нужное время.

В начале алгоритма процессор p_1 назначается подграф-затравке первого ранга $z_1^{(1)}$. Для раскраски подграф-затравки $z_1^{(1)}$ понадобится f_t цветов, в соответствие с предположением о f_t-хроматической затравке H_t.

Далее, для каждой подграф-затравки второго ранга $z_{s_2}^{(2)}$ назначим процессоры p_{s_2}, $s_2 = 1, 2, ..., n$. У каждой из них одна вершина оказалась окрашенной, т. к. подграф-затравка первого ранга имеет одну общую вершину с подграф-затравкой второго ранга в силу того, что смежность старых ребер сохраняется.

Для того чтобы не загружать алгоритм дополнительными обозначениями, число цветов f_t для окрашивания некоторой подграф-затравки считаем равным числу цветов, необходимых для раскраски соответствующей затравки H_t. То есть фактически для раскраски подграф-затравки $z_s^{(l)}$ используется свое число f_t.

Рассмотрим подграф-затравку $z_1^{(2)}$, одна из ее вершин оказалась окрашенной, например, в цвет 1. Используя процедуру МинРаскраска, окрасим оставшиеся вершины в $(f_t - 1)$ неиспользованных цветов. Окрасим таким же образом все подграф-затравки второго ранга $z_{s_2}^{(2)}$.

Далее рассмотрим подграф-затравки третьего ранга $z_{s_3}^{(3)}$, у каждой из них оказалось окрашенной по одной вершине. Окрашиваем подграф-затравки третьего ранга $z_{s_3}^{(3)}$ с помощью процедуры МинРаскраска в соответствии с описанным ранее.

Дойдя до L-го ранга, назначим каждой подграф-затравке $z_{s_L}^{(L)}$ процессоры p_{s_L}, $s_L = 1, 2, ..., n^{L-1}$. Таким образом, окрашивая подграф-затравки до L-го ранга включительно, получим правильную f-раскраску предфрактального графа G_L, где $f = \max\limits_{t=1,2,...,T} f_t$.

Алгоритм β_3^* включает в себя процедуру МинРаскраска. Процедура МинРаскраска используется для минимальной f_t-раскраски подграф-затравок разных рангов. На вход процедуры подается подграф-затравка с одной окрашенной вершиной, далее оставшиеся вершины подграф-затравки окрашиваются в $(f_t - 1)$ свободных цветов в соответствии с последовательным алгоритмом минимальной раскраски [5]. На выходе процедуры получаем правильную f_t-раскраску подграф-затравки.

Алгоритм β_3^*

Вход: предфрактальный граф $G_L = (V_L, E_L)$.

Выход: минимальная f-раскраска предфрактального графа G_L.

Шаг 1. Назначим процессор p_1 подграф-затравке первого ранга $z_1^{(1)}$. Процессор p_1 применяет процедуру МинРаскраска к подграф-затравке $z_1^{(1)}$.

Для всех $l = 2, 3, ..., L$ выполнить:

Шаг l. 1. Назначим каждый из k процессоров $p_1, p_2, ..., p_k$ подграф-затравкам $z_s^{(l)}$, $s = \overline{1, n^{l-1}}$. Каждый процессор будет обрабатывать только назначенную ему подграф-затравку.

2. Одновременно k процессоров $p_1, p_2, ..., p_k$ параллельно и независимо друг от друга применяют процедуру МинРаскраска к назначенной подграф-затравке.

Процедура МинРаскраска

Вход: граф $G = (V, E)$, окрашенная вершина v.

Выход: минимальная раскраска графа G.

На рисунке изображена минимальная 3-раскраска предфрактального графа G_3, порожденного множеством затравок $H = \{H_t\}$ с сохранением смежности старых ребер. Затравки H_1 и H_2 являются 3-хроматическими, а затравка H_3 – 2-хроматической. Граф $G_1 = H_2$, т. е. G_1 является 3-хроматическим, а граф G_2 состоит только из затравок H_2, H_3 и также является 3-хроматическим. Можно видеть, что раскраска графа G_3 фактически ведет к поэтапной раскраске графов G_1 и G_2. Раскраска подграф-затравки $z_1^{(1)}$ предфрактального графа G_3 совпадает с раскраской графа G_1, а раскраска подграф-затравки $z_1^{(1)}$ и подграф-затравок $z_1^{(2)}, z_2^{(2)}, z_3^{(2)}$ – с раскраской графа G_2.

Теорема 2. Вычислительная сложность алгоритма β_3^* на предфрактальном графе G_L, порожденного множеством затравок $H = \{H_t\} = \{H_1, H_2, ..., H_t, ..., H_T\}$, $T \geq 2$ с сохранением смежности старых ребер, равна $O(n^2 \cdot N)$.

Доказательство. Для упрощения доказательства будем считать, что предфрактальный граф порождается затравками $H_t = (W_t, Q_t)$ с количеством вершин равным $n = \max\limits_{t=1,2,...,T} |W_t|$. То есть для каждой подграф-затравки будем считать количество вершин равным n.

Алгоритм β_3^* на первом шаге окрашивает n вершин подграф-затравки $z_1^{(1)}$ процессором p_1, с помощью процедуры МинРаскраска. Процедура МинРаскраска, по сути, известный последовательный алгоритм, который требует порядка n^2 операций для раскраски n-вершинного графа [5, 6]. Тогда для раскраски n-вершинной затравки потребуется n^2 операций. На втором шаге окрашиваются вершины подграф-затравок второго ранга $z_{s_2}^{(2)}$. На каждой подграф-затравке работает назначенный ей процессор p_{s_2}, $s_2 = 1, 2, ..., n$, а процесс раскраски осуществляется с помощью процедуры МинРаскраска. Для раскраски каждой подграф-затравки требуется по n^2 операций, а в сумме для всех подграф-затравок второго ранга $n \cdot n^2$ операций. На третьем шаге окрашиваются вершины подграф-затравок третьего ранга $z_{s_3}^{(3)}$ процессорами p_{s_3}, $s_3 = 1, 2, ..., n^2$. Для раскраски каждой подграф-затравки требуется n^2 операций, а в сумме для всех подграф-затравок третьего ранга – $n^2 \cdot n^2$ операций. Далее, на последнем L-м шаге окрашиваются вершины подграф-затравок L-го ранга $z_{s_L}^{(L)}$ процессами p_{s_L}, $s_L = 1, 2, ..., n^{L-1}$. Сложив число всех операций, необходимых для раскраски вершин подграф-затравок разных рангов, получим:

$$1 \cdot n^2 + n \cdot n^2 + n^2 \cdot n^2 + ... + n^{L-1} \cdot n^2 =$$

$$= n^2 (1 + n + n^2 + ... + n^{L-1}) =$$

$$= n^2 (n^L - 1)/(n^L - 1) \leq n^2 \cdot n^L/(n - 1) \leq$$

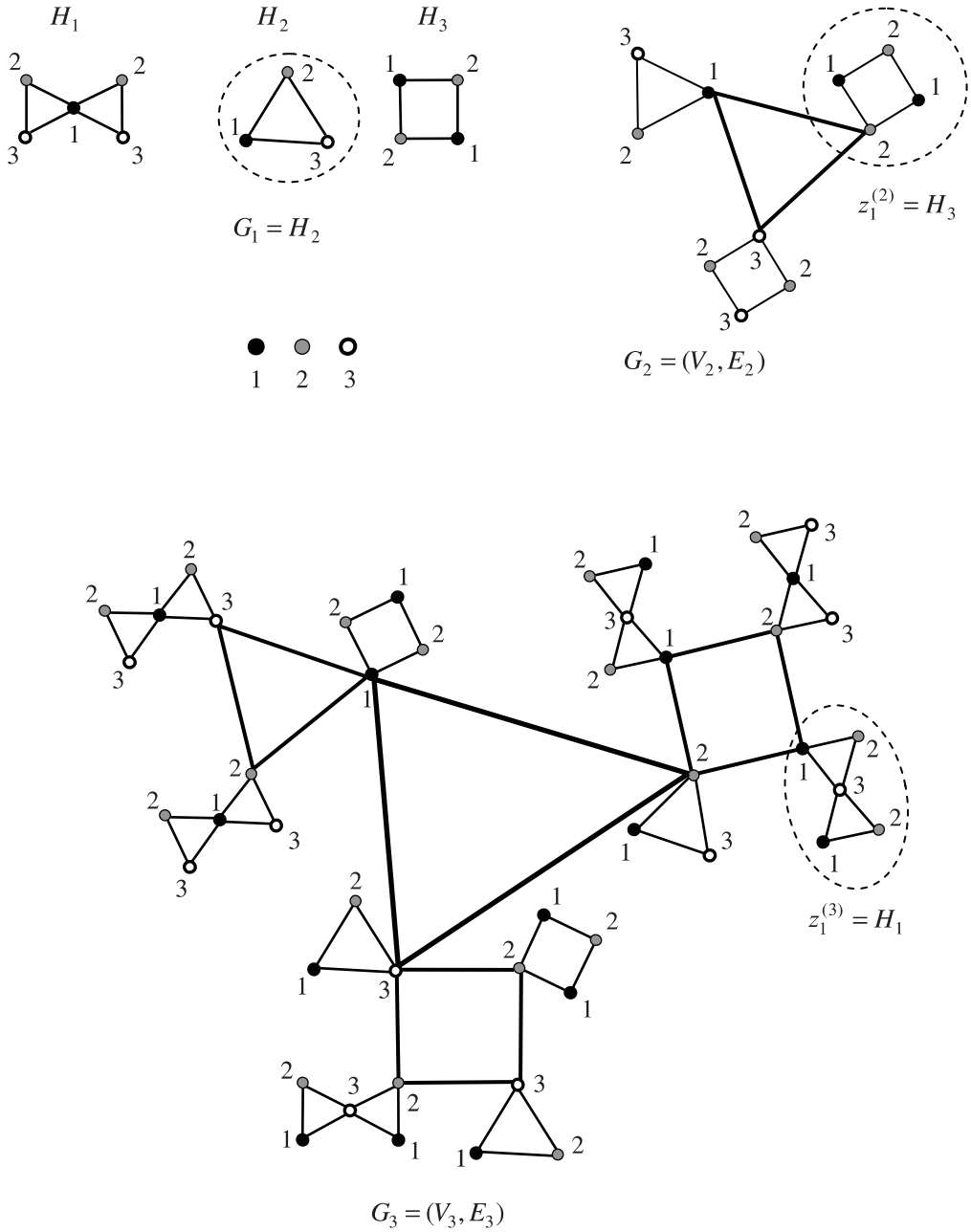
$$\leq n^2 \cdot n^L = n^2 \cdot N.$$

Таким образом, вычислительная сложность алгоритма β_3^* равна $O(n^2 \cdot N)$.

Отметим, что в качестве процедуры МинРаскраска можно использовать другие известные последовательные алгоритмы, тогда будет меняться и вычислительная сложность алгоритма β_3^*.

Теорема 3. Временная сложность алгоритма β_3^* на предфрактальном графе $G_L = (V_L, E_L)$, порожденного множеством затравок $H = \{H_t\} = \{H_1, H_2, ..., H_t, ..., H_T\}$, $T \geq 2$ с сохранением смежности старых ребер, равна $O(n^2 \cdot L)$.

Доказательство. Как и в доказательстве теоремы 2, для каждой подграф-затравки количество вершин будем считать равным n. Алгоритм β_3^* на первом шаге требует выполнения n^2 операций для раскраски подграф-затравки $z_1^{(1)}$ процессором p_1. На втором шаге параллельно окрашиваются подграф-затравки второго ранга $z_{s_2}^{(2)}$ процессорами $p_1, p_2, ..., p_n$. Поскольку процессоры работают параллельно, для раскраски всех подграф-затравок второго ранга потребуется времени n^2. На третьем шаге параллельно



Минимальная 3-раскраска предфрактального графа G_3

окрашиваются подграф-затравки третьего ранга $z_{s_3}^{(3)}$ процессорами p_{s_3}, $s_3 = 1, 2, ..., n^2$, для чего также потребуется затратить n^2 времени. Далее, на последнем L-м шаге окрашиваются вершины подграф-затравок L-го ранга $z_{s_L}^{(L)}$ процессами p_{s_L}, $s_L = 1, 2, ..., n^{L-1}$.

Складывая время, необходимое для раскраски на каждом шаге алгоритма β_3^*, получаем $n^2 \cdot L$. Таким образом, время исполнения алгоритма β_3^* равно $O(n^2 \cdot L)$.

Теорема 4. Ускорение параллельного алгоритма β_3^* при использовании k процессоров, $k = n^{L-1}$, от последовательного алгоритма β_3^* равно $O(n^L / L)$ [6].

Доказательство. Время исполнения параллельного алгоритма β_3^* равно $O(n^2 \cdot L)$. Время исполнения последовательного алгоритма β_3^*, т. е. его вычислительная сложность равна $O(n^2 \cdot N)$. Тогда ускорение алгоритма β_3^* есть разница $O(n^2 \cdot n^L) / O(n^2 \cdot L) = O(n^L / L)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воеводин, В.В.** Параллельные вычисления [Текст]/В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин.–СПб.: БХВ-Петербург, 2002.–608 с.

2. **Кононова, Н.В.** Многокритериальная задача о раскраске на предфрактальных графах. Дисс. ...канд. физ.-мат. наук [Текст]/Н.В. Кононова.–Ставрополь: СГУ, 2008.–9 с.

3. **Кочкаров, А.А.** Параллельные алгоритмы на предфрактальных графах [Текст]/А.А. Кочкаров, Р.А. Кочкаров.–М.: Ин-т прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, 2003. –№ 84.

4. **Кочкаров, А.М.** Распознавание фрактальных графов. Алгоритмический подход [Текст]/А.М. Кочкаров.–Нижний Архыз: РАН САО, 1998.–170 с.

5. **Кристофидес, Н.** Теория графов. Алгоритмический подход [Текст]/Н. Кристофидес, Э.В. Вершкова, И.В. Коновальцева; пер. с англ.–М.: Мир, 1978. –432 с.

6. **Асанов, М.О.** Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы [Текст]/М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин.–Ижевск: НИЦ «РХД», 2001. –288 с.

УДК 681.3

И.В. Аникин

ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАРУШИТЕЛЕЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ

Своевременное выявление инцидентов информационной безопасности (ИБ) в компьютерных системах и сетях − одна из важнейших задач для современного общества. При этом наибольшую актуальность приобретает выявление нарушений ИБ, реализуемых внутренними сотрудниками организации (инсайдерами).

Для выявления таких нарушений ИБ в настоящее время значительный практический интерес получают системы обнаружения вторжений (СОВ), работающие по принципу выявления аномалий. На первом этапе своей работы системы обнаружения аномалий (СОА) формируют эталонные профили, характеризующие нормальное поведение субъектов компьютерной системы (а при необходимости − и поведение при осуществлении атаки). На втором этапе происходит сравнение действительного поведения субъектов с эталонными профилями и сигнализация о выявленных отклонениях. Такой подход обладает рядом преимуществ перед сигнатурными анализаторами. Наибольшее распространение СОА получили для выявления сетевых атак [1−5], однако известно немало примеров использования СОА для выявления попыток злоупотребления пользователей своими полномочиями [6].

Один из основных компонентов СОА − база знаний (БЗ), содержащая эталонные профили поведения субъектов. Поэтому задача качественного формирования баз знаний является одной из важнейших при проектировании СОА. Для формирования таких БЗ часто применяют методы интеллектуального анализа данных (Data Mining) [7−8].

В настоящей статье предлагается технология интеллектуального анализа данных, предназначенная для выявления событий безопасности в компьютерной системе, связанных с получением доступа нарушителя к системе под учетной записью другого пользователя. При этом выполняется анализ работы пользователя с прикладными программами.

Технология интеллектуального анализа данных

Поставим задачу выявления фактов компрометации учетной записи пользователя, связанных с получением доступа нарушителя к компьютерной системе (КС) под учетной записью другого пользователя, например, через кражу злоумышленником эталонного пароля легального пользователя. Выявление факта компрометации учетной

записи будем осуществлять, используя технологию интеллектуального анализа поведения пользователя в КС и выявления аномалий в данном поведении.

Эталонный профиль поведения пользователя предлагается формировать путем анализа его работы с прикладными программами и выявления скрытых закономерностей, характеризующих такую работу. В качестве источника данных о поведении пользователя используется журнал событий Security EventLog ОС Windows. На рисунке представлена структура разработанной системы обнаружения аномалий (СОА), которая работает в двух режимах.

Обучение, в рамках которого формируются эталонные профили поведения пользователей и формирование БЗ СОА. В качестве способов представления знаний предлагается применять деревья решений, ассоциативные правила, а также совместно используемые наборы программ, полученные методами секвенциального анализа данных [4].

Выявление двух видов аномального поведения пользователей на узле компьютерной сети:

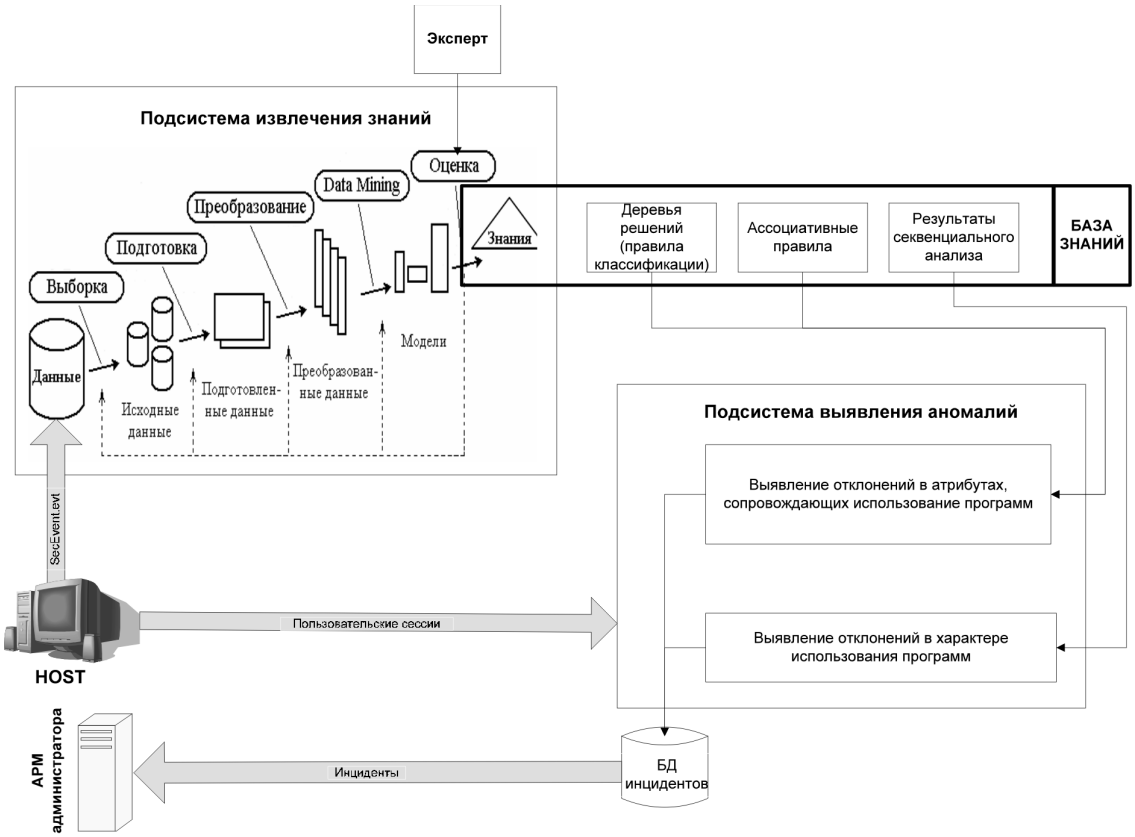
отклонения в атрибутах использования программ, например, запуск критичной процедуры не в установленные сроки;

отклонения в характере использования программ, например, после входа в систему не соблюдается последовательность их запуска.

Выявленным инцидентам назначается вес критичности, а информация о них вносится в БД. О наиболее критичных инцидентах извещается администратор безопасности с целью своевременного реагирования на них. Рассмотрим работу СОА в режимах обучения и выявления аномалий.

Работа СОА на этапе обучения

Здесь осуществляется формирование эталонных профилей поведения пользователей. Обозначим через $S = \{s_1, ..., s_q\}$ множество записей в журнале регистрации событий Security EventLog, каждую из которых охарактеризуем тройкой элементов $\langle d_i, t_i, type_i \rangle$, где $type_i$ − тип события (вход в систему, запуск определенной программы и т. д.), d_i, t_i − дата и время фиксации события. Формирование БЗ СОА осуществляется подсистемой извлечения знаний при участии эксперта



Структура системы обнаружения аномалий

(см. рис. 1). Извлечение знаний предполагает реализацию последовательных шагов выборки данных, их подготовки, преобразования, получения знаний методами Data Mining, а также оценку полученных знаний экспертом.

1. Выборка данных. На данном шаге из множества S выделяется подмножество событий $\overline{S} \subseteq S$, $\overline{S} = \{s_1, ..., s_n\}$, относящихся к запуску/завершению процессов или программ, а также к входу/выходу пользователя из системы.

2. Подготовка данных для анализа осуществляется путем решения следующих подзадач.

Очистка данных. Реализуется при построении дерева решений путем фильтрации множества $\overline{S}$ и удаления из него событий, не критичных относительно дня недели или времени запуска. Данная задача решается экспертом, а также путем определения факта корреляции между фактом возникновения события и данными параметрами.

Удаление избыточных данных. Появление одного события в множестве $\overline{S}$ может порождать появление других. В данном случае в $\overline{S}$ оставляют только одно головное событие, которое порождается активностью пользователя.

Удаление нерелевантных ко времени событий, порожденных ошибками пользователя. Критерием удаления события является условие $t_a - t_b < 10$, где t_a – время запуска программы пользователем, t_b – время завершения ее работы.

Склеивание повторяющихся событий. Реализуется при проведении секвенциального анализа. Часто в множестве $\overline{S}$ одинаковые события следуют друг за другом. Для секвенциального анализа данный вариант не представляет интереса, т. к. работа осуществляется с одной программой. Такие события склеиваются в одно, например, последовательность событий AAABBC преобразуется в последовательность ABC.

3. Преобразование данных осуществляется путем приведения событий множества $\overline{S}$ к требуемой для анализа форме.

Атрибуты d_i и t_i преобразуются в дискретный вид с множествами значений $\aleph_{date}$ и $\aleph_{time}$ соответственно, где $\aleph_{date}$={начало недели, середина недели, конец недели, выходные}; $\aleph_{time}$={раннее утро, утро, середина дня, конец дня, вечер, ночь, глубокая ночь}.

При проведении секвенциального анализа на данном шаге дополнительно выделяются пользовательские сессии (анализируемые транзакции). Точками, разделяющими сеансы работы пользователя в множестве $\overline{S}$, считаются: события входа в систему под исследуемой учетной записью; запуск хранителя экрана; отсутствие активности в системе более 10 мин.

4. Data Mining.

Для построения *дерева решений* использован алгоритм C4.5. Формируемое дерево решений представляет полную систему правил классификации, определяющих день и время использования программ на узле компьютерной сети. К недостаткам данного способа представления знаний для СОА относится необходимость жесткого отбора на этапе фильтрации программ, критичных относительно дня недели или времени запуска. В ином случае может произойти необоснованное усложнение построенного дерева решений.

Поиск ассоциативных правил

Будем рассматривать в качестве транзакций элементы $s_i \in \overline{S}$. Данные транзакции представляют собой тройки элементов $\langle d_i, t_i, type_i \rangle$, где $d_i \in \aleph_{date}, t_i \in \aleph_{time}, type_i \in \aleph_{type}$. В отличие от построения полной системы правил классификации, в данном случае осуществляется поиск в множестве транзакций небольшого количества продукционных правил вида (1), являющихся «полезными» для выявления рассматриваемых инцидентов:

$$X \to Y, C, I, \qquad (1)$$

где X и Y – набор элементов множеств $\aleph_{date}, \aleph_{time}, \aleph_{type}$, встречающихся в транзакциях совместно.; C – достоверность правила, показывающая вероятность того, что из наличия в транзакции набора X следует наличие в ней набора Y; I – улучшение, показывающее, полезнее ли правило случайного угадывания

$$C = \frac{Support(X \cup Y)}{Support(X)}, \; I = \frac{Support(X \cup Y)}{Support(X) \cdot Support(Y)},$$

где $Support(F) = \frac{|\overline{S}_F|}{|\overline{S}|}$ – поддержка набора F, а $\overline{S}_F$ – количество транзакций, в которые входит набор F. Полезность ассоциативного правила (1) определяется выполнением условий $C \geq Supp_{\min} \geq Supp_Y$, $I > 1$.

Для построения ассоциативных правил в разработанной СОА использован алгоритм построения частотных деревьев. Ниже представлены ассоциативные правила, сформированные по результатам анализа одного из журналов Security EventLog, а также их интерпретация.

Ассоциативное правило	Интерпретация
$time =< Раннее\ утро > \rightarrow$ $date =< Середина\ недели >$	Если работа пользователя начинается ранним утром, то это середина рабочей недели
$type =< Вход\ в\ систему >$, $date =< Начало\ недели > \rightarrow$ $time =< Утро >$	В начале недели работа пользователя начинается утром
$type =< Nero > \rightarrow$ $date =< Конец\ недели >$	Работа с программной *Nero* осуществляется в конце рабочей недели

Секвенциальный анализ

В данном случае в качестве транзакций рассматриваются пользовательские сессии (2), состоящие из последовательно запускаемых пользователем программ. Формирование пользовательских сессий осуществляется на этапе преобразования данных:

$$Session = \{type_1, ..., type_n\}. \quad (2)$$

Выполняется анализ транзакций (2) путем построения ассоциативных правил и выделения в них частых совместно используемых наборов программ. Конкретный набор из часто встречаемых *k* программ, назовем *k-последовательностью*. Для их построения в разработанной СОА использован алгоритм построения частотных деревьев

5. Оценка знаний

На данном этапе осуществляется интерпретация и анализ полученных знаний человеком-экспертом. Для сформированных ассоциативных правил и *k*-последовательностей осуществляется оценка полезности. Для *k*-последовательностей особенно полезными являются те, которые начинаются с событий {Вход в систему} или {Хранитель экрана}.

Работа СОА на этапе обнаружения аномалий

На этапе выявления аномального поведения пользователей СОА осуществляет сбор информации из журнала регистрации Security EventLog, сравнивает поведение пользователей со сформированными эталонными профилями и выявляет аномальные отклонения, которые назовем *инцидентами*. Выделены инциденты i_j трех категорий.

Инциденты первого рода. Временные сроки и день запуска программы *p* не соответствуют правилам построенного дерева решений. Для данных инцидентов определяются расстояния $\rho(p_s)$ до ближайших листьев построенного дерева решений, помеченных p. Данные расстояния определяются на порядковой шкале значениями от 1 до 5. Далее степень критичности инцидентов первого рода определяется согласно выражению $critical\ (i_j) = critical\ (p) \circ \min_s \rho\ critical\ (p_s)$, где $critical\ (p) \in \{1, ..., 5\}$ − степень критичности программы *p*, определяемая экспертным путем, $\circ$ − операция на порядковых шкалах.

Инциденты второго рода. Не выполняется условие $A \rightarrow B$ построенного ассоциативного правила при удовлетворении условия *A*. Степень критичности инцидентов второго рода определяется согласно выражению $critical\ (i_j) = critical(A \rightarrow B) \cdot C$, где $critical(A \rightarrow B)$ − степень критичности ассоциативного правила, определяемая экспертным путем, $C \in [0;1]$ − достоверность правила.

Инциденты третьего рода. Нарушается последовательность использования программ в *k*-последовательностях. Степень критичности инцидентов третьего рода определяется согласно выражению:

$$critical(i_j) = critical(l_k) \cdot \min_k \frac{Support(X \cup Y_k')}{Support(X \cup Y_k)},$$

где l_k − *k*-последовательность БЗ, начало которой совпадает с событием X; Y_k' − теоретическое продолжение *k*-последовательности в БЗ; Y_k − реальное продолжение *k*-последовательности в пользовательской сессии.

Обозначим через $I_A = \{i_1, ..., i_k\}$ − множество инцидентов, порожденных конкретной учетной записью пользователя *u* за время T. Общий уровень инцидентов $C(u)$, исходящих от *u*, определяется согласно выражению

$$C(u) = \sum_{t=1}^{k} critical(i_t). \quad (3)$$

Исходя из полученного уровня инцидентов $C(u)$, принимается решение о наличии аномалии. Для администратора безопасности уровень инцидентов представляется в цвете путем определения значения показателя ЦИ (цвет инцидента):

$$\text{ЦИ} = \begin{cases} \text{зеленый, если } C(u) \le C^{\text{желтый}}(u) \\ \text{желтый, если } C^{\text{желтый}}(u) < C(u) < C^{\text{красный}}(u) \\ \text{красный, если } C(u) \ge C^{\text{красный}}(u) \end{cases}$$

зеленый – уровень инцидентов, исходящих от учетной записи (УЗ), является приемлемым и не свидетельствует о ее компрометации;

красный – уровень инцидентов, исходящих от УЗ, является неприемлемым, свидетельствует о ее компрометации. Данный факт требует немедленного реагирования администратора;

желтый – уровень инцидентов, исходящих от УЗ, не является ни приемлемым, ни критичным. Возможно, УЗ скомпрометирована и администратору следует обратить внимание на данный факт.

Формирование пороговых уровней инцидентов $C^{\text{желтый}}(u)$ и $C^{\text{красный}}(u)$ осуществляется следующим образом. Обозначим через $U = \{u_i\}_{i=1}^{N_{\text{польз}}}$ множество УЗ пользователей, $C(u_i) \ge 0$ – уровень исходящих инцидентов от УЗ пользователя u_i, вычисляемый согласно (3) на этапе обучения СОА. Обучение происходит в условиях, когда УЗ не скомпрометирована, поэтому значение $C(u_i)$ является допустимым для нее. $K(u_i)$ – множество единиц знаний для u_i, сформированное на этапе обучения и определяющее профиль поведения пользователя. Эти единицы знаний представляют собой деревья решений, ассоциативные правила или наборы совместно используемых программ.

После обучения СОА производится настройка параметров процедуры принятия решений путем формирования пороговых уровней $C^{\text{желтый}}(u)$ и $C^{\text{красный}}(u)$ для каждой из УЗ $u_i \in U$. Для этого набирается статистика работы пользователей в режиме тестирования работы СОА. Должно выполняться условие $T_{test} \approx T_e$, где T_{test} – время сбора тестовых данных, T_e – время обучения СОА.

Обозначим через $E(u_j, K(u_i))$ расстояние между профилем поведения пользователя u_i (согласно $K(u_i)$) и поведением пользователя u_j на этапе тестирования.

Используя информацию о поведении пользователя u_i в дискретные моменты времени $0 < T_i \le T_{test}$, на этапе тестирования формируются и нормируются распределения расстояний $P_i^t(r)$ – от профиля поведения пользователя u_i, и $P_i^f(r)$ – от профилей поведения других пользователей.

Тогда на этапе выявления аномалий $P_i^t(r)$ является вероятностью того, что степень критичности инцидента – зеленая, а $P_i^f(r)$ – вероятностью того, что степень критичности инцидента – красная.

Вычисление пороговых уровней инцидентов $C^{\text{желтый}}(u)$ и $C^{\text{красный}}(u)$ осуществляется согласно (4):

$$C^{\text{желтый}} = r, \text{ при котором } \frac{P_i^t(r)}{P_i^f(r)} = 2,$$
$$C^{\text{красный}} = r, \text{ при котором } \frac{P_i^t(r)}{P_i^f(r)} = \frac{1}{2}. \quad (4)$$

Для администратора безопасности палитра и цвет инцидентов определяется согласно (5):

$$Color = \left(\overline{P_i^f(r)} \cdot 255, \overline{P_i^t(r)} \cdot 255, 0 \right),$$

где $$\overline{P_i^t(r)} = P_i^t(r) \cdot k, \quad \overline{P_i^f(r)} = P_i^f(r) \cdot k, \quad (5)$$

где $$k = \max\left\{ \frac{1}{P_i^t(r)}, \frac{1}{P_i^f(r)} \right\},$$

где $\overline{P_i^f(r)} \cdot 255$ – уровень красного цвета в палитре, $\overline{P_i^t(r)} \cdot 255$ – уровень зеленого цвета в палитре.

Разработанная технология интеллектуального анализа данных для обнаружения внутренних нарушителей реализована в программном комплексе, который опробован для выявления аномального поведения пользователей на компьютерных системах с ОС Windows в условиях отсутствия попыток нарушителя маскировать свои действия в компьютерной системе. В ходе экспериментов уровень ошибок классификации первого рода получился равным 0,2, а уровень ошибок классификации второго рода – равным 0,1, что является, по нашему мнению, приемлемым результатом.

Разработанная технология интеллектуального анализа данных позволяет выявлять инциденты безопасности, связанные с компрометацией учетной записи пользователя (получения злоумышленником доступа к КС от имени данной учетной записи).

Практическое применение полученных результатов позволяет повысить уровень защищенности современных компьютерных систем от внутренних нарушителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев, В.И.** Интеллектуальные системы защиты информации [Текст]/В.И. Васильев.−М.: Машиностроение, 2010. –152 с.

2. ADAM: Detecting Intrusions by Data Mining [Текст]/ Proc. of the IEEE Workshop on Information Assurance and Security, West Point, NY, June 5-6, 2001. –P.11–16

3. **Wang, H.** Detection SYN flooding attacks [Текст]/ H. Wang, D. Zhang, K. Shin//Proc. of the IEEE Infocom. Conf., 2002.−P. 1530−1539.

4. **Brugger, S.T.** Data mining methods for network intrusion detection [Текст]/S.T. Brugger.−University of California, Davis, 2004.–65 p.

5. **Dewan Md., Farid** Attacks Classification in Adaptive Intrusion Detection using Decision Tree [Текст]/ Farid Dewan Md., Nouria Harbi, Emna Bahri [et al.]//World Academy of Science, Engineering and Technology.−March 2010. –Iss. 63.−P. 86−90.

6. **Гарусев, М.Л.** Методы Data Mining в автоматизированном построении профиля пользователя защищаемой автоматизированной системы [Текст]/ М.Л. Гарусев//Научно-технический вестник СПбГУ-ИТМО.−2006.−№ 25.−С. 127−134.

7. **Lee, W.** Data mining approaches for intrusion detection [Текст]/W. Lee, Salvatore J.Stolfo//Proc. of the 7th USENIX Security symp.−San Antonio, Texas, Jan. 26−29, 1998.–P.6.

8. **Барсегян, А.А.** Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining [Текст]/ Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В. [и др.]. –СПб.: БХВ-Петербург, 2004.–336 с.

УДК 004.732

А.А. Габдрахманов, Н.Т. Габдрахманова

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ САМОПОДОБНОГО ТРАФИКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С ПАКЕТНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ

Прогнозирование трафика телекоммуникационной сети с пакетной передачей данных играет значительную роль при разработке алгоритмов, повышающих качество обслуживания сети (QoS). Провайдеры телекоммуникационных услуг, например, заинтересованы в возможностях долгосрочного прогнозирования загрузки собственной сети для планирования ее своевременного развития. В настоящее время переход к новым технологиям в сетях телекоммуникации сопровождается появлением новых, неизученных, сложных явлений. Исследования измерений интенсивностей трафика в сетях Интернет и в других сетях [1–4] показали, что трафик в них является самоподобным случайным процессом. Из этого следует, что широко используемые в настоящее время методы моделирования и расчета сетевых систем, основанные на использовании пуассоновских потоков, не дают полной и точной картины происходящего в сети. Данная статья посвящена исследованию процессов в сетях, построению прогнозных моделей и формированию на базе полученного математического описания этих процессов предложений по управлению сетевым трафиком.

Для исследования на эффект самоподобия был взят пограничный коммутатор второго уровня организации, ориентированной на предоставление услуг магистральной связи. Трафик, поступающий на каждый порт устройства, представляет собой суммированный трафик от групп клиентов определенного района. Структурная схема проведения измерений приведена на рис. 1.

Статистика снята при помощи программы Cacti, протокол SNMP-Interface statistic. График интенсивностей, измеренных на порту GE 0, приведен на рис. 2. Измерения производились в течение недели.

Сетевой трафик, приведенный к эквидистантной форме по оси времени (с помощью процедуры агрегирования), представляет собой некоторый временной ряд (реализацию дискретного случайного процесса). Поэтому анализ сетевого трафика фактически сводится к задаче обработки временного ряда. На первом этапе решения

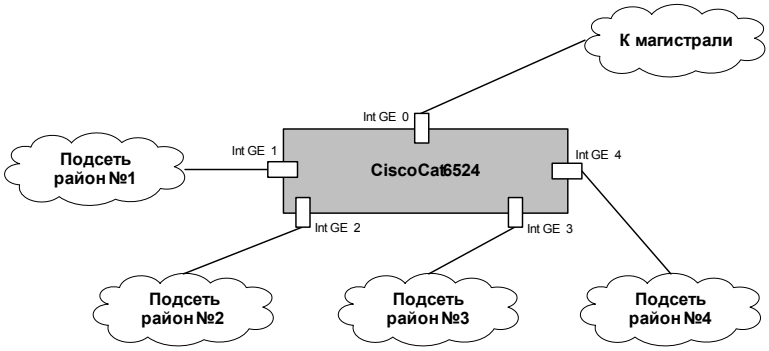


Рис.1. Схема проведения измерений

задачи получены оценки статистических характеристик временного ряда, позволяющие судить о наличии самоподобия в изучаемом процессе. Известно, что непрерывный стохастический процесс $X(t)$ считается статистически самоподобным с параметром H ($0{,}5 \le H \le 1$), если для любого положительного числа a процессы $X(t)$ и $a^{-H}X(at)$ будут иметь идентичные распределения, т. е. иметь одинаковые статистические свойства для всех положительных целых n:

$$\{X(t_1), X(t_2), ..., X(t_n)\} \overset{D}{\sim} \{a^{-H}X(at_1),$$
$$a^{-H}X(at_2), ..., a^{-H}X(at_n)\}.$$

Отношение $\overset{D}{\sim}$ обозначает асимптотическое равенство в смысле распределения. Практически статистическая самоподобность подразумевает, что выполняются следующие условия:

среднее $E[X(t)] = \dfrac{E[X(at)]}{a^H}$, (1)

дисперсия $Var[X(t)] = \dfrac{Var[X(at)]}{a^{2H}}$, (2)

функция автокорреляции $R(t,\tau) = \dfrac{R(at, a\tau)}{a^{2H}}$, (3)

где H – параметр Херста (Hurst), показывает «степень» самоподобности. Значение $H = 0{,}5$ показывает отсутствие самоподобности. Для фрактальных процессов, обладающих протяженной зависимостью статистик, значение параметра Херста лежит в диапазоне $0{,}5 < H < 1$.

Согласно проведенным вычислениям, параметр Херста исследуемого временного ряда H=0,9. Исследования автокорреляционной функции интенсивностей трафика свидетельствуют о медленно убывающей зависимости между величинами интенсивностей трафика в разные моменты времени. Произведенные расчеты по формулам (1)–(3) временных рядов с различным уровнем агрегирования также подтвердили самоподобный характер процесса.

Самоподобные процессы обладают сложным поведением, согласующимся с понятием детерминированного хаоса. Эволюцию системы можно наблюдать не только как функцию времени, но и

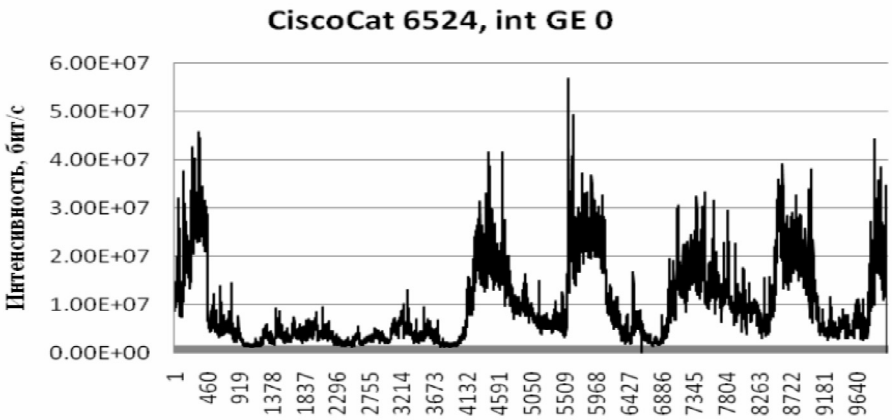


Рис. 2. График интенсивностей трафика на порту GE 0

как траекторию системы в фазовом пространстве. Фазовое пространство – многомерное пространство, где каждое измерение соответствует определенной системной переменной. Каждая точка в фазовом пространстве соответствует уникальному состоянию системы. Режим детерминированного хаоса также характеризуется аттрактором, но траектория такого аттрактора непериодическая (не замыкается) и режим функционирования неустойчив (малые отклонения от начальных условий нарастают экспоненциально). Ф. Такенсом такие аттракторы названы «странными». Согласно теореме Такенса [5], можно восстановить параметры динамической системы по единственной реализации (временному ряду) с помощью изучения траектории системы в p-мерном фазовом пространстве, координатами которого являются компоненты следующего вектора:

$$Y_i^p = \left\{ X_i, ..., X_{i-(p-1)} \right\}, \qquad (4)$$

где p – лаг. Вектор (4) лага p называется *линией задержки*. Данная операция называется *погружением аттрактора в пространство размерности* p. Результатом успешного погружения является выявление определенных закономерностей в поведении траектории системы в пространстве данной размерности. Смысловая трактовка состоит в следующем: в каждый определенный момент система проходит подобные условия – внутреннее и внешнее состояние системы. Предсказание эксплуатирует этот принцип: используя наблюдаемое поведение системы, можно предсказать ее будущее поведение, когда схожие условия появятся вновь. Линия временной задержки представляет историю (эволюцию) системы. Теорема Такенса предполагает, в принципе, нелинейную авторегрессию в форме:

$$x(t+1) = \psi(x(t), x(t-1), ..., x(t-p+1)), \qquad (5)$$

где $\psi(\cdot)$ – некоторая нелинейная функция своих аргументов.

Таким образом, задача прогнозирования временного ряда сводится к задаче оценки $F(\cdot)$ нелинейной функции $\psi(\cdot)$ от многих переменных по набору примеров, заданных историей временного ряда. Детальный анализ теоремы Такенса показывает, что при ее использовании накладываются некоторые дополнительные ограничения, в частности, на вид функции $\psi(\cdot)$. Реально эта функция должна зависеть от меньшего числа параметров, т. е. определять отображение в себя некоторой m-мерной поверхности в p-мерном пространстве [5]. Это обстоятельство в полной мере «учитывается» персептроном, т. к. структура многослойных персептронов оказывается такой, что позволяет строить проекции малой размерности.

Ниже приведены основные результаты решения задачи построения прогнозной нейросетевой модели (НСМ).

Постановка задачи. Дан временной ряд самоподобного процесса:

$$\left\{ X(t),\ t \in \overline{1, N} \right\},$$

где $X(t)$ – интенсивность трафика в момент времени t. Необходимо построить по экспериментальным данным математическую модель для вычисления прогнозных значений $X(t)$ на T шагов вперед с заданной точностью.

Пусть p – размерность фазового пространства. Тогда вектор входных переменных $Z(t) = \left\{ t, X(t), X(t-1), ..., X(t-(p-1)) \right\}$; вектор выходных переменных $Y(t) = \left\{ X(t+1), X(t+2), X(t+3) \right\}$.

Необходимо построить отображение вида:

$$Y(t) = \hat{F}(Z(t)),$$

где $\hat{F}(\cdot)$ – оператор нейросетевого отображения.

Основные этапы решения задачи.

1 этап. Решена задача предобработки и нормировки реально измеренных данных интенсивностей трафика на порту GE0.

Для нашей задачи выбрана нормировка, использующая статистические характеристики данных, такие, как выборочная средняя и дисперсия:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - \overline{x}_i}{\sigma_i}, \quad \overline{x}_i \equiv \frac{1}{P}\sum_{\alpha=1}^{P} x_i^{\alpha}, \sigma_i^2 \equiv \frac{1}{P-1}\sum_{\alpha=1}^{P}\left(x_i^{\alpha} - \overline{x}_i\right)^2.$$

2 этап. Выбор модельной структуры.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать нейронные сети типа многослойный персептрон (MLP). Архитектура нейросети: многослойный персептрон с двумя скрытыми слоями. Функция активации нейронов скрытого слоя – гиперболический тангенс; выходного слоя – линейная функция. Алгоритм обучения: алгоритм обратного распространения ошибки. При выбранной модельной структуре нейросети процедура обучения представляет собой отображение множества экспериментальных данных на множество параметров (весовых коэффициентов) нейросетевой модели с целью получения оптимального в силу некоторого критерия, выходного сигнала.

Таблица 1

Фрагмент значений векторов выходных данных

	$X(t+1)$	$X^\wedge(t+1)$	$X(t+2)$	$X^\wedge(t+2)$	$X(t+3)$	$X^\wedge(t+3)$
1	–0,67854	–0,69324	–0,70211	–0,68568	–0,66604	–0,67567
2	–0,70211	–0,70213	–0,66604	–0,69251	–0,68107	–0,6839
3	–0,66604	–0,71813	–0,68107	–0,7069	–0,68861	–0,70014
4	–0,68107	–0,70917	–0,68861	–0,69946	–0,71239	–0,69284
5	–0,68861	–0,71327	–0,71239	–0,70218	–0,70119	–0,69562
6	–0,71239	–0,72433	–0,70119	–0,71211	–0,69074	–0,70412

Таблица 2

Относительные ошибки и ошибки вычисления НСМ

	$E(t+1)$	Eотн $(t+1)$, %	$E(t+2)$	Eотн $(t+2)$, %	$E(t+3)$	Eотн $(t+3)$, %
1	0,014705	–2	–0,01644	2	0,009621	–1
2	1,14E–05	0	0,026462	–4	0,002827	0
3	0,052086	–8	0,025828	–4	0,011527	–2
4	0,028104	–4	0,010851	–2	–0,01955	3
5	0,024655	–4	–0,01021	1	–0,00558	1
6	0,011939	–2	0,010922	–2	0,013381	–2

3 этап. Обучение и тестирование сети.

При построении НСМ весь массив данных разбит на три массива: обучающая, валидационная и тестовая выборка. По данным обучающей и валидационной выборки построены НСМ с ранним остановом.

Результаты тестирования представлены на рис. 3 и в табл. 1, 2.

В табл. 2 использованы следующие обозначения: $E(t+N)$ – ошибка вычисления НСМ: $E(t+N)= X(t+N)–X^\wedge(t+N)$, где $X(t+N)$ – регламентированное значение интенсивности в точке $(t+N)$; Eотн $(t+N)$ – относительная ошибка вычисления НСМ: Eотн $(t+N)=(X(t+N)–X^\wedge(t+N))/X(t+N)$; $X^\wedge(t+N)$ – вычисленное НСМ значение интенсивности в точке $(t+N)$.

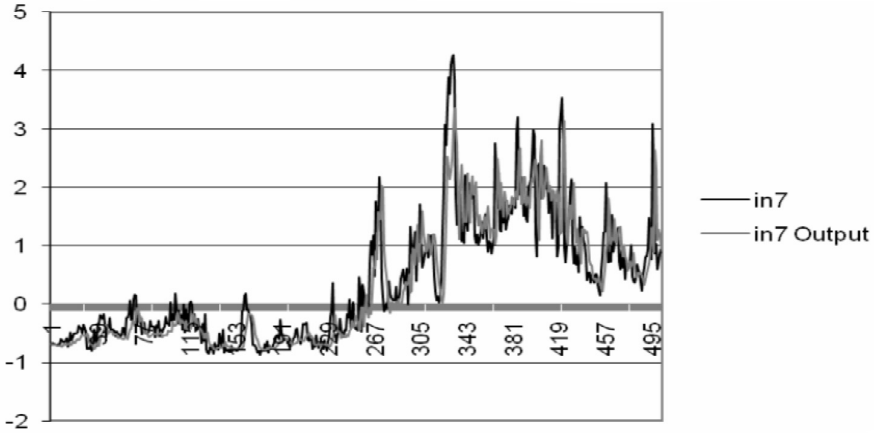


Рис. 3. График результатов тестирования нейросети

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для решения задачи прогнозирования интенсивностей сомоподобного трафика телекоммуникационной сети с пакетной передачей данных можно использовать нейросетевые технологии. Ошибка прогноза не превышает 4 %.

Возможность прогнозирования интенсивностей самоподобного трафика сети позволяет получить данные для решения задачи управления – задачи формирования алгоритма предотвращения перегрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 10-01-00381-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Leland, W.E.** On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic [Текст]/W.E. Leland, M.S. Taqqu [et al.]// Proc. ACM SIG COMM'93.–San Fransisco, CA, 1993. –P. 183–193.

2. **Шелухин, О.И.** Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения [Текст]/О.И. Шелухин, А.В. Осин, С.М. Смольский; Под ред. О.И. Шелухина.–М.: Физматлит, 2008.–368 с.

3. **Крылов, В.В.** Теория телетрафика и ее приложения [Текст]/В.В. Крылов, С.С. Самохвалова.–СПб.: БХВ-Петербург, 2005.–288 с.

4. **Городецкий, А.Я.** Информатика. Фрактальные процессы в компьютерных сетях: Учеб. пособие [Текст]/А.Я. Городецкий, В.С. Заборовский.–СПб.: СПбГТУ, 2000.

5. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс [Текст]/ С. Хайкин; Пер. с англ.–М.: Изд. Дом «Вильямс», 2006.–2-е изд.–1104 с.

УДК 658.512:004.42,658.512:519.87

К.Г. Жуков, Д.Н. Бутусов

КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Один из способов описания динамических систем – представление в виде передаточной функции. Передаточные функции высокого порядка могут быть представлены в виде передаточных звеньев второго и первого порядка. При подобном представлении имеет смысл повысить точность реализации каждого звена системы, что приведет к уменьшению общей погрешности. В работе [2] рассматривается способ перехода от передаточной функции к системе уравнений в нормальной форме Коши, называемый *методом совместного интегрирования*.

Пусть управляемая система с одним входом и одним выходом (SISO-система) задана следующей передаточной функцией:

$$W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{\omega^2}{S^2 + 2\varsigma\omega S + \omega^2}. \qquad (1)$$

Запишем выражение (1) в виде дифференциального уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\varsigma\omega\frac{dy}{dt} + \omega^2 y = \omega^2 x(t). \qquad (2)$$

Выполним следующие преобразования над выражением (2):

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\varsigma\omega\frac{dy}{dt} = \omega^2 x(t) - \omega^2 y.$$

Разделим обе части выражения на ω:

$$\frac{d^2 y}{dt^2}\frac{1}{\omega} + 2\varsigma\frac{dy}{dt} = \omega x(t) - \omega y.$$

Вынесем оператор $\frac{d}{dt}$ за скобки в левой части:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dy}{dt}\frac{1}{\omega} + 2\varsigma y\right) = \omega x(t) - \omega y.$$

Приняв выражение в скобках за y_1, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = \omega x(t) - \omega y_2, \\ \frac{dy_2}{dt} = \omega y_1 - 2\varsigma\omega y_2. \end{cases} \qquad (3)$$

Аналитическое решение для системы (3) имеет вид:

$$y_2(t) = -e^{-\pi t}\cdot\frac{\pi}{k}\sin(kt) - e^{-\pi t}\cos(kt) + 1. \qquad (4)$$

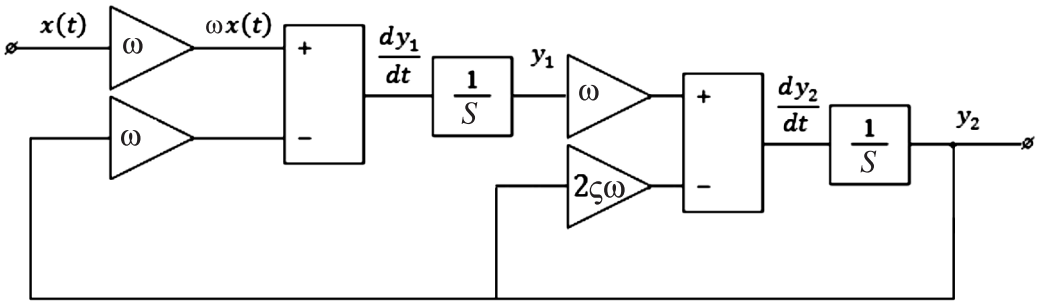


Рис. 1. Структурная схема системы (3)

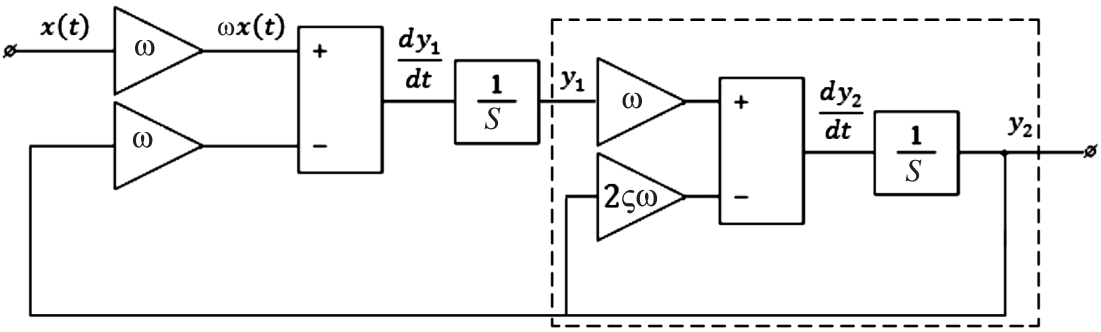


Рис. 2. Выделение внутреннего контура из схемы (рис. 1)

Структурная схема непрерывной модели системы уравнений (3) приведена на рис. 1.

Внешний контур модели (см. рис. 1) соответствует случаю, когда $\zeta = 0$. Этот вариант исследован в работе [2], доказана возможность коррекции погрешности вычисления переменных состояния (y_1 и y_2).

Исследуем возможность коррекции внутреннего контура (выделен пунктиром на рис. 2). Выделенный фрагмент соответствует линейному звену первого порядка с передаточной функцией (5):

$$W(S) = \frac{\omega}{s + 2\varsigma\omega}. \qquad (5)$$

Перейдем от передаточной функции (5) к нормальной форме Коши:

$$\frac{dy_2}{dt} = \omega x(t) - 2\varsigma\omega y_2. \qquad (6)$$

Аналитическое решение уравнения (6) при $\omega x(t) =$ const имеет вид:

$$y(t) = 1 - e^{-2\varsigma\omega t}. \qquad (7)$$

Перейдем от непрерывной модели системы (рис. 3) к эквивалентной системе (рис. 4). Произведем коррекцию решения уравнения первого порядка согласно методике, изложенной в [1]. Времена запаздывания для импульсных элементов системы назначим в соответствии с выражениями, приведенными в [1].

Моменты срабатывания ключей на рис. 4 соответствуют значениям времен запаздывания $\Delta_1 = 0{,}125$, $\Delta_2 = 0{,}250$. Во втором процессоре значения времен запаздывания равны $\Delta_1 = 0{,}875$, $\Delta_2 = 0{,}750$ соответственно.

На рис. 5 представлен двухпроцессорный ва-

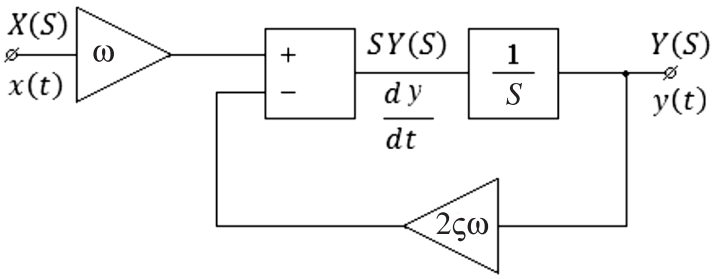


Рис. 3. Структурная схема непрерывной модели системы (6)

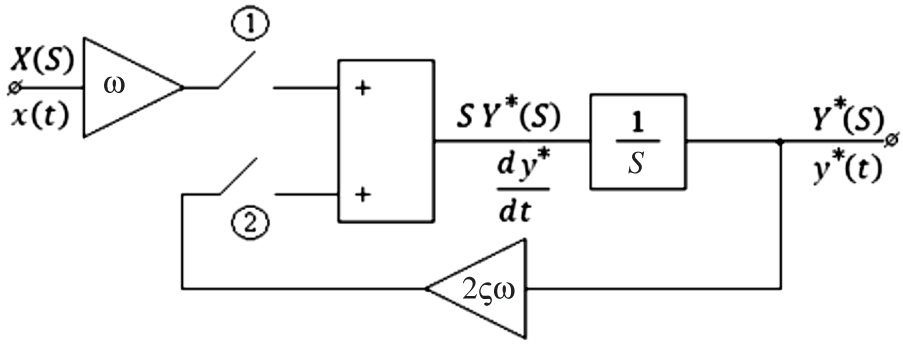


Рис. 4. Структурная схема импульсной модели уравнения (6)

риант Simulink-модели, соответствующий схеме (рис. 4). Результаты исполнения модели приведены на рис. 6.

Найденные коэффициенты коррекции для модели (рис. 5) необходимо перенести в общую модель системы, а также установить скорректированные коэффициенты для гармонического осциллятора [3]. Создадим Simulink-модель системы (3) и установим коэффициенты так, как описано выше. Произведем моделирование с шагом интегрирования $T_s = 0{,}001$ с и временем переходного процесса 5 с. Для сравнительной оценки погрешности полученного решения проведем также моделирование методом Рунге-Кутта второго порядка. Simulink-модель системы (3) и результаты ее выполнения приведены на рис. 7.

Из рис. 7 видна симметрия погрешностей решения в первом и втором процессоре. Усреднение значения выходной переменной между двумя процессорами дает скорректированное решение, приведенное на рис. 8. Для сравнения там же приведено решение методом Рунге-Кутта второго порядка.

В установившемся режиме погрешности методов практически совпадают.

Проведенное исследование показывает, что для общего случая системы второго порядка не удается полностью скомпенсировать погрешность решения. Этот факт можно объяснить следующими причинами.

Решение (4) не является чисто гармонической или чисто экспоненциальной функцией, а пред-

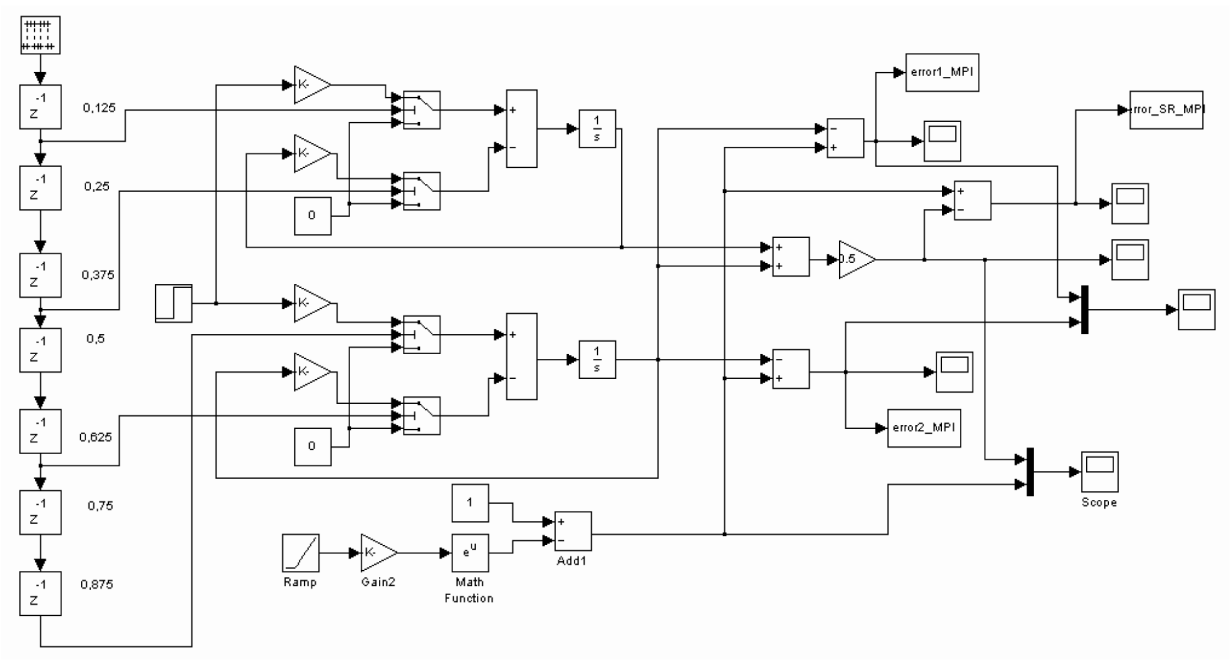


Рис. 5. Импульсная Simulink-модель уравнения (5)

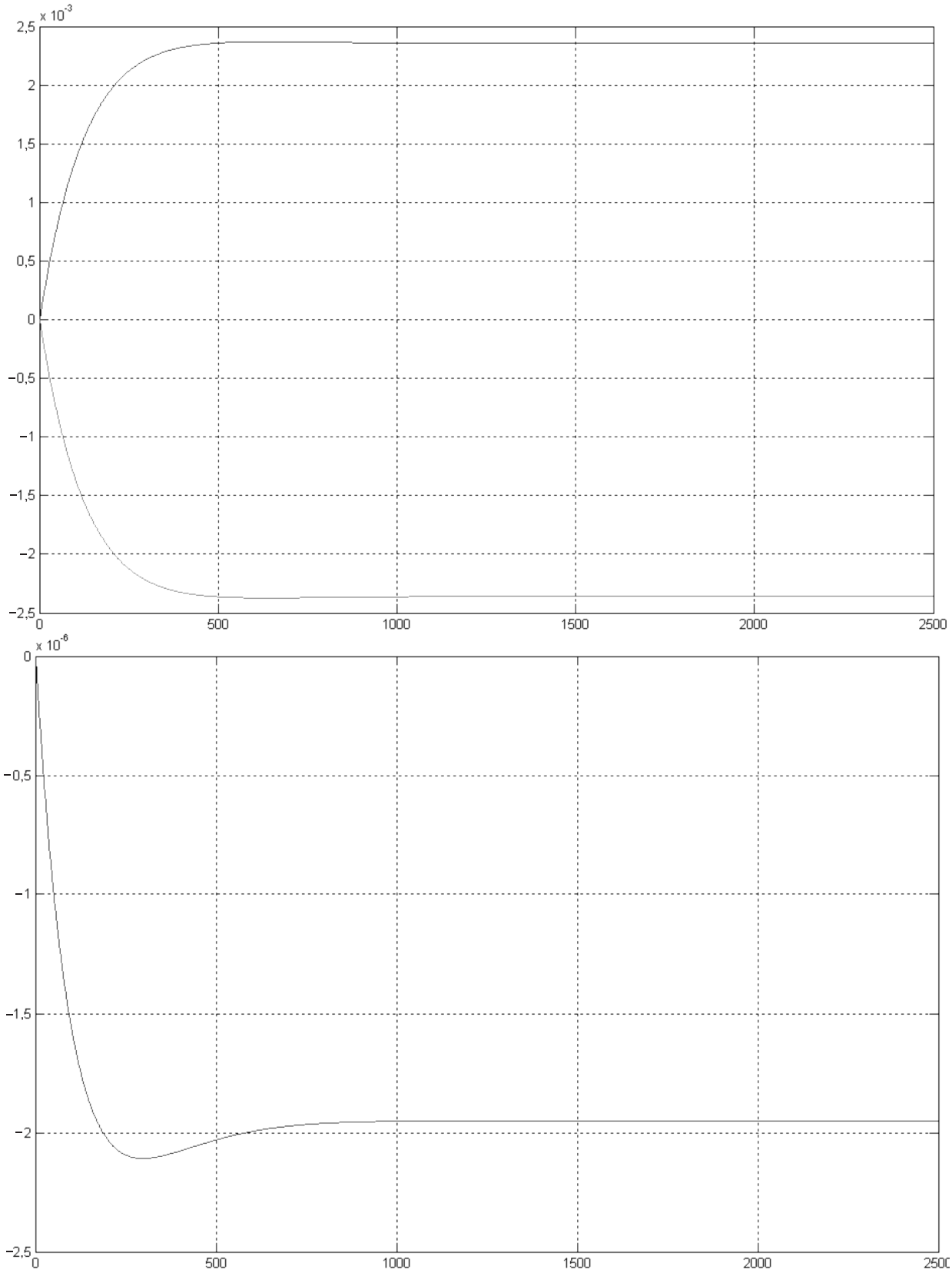


Рис. 6. Графики погрешностей решений в каждом из процессоров и погрешности усредненного значения

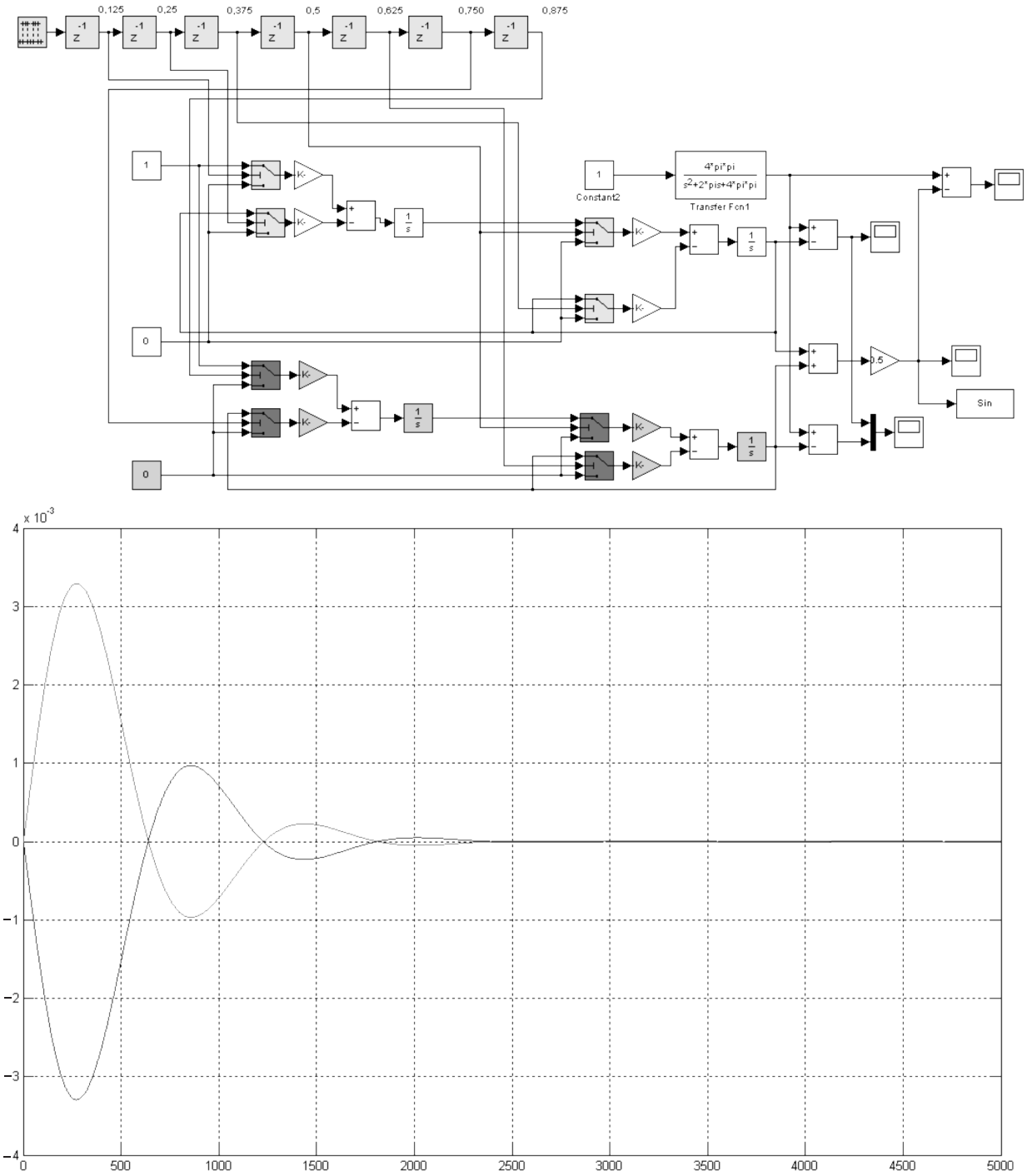


Рис. 7. Блок-диаграмма полной модели системы (3) и графики погрешностей решения для каждого из процессоров

ставляет собой произведение этих двух функций. Для коррекции погрешности интегрирования такого входного сигнала в настоящий момент не получены аналитические выражения. Получение аналитических выражений погрешности является нетривиальной математической задачей.

Использование коэффициентов коррекции для экспоненциальной и гармонической функции дает лишь неполную коррекцию решения.

В статье рассмотрена возможность коррекции решений уравнений второго порядка методом по-

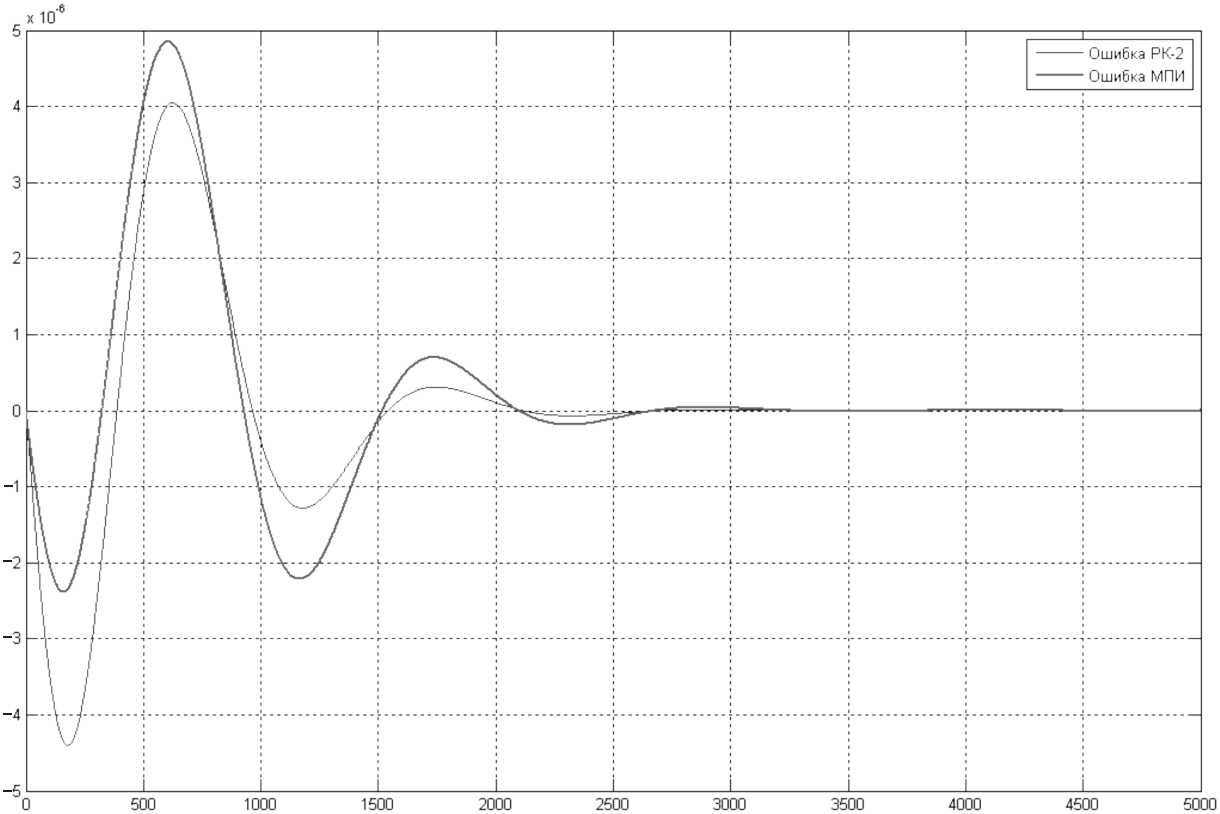


Рис. 8. Сравнение погрешностей метода ПИ и Рунге-Кутта второго порядка

следовательного интегрирования.

Анализ погрешностей решений метода МПИ с коррекцией и метода Рунге-Кутта второго порядка показывает, что методы имеют практически один порядок точности.

При аппаратной реализации предложенного метода с коррекцией возможна организация параллельных вычислений в двух процессорах, что нереализуемо для метода Рунге-Кутта второго порядка.

Полученные результаты могут применяться при каскадном построении цифровых фильтров на основе звеньев второго порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жуков, К.Г.** Анализ и коррекция погрешности цифровых интеграторов встраиваемых систем управления [Текст]/К.Г. Жуков, Д.Н. Бутусов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 6(91). –С. 17–25.

2. **Жуков, К.Г.** Реализация цифровых фильтров методом последовательного интегрирования [Текст]/ К.Г. Жуков, Д.Н. Бутусов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 6(91).–С. 26–35.

3. **Жуков, К.Г.** Коррекция погрешности решения уравнения гармонического осциллятора методом последовательного интегрирования [Текст]/К.Г. Жуков, Д.Н. Бутусов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2010.–№ 6.

4. **Жуков, К.Г.** Методы и средства реализации последовательно-параллельных интегрирующих структур: Дис. … канд. техн. наук [Текст]/К.Г. Жуков. –Л., 1988.

УДК 004.451.2

А.С. Прокопенко, А.Г. Тормасов

АКСИОМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ СОСТОЯНИЙ В МЕТОДЕ RGSEP

Проверка соответствия выполнения параллельных программ заданной спецификации осложнена тем, что порядок, в котором будут выполнены инструкции разных потоков, заранее непредсказуем и необходимо рассмотреть всевозможные варианты выполнения программ. Часто спецификация системы может быть разбита на отдельные свойства, описывающие поведение небольших фрагментов системы. В таком случае применение стратегии проверки каждого локального свойства может позволить избежать проблемы «комбинаторного взрыва» в пространстве состояний системы – значительного роста объема проверок даже при небольшом усложнении комплекса программ. При верификации нужно также учитывать, что программные модули создаются для исполнения в различном окружении. Существующие методы формальной верификации, в частности, дедуктивные методы на основе Rely/Guarantee (R/G) [2], предполагают, что верифицированные в одной системе фрагменты при переносе в другую систему часто требуют новой верификации в условиях изменившегося окружения. Повторную верификацию можно упростить, если изначально как можно точнее локализовать и исследовать влияние окружения на фрагменты программы.

В статье предлагается метод формальный верификации на основе дедуктивного метода композиционной верификации RGSep [1], позволяющий точнее локализовать и исследовать влияние окружения на фрагмент программы за счет введения правил скрытия областей памяти, рассмотрения устойчивости слабейших предусловий и сильнейших постусловий под воздействием окружения.

Обзор метода верификации Rely-Guarantee

Дедуктивный анализ представляет собой формальное доказательство свойств системы. Он заключается в построении набора аксиом и правил вывода, из которых с помощью формальной логики пытаются доказать выполнимость этих свойств.

Композиционный метод дедуктивной верификации программ на общей памяти R/G зарекомендовал себя как качественный метод верификации параллельных программ по заданным критериям. Данный метод позволяет провести верификацию потоков параллельной программы по отдельности. В этом методе для каждого потока выполнение параллельной программы представлено двумя отношениями: Rely и Guarantee, где первое описывает изменение состояний, выполненное потоком, а второе описывает выполнение всех других потоков – внешней среды (окружения). Поскольку выполнение потока зависит от поведения среды, пользователь записывает ряд допущений R_i о предполагаемом выполнении среды. Также пользователь формулирует ряд допущений G_i о выполнении потока. Спецификация каждого фрагмента кода С потока T_i в окружении E_i задается четверкой (p_i, R_i, G_i, q_i). Высказывания p_i, q_i называются *пред*- и *постусловиями*. Предусловие p_i описывает накладываемее на начальное состояние ограничение, постусловие q_i описывает ограничение, накладываемое на финальное состояние потока. Выполнение потока считается правильным в смысле частичной корректности, если предусловие удовлетворяет p_i, изменения общих состояний выполняются в соответствии с R_i, выполнение кода потока удовлетворяет G_i , и если поток завершает работу, то постусловие удовлетворяет q_i.

Обычно память в R/G методе устроена следующим образом: она разделена на ячейки, каждый из потоков имеет доступ ко всем ячейкам памяти. Каждая ячейка имеет идентификатор, представляющий собой слово из латинских букв и цифр и начинающийся с буквы. Ячейки содержат целые числа (запись типа $Stores : Vars \to Values$ означает, что определена функция *Stores*, отображающая множество *Vars* в *Values*, т. е. каждой ячейке памяти приписывает число):

$$Values = \{..., -2, -1, 0, 1, ...\}\ ;\ Vars = \{x, y, ...\}\ ;$$

$$Stores : Vars \to Values\ .$$

Основой для логики выводов правильных программ служат аксиомы и правила вывода. Параллельное выполнение потоков C_1 и C_2 обозначается как $C_1 \| C_2$. Запись о том, что выполнение потока C_1 удовлетворяет спецификации *(p,R,G,q)* записывается как $C_1 sat_{RG}(p,R,G,q)$. Правило корректного выполнения двух потоков в окружении требует, чтобы выполнение каждого из двух потоков удовлетворяло допущению о выполнении и среды, и потоков. Такая конъюнкция допущений записывается как $R \vee G_i$. Требование выполнения постусловий и первого, и второго потока записывается как $q_1 \wedge q_2$. Правило корректного выполнения двух параллельных потоков C_1 и C_2 записывается как

$$\frac{\begin{array}{c} C_1 sat_{RG}(p,(R \vee G_2),G_1,q_1) \\ C_2 sat_{RG}(p,(R \vee G_1),G_2,q_2) \end{array}}{C_1 \| C_2 sat_{RG}(p,R,(G_1 \vee G_2),q_1 \wedge q_2)}.$$

Несмотря на ряд позитивных свойств, метод R/G имеет существенные недостатки, в частности, следующие.

1. Модель памяти представлена единым пулом, нет разделения на локальную память потока и совместно используемую память потоков.

2. Необходимость спецификации всей памяти, даже если рассматриваемая часть системы имеет доступ только к части памяти.

3. Сложность предоставления доступа другим потокам к динамически создаваемым ячейкам памяти.

4. В рамках метода R/G нет возможности описать программу, в которой некоторые потоки имеют совместно используемые области памяти, скрытые от других потоков.

5. Параллельная композиция потоков статична: нет возможности верифицировать программы с динамически создаваемыми и завершаемыми потоками (команды «fork» и «join»).

6. Метод R/G неприменим для верификации свойств живучести (или живости – liveness properties). Иначе говоря, живость – это те свойства программ, которые утверждают, что нечто изначально задуманное произойдет при любом развитии внешних событий и на любом этапе работы собственно программы.

Первые пять из приведенных недостатков являются основными причинами, побудившими Джонса в 2003 г. написать статью [10], призывающую работать над улучшением *декомпозиционности* (т. е. разбиения модели памяти на части, исследования взаимного влияния потоков друг на друга в условиях новой модели, исследования переносимости верифицированных фрагментов в другие окружения) R/G метода. Успехи на этом поприще будут способствовать переносимости фрагментов программ, верифицированных в одном окружении, в другие окружения с меньшими трудозатратами.

Обзор сепарационной логики

Сепарационная логика была создана как расширение логики Хоара, позволяющее анализировать программы с указателями и динамически выделяемыми структурами. Ключевым элементом этой логики является операция сепарационной конъюнкции (separating conjunctions), используемая для определения разрозненных частей памяти. Запись сепарационной конъюнкции $p*p'$ обозначает возможность разбития программных состояний на две части. Первая часть характеризуется высказыванием p, вторая – p'.

Модель памяти в сепарационной логике устроена, например, следующим образом [6]:

$$Values = \{...,-2,-1,0,1,...\};\ Vars = \{x, y, [x], ...\};$$

$$Locations = \{1, 2, ...\};\ B = \{true, false\};$$

$$Heap = Locations \to_{fin} Values;$$

$$Stores = Vars \to_{fin} Values;$$

$$Bool = Vars \to_{fin} B;\ \Sigma = Stores \times Heap \times Bool.$$

Запись [x] означает содержание ячейки по адресу x. Сами программные состояния характеризуются через утверждения, описывающие состояние памяти (формулы состояния памяти).

Если Σ – пространство программных состояний, $B=\{true,false\}$, тогда *высказыванием* (*утверждением*) p над пространством состояний называют предикат вида $p = \{\alpha \mid \alpha : \Sigma \to B\}$.

В сепарационной логике высказывания задаются следующим образом:

$$p,q := false \mid emp \mid e = e' \mid e \to e' \mid p \Rightarrow$$

$$\Rightarrow q \mid p * q \mid p - \otimes q \mid ...$$

Здесь *emp* введено для обозначения пустой кучи (Heap), $e \to e'$ описывает состояние, в котором куча состоит из одной выделенной ячейки с адресом e с содержанием e' Запись сепарационной конъюнкции $p*q$ означает возможность разбития кучи на две части: первая часть кучи характеризуется высказыванием p, вторая – q. Сепарационное

вычитание (septraction) обозначается как $p - \otimes q$ и означает, что куча, характеризующаяся утверждением q, может быть разбита на две части, одна из которых описывается утверждением p. Отношение выполнимости $(t,h,i)|=p$ означает, что в состоянии $(t,h,i) \in \Sigma, t \in Stores, h \in Heap, i \in Bool$ утверждение p истинно. Формальная запись сепарационной конъюнкции и сепарационного вычитания:

$$(t,h) \models (p * q) \quad :\Leftrightarrow \quad \exists h_1, h_2 . h_1 \perp h_2 = \\ = h \wedge (h_1 \models p) \wedge (h_2 \models q) ;$$

$$(t,h) \models (p - \otimes q) \quad :\Leftrightarrow \quad \exists h_1, h_2 . h_1 \perp h = \\ = h_2 \wedge (h_1 \models p) \wedge (h_2 \models q) .$$

В отличие от метода R/G в сепарационной логике для параллельных программ на общей памяти (Concurrent Separation Logic, CSL) гарантией независимости параллельного выполнения потоков является требование доступа этих потоков к различным частям общей памяти. Обращение двух потоков к различным частям памяти подчеркивается записью сепарационной конъюнкции пред- и постусловий. Отношение выводимости формул обозначается как |–. Правило корректного выполнения имеет вид:

$$\frac{\vdash \{p_1\} C_1 \{q_1\} \quad \vdash \{p_2\} C_2 \{q2\}}{\vdash \{p_1 * p_2\} C_1 \parallel C_2 \{q_1 * q_2\}}.$$

В логике CSL подразумевается взаимодействие потоков через общую память только при строгом контроле отсутствия состояния конкурентного доступа к памяти (ситуации, когда несколько потоков пытаются одновременно получить доступ к одной и той же ячейке памяти). Это достигается путем определения точного инварианта (precise invariant), который определяет условия монопольного доступа к общим ячейкам памяти.

Комбинирование R/G и CSL

Применение R/G метода верификации параллельных программ осложнено тем, что модель состояний представлена одним пулом памяти. В то же время CSL обладает мощным аппаратом для разделения памяти на части. Однако верификация CSL логикой осложнена выразительной способностью инвариантов, делающих непригодным CSL логику для верификации параллельных программ при необходимом уровне атомарности команд типа чтение/запись. Исследователями выполнен большой объем работы для объединения сильных сторон обоих подходов в единые методы верификации: SAGL [3], RGSep и LRG [8]. Эти подходы различаются как по технической реализации метода (уровню абстрактности задания команд используемого языка программирования типа Си, грамматики высказываний, модели программных состояний, правил вывода), так и по выразительной силе (возможности расширения этих методов для верификации свойств живости, сокрытию ячеек памяти одних потоков от других и т. д.).

Метод RGSep и SAGL

В методе RGSep и SAGL ячейки памяти разделены на общие и на локальные. Состояние σ каждого потока включает общие состояния s и локальные l, доступные только этому потоку. Спецификация фрагмента C потока программы задается четверкой ((p,r), R, G,(q,r')), где p и q – пред- и постусловия, определяющие локальные состояния потока, r и r'– спецификация общих частей. В RGSep и SAGL правило параллельного отличается от соответствующего правила R/G тем, что отображает разделение памяти потока на общую память и локальную необходимостью спецификаций этих частей отдельными предикатами:

$$\frac{\begin{array}{c} R \vee G_2; G_1 \vdash \{(p_1, r)\} C_1 \{(q_1, r_1)\} \\ R \vee G_1; G_2 \vdash \{(p_2, r)\} C_2 \{(q_2, r_2)\} \end{array}}{R; G_1 \vee G_2 \vdash \{(p_1 * p_2, r\} C_1 \parallel C_2 \{(p_1 * p_2, r_1 \wedge r_2)\}}.$$

В методе SAGL используется язык программирования, заданный грамматикой типа грамматики ассемблерного языка программирования для RISC-архитектуры с примитивами блокирования/разблокирования (lock/unlock), это затрудняет использование метода на практике по чисто техническим соображениям. В методе RGSep используется язык программирования типа Си, что делает этот метод более удобным в применении.

Метод RGSep допускает деление общей памяти на несколько регионов r_1, …, r_n, каждый из которых специфицируется парой $(R(r_i), G(r_i))$, любой из потоков системы может иметь доступ к каждой из этих областей памяти. Правило выполнения фрагмента кода C во взаимоисключающем режиме имеет вид [12]:

$$\frac{\begin{array}{c}\vdash\{(p''*p_1' *\ldots*p_n')\}atomic\{C\}\{(q''*q_1'*\ldots*q_n')\}\\ \forall i\in\{1,\ldots,n\}:\quad Stab(p_i,R(r_i))\quad Stab(q_i,R(r_i))\quad p_i'\to q_i'\Rightarrow p_i\to q_i\quad (p_i\to q')\subseteq G(r_i)\end{array}}{R,G\vdash\{(p'',p_1^{r1}*\ldots*p_N^{r,n})\}atomic\{C\}\{(q'',q_1^{r1}*\ldots*q_N^{r,n})\}},$$

где запись $Stab(p_i, R(r_i))$ означает устойчивость предиката под действием окружения, специфицированным $R(r_i)$ (формальное определение будет дано ниже).

Показано, что RGSep метод применим для верификации некоторых свойство живости [5], программ с динамическим созданием/завершением потоков [9]. Существуют автоматизированные реализации метода RGSep и т. д. Но не доказано, что метод обладает достаточной выразительной силой для верификации программ, в которых некоторые потоки имеют области памяти, скрытые от других, что ограничивает модульность.

Метод LRG

Несмотря на внешнюю схожесть с методами RGSep и SAGL, метод LRG является отдельным методом на основе R/G и CSL. Метод LRG создавался с целью дедуктивной верификации программ, в которых некоторые потоки могут иметь области памяти, скрытые от других. Отличия этого метода от RGSep заключаются в логическом, а не в фактическом разделении на локальные и общие ячейки памяти потоков, в способе задания высказываний, в контроле за устойчивостью высказываний под воздействием окружения, в правилах вывода. Как и в CSL, разделение на области памяти происходит при задании строгих инвариантов I (соответствующая запись имеет вид $I \triangleright \{R,G\}$ и читается как «действия окружения и потока защищены точным инвариантом I»). Спецификация фрагмента кода потока определяется пятеркой ($p*r$, R, G, I, $r*r'$). Также метод отличается от RGsep и SAGL наличием правила сокрытия части общих регионов памяти от некоторых потоков:

$$\frac{R*R';G*G';I*I'\vdash\{p\}C\{q\}\qquad I\triangleright\{R,G\}}{R,G,I\vdash\{p\}C\{q\}}.$$

Правило параллельного исполнения имеет вид:

$$\frac{\begin{array}{c}R\cup G_2;G_1;I\vdash\{p_1*r\}C_1\{q_1*r'\}\qquad I\triangleright\{R,G\}\\ R\cup G_1;G_2;I\vdash\{p_2*r\}C_2\{q_2*r'\}\qquad r\cup r_1\cup r_2\Rightarrow I\end{array}}{R;G_1\cup G_2;I\vdash\{p_1*p_2*r\}\ C_1\mid C_2\ \{p_1*p_2*(r_1\wedge r_2)\}}.$$

Правило выполнения фрагмента кода C во взаимоисключающем режиме имеет вид:

$$\frac{P\to Q\subseteq G\quad P\cup Q\Rightarrow I\quad I\triangleright\{R,G\}\quad Sta(\{p,q\},R*Id)\quad P_1\to Q_1\subseteq G}{R;G;I\vdash\{p\}atomic\{C\}\{q\}}.$$

Главным недостатком LRG является сложность задания точных инвариантов, причем, непонятно, возможно ли использовать подход из CSL, когда инварианты ослабляются до задания интуитивных высказываний [8]; также до сих пор не доказано и не опровергнуто, что метод применим для доказательства свойств живости; не исследована устойчивость слабейших предусловий и сильнейших постусловий под влиянием окружения (положительные результаты исследования в этом направлении могли бы снизить объем работы по верификации фрагментов программы, перенесенных из окружения, в котором они уже были верифицированы).

Цель работы

В целях улучшения применимости метода R/G к верификации многопотоковых программ созданы три метода дедуктивной верификации: SAGL, RGSep и LRG. Эти методы различаются как по математической модели, так и по типам программ, которые они способны верифицировать. Наиболее активно развиваются два: RGSep и LRG. Единственным серьезным преимуществом метода LRG перед RGSep является возможность верификации программ, в которых одни потоки имеют совместно используемые области данных, скрытые от других потоков. В прочих компонентах метод RGSep более проработан. Это выражается в возможности верификации методом RGSep свойств живости; требуется меньше усилий для верификации компонентов системы в различных окружениях за счет исследования устойчивости слабейших предусловий, слабейших постусловий под влиянием окружения; определенные шаги метода автоматизированы. Сейчас, например, если необходимо проверить дедуктивным методом библиотечную функцию, при выполнении

создающую несколько потоков, на отсутствие гонок, термируемость, то надо использовать и RGSep, и LRG, что фактически означает проведение двойной работы по спецификации, формальному доказательству (выводу последовательности формул).

Решение проблемы расширения применимости метода RGSep для верификации программ, в которых одни потоки имеют общие регионы памяти, скрытые от других потоков позволит верифицировать разные свойства программ единым расширенным методом RGSep там, где ранее приходилось использовать сразу два метода − RGSep и LRG.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

внести изменения в модель состояний;

ввести новое правило сокрытия ресурсов, позволяющее скрывать общие регионы памяти некоторых потоков от действий других;

внести необходимые поправки в другие правила RGSep логики;

исследовать влияние изменений на правила со слабейшими предусловиями и сильнейшими постусловиями, устойчивыми под действием окружения.

Модель состояний программы

При построении модели параллельных программ необходимо формально представить состояния и переходы между состояниями.

В нашем расширении метода RGSep модель памяти построена на основе модели памяти сепарационной логики, указанной выше в обзоре сепарационной логики.

Каждый поток имеет эксклюзивный доступ к локальной памяти L и доступ к ячейкам общей памяти S. Состояние потока σ записывается как $\sigma = (l,s) \in \Sigma^2, l \in L, s \in S$. В нашей модели общей памяти могут существовать области (регионы) памяти $r_1, .\, r_n \subseteq S, \forall i,j : r_i \cap r_j = \varnothing$; $\forall i,j : i \neq j, 1 \le i,j \le n$; $\bigcup_{i=1}^{n} r_i = S$. К некоторым регионам доступ могут иметь все потоки, к части могут иметь доступ только часть потоков. Последнее обстоятельство отличает модель общей памяти, разбитой на регионы в предлагаемом методе, от оригинальной модели памяти множественных регионов RGSep.

Синтаксис языка программирования

Будем рассматривать параллельные программы, каждая из которых представляет собой последовательность из инициализирующих команд и набора одновременно исполняющихся потоков $C_0;(C_1||\ldots||C_n)$. Каждый поток состоит из операторов.

Определим синтаксис используемого языка программирования типа Си следующим образом:

команды: $C := skip \mid x = E \mid x = [E] \mid [E] = E \mid C; C \mid if\ B\ then\{C\}\ else\ \{C\} \mid$ while $B\ do\ \{C\} \mid x = new() \mid \mid delete(E)$;

целочисленные выражения: $E := x \mid n \mid E\ iop\ E$;

логические выражения: $B := b \mid E\ bop\ E$.

Вспомогательные определения: $n \in Z$ – множество целых чисел; $b \in B = \{true, false\}$ – множество логических значений; $iop \in Iop = \{+,-,[],...\}$ – конечное множество целочисленных бинарных операций; $bop \in Bop = \{=\ ,<,>,\ldots\}$ – конечное множество логических бинарных операций. Запись [x] означает содержание ячейки по адресу x. Оператор skip (пустой оператор) не меняет состояния программы.

Синтаксис и семантика логики высказываний

Поскольку в нашей модели мы представили состояния как разбиение на регионы, то высказывания характеризуют сразу всё состояние. Тут можно специфицировать каждое состояние посредством высказываний для каждой региона памяти, но вместо этого воспользуемся грамматикой высказываний из RGSep. Тогда, пусть запись $\underline{p}$ – утверждение относительно общих частей, а $\underline{\underline{p}}$ – локальных. Синтаксис логики высказываний:

$$p,q := \underline{p} \mid true \mid false \mid emp \mid e =$$
$$= e' \mid e \to e' \mid p \Rightarrow q \mid p * q \mid p - \otimes q \mid \ldots\ .$$

Отношение |= выполнимости формулы высказывания в состоянии (s,l) определяется по индукции (оператор $\models_{SepL}$ – означает выполнимость в сепарационной логике):

$$(s,l) \models P \Leftrightarrow l \models_{SepL} P$$

$$(s,l) \models \underline{p} \Leftrightarrow (l = null) \wedge (s \models_{SepL} p)$$

$$(s,l) \models p_1 * p_2 \Leftrightarrow \exists l_1, l_2 (l = l_1 \perp l_2) \wedge (l_1, s \models_{SepL} p_1) \wedge$$
$$\wedge (l_2, s \models_{SepL} p_2)$$

$$(s,l) \models p_1 \vee p_2 \Leftrightarrow (l_1, s \models_{SepL} p_1) \vee (l_2, s \models_{SepL} p_2)$$

$(s,l) \models p_1 \wedge p_2 \Leftrightarrow (l_1, s \models_{SepL} p_1) \wedge (l_2, s \models_{SepL} p_2)$

$(s,l) \models p - \otimes q \Leftrightarrow \exists l_1, l_2 (l_2 = l_1 \perp l) \wedge (l_1, s \models_{SepL} p) \wedge$
$\wedge (l_2, s \models_{SepL} q)$

Взаимное влияние потоков друг на друга

При моделировании вычисления параллельной программы мы принимаем широко распространенную предпосылку – чередование исполнений (мультипрограммность, interleaving). Она позволяет значительно упростить анализ реального параллельного вычисления, которое выполняется процессорами машины, и в то же время адекватно его представить. Чередование позволяет рассматривать выполнение параллельной программы как последовательность дискретных шагов. Для того чтобы в таком представлении были учтены все возможные сценарии исполнения программы, и при этом не нарушалось требование адекватного представления программы, необходимо, чтобы инструкции были атомарны (действие этих операций не прерывается) в той мере, которая соответствует реализации команд.

При исполнении параллельной программы часть потоков может обращаться к общим ячейкам памяти. Обращение к ячейкам происходит посредством команд описанного выше языка программирования типа Си. Некоторые из команд могут состоять из нескольких операций чтения и записи в общую ячейку памяти (операции чтения/записи являются атомарными для простых типов данных на архитектуре x86). Для того чтобы провести анализ на возникновение ситуации неупорядоченного доступа параллельных потоков к общим данным, необходимо тщательно определить переходы.

Действие $a := p \sim> q$ определяет переход системы из одного состояния (l,s_p) в другое (l,s_q), где высказывания p и q характеризуют, соответственно, начальное и конечное состояния. Семантика переходов определяется следующим образом:

$$s_1 * s_0, s_2 * s_0 \models p \sim> q \quad :\Leftrightarrow \quad s_1 \models p \wedge s_1 \models q\,;$$

$$s_1, s_2 \models [p] \quad :\Leftrightarrow \quad s_1 = s_2 \wedge s_1 \models p\,;$$

$$s, s' \models a * a' \quad :\Leftrightarrow \quad s = s_1 \perp s_2 \wedge s' = s_1' \perp s_2' \wedge$$
$$\wedge (s_1, s_1' \models a_1) \wedge (s_2, s_2' \models a')\,;$$

$$s_1, s_2 \models a \Rightarrow a' \quad :\Leftrightarrow \quad \textit{если из } s_1, s_2 \models a,$$
$$\textit{следует } s_1, s_2 \models a'\,.$$

Первая формула специально записана в расцепленном на две части виде для уменьшения работы при верификации. Аналогично можно записать и другие выражения, если присутствует часть общего состояния, которая не затрагивается действием.

Поскольку некоторые операции меняют состояния ячеек, то и в нашей работе имеет смысл ввести понятие устойчивости высказывания p под воздействием a.

Утверждение p *устойчиво* под действием a $Stab(p,a)$ тогда и только тогда, когда $\forall s, s'$ таких, что $s \models p \wedge (s,s') \models a$ следует $s' \models p$.

Сначала нами была доказана **лемма 1** о том, что наличие множественного числа регионов не влияет на истинность следующих свойств RGSep логики:

$$Stab(p, r -> q) \quad \Leftrightarrow \quad \models (r - \otimes p) * q \Rightarrow p\,;$$

$$Stab(p, (R_1 \cup R_2)^*) \quad \Leftrightarrow \quad Stab(p, R_1) \wedge Stab(p, R_2)\,;$$

$$Stab(p_1, a) \wedge Stab(p_2, a) \quad \Leftrightarrow \quad Stab(p_1 \wedge p_2, a)\,;$$

$$Stab(p_1, a_1) \vee Stab(p_2, a_2) \Leftrightarrow Stab(p_1 \vee p_2, a_1 \wedge a_2)\,;$$

$$Stab(p, a_1) \wedge Stab(p, a_2) \quad \Leftrightarrow \quad Stab(p, a_1 \wedge a_2)\,.$$

Первое высказывание о стабильности утверждает, что если из состояния, удовлетворяющего высказыванию p, вычистить часть состояния, удовлетворяющего r, и заменить на часть, удовлетворяющую высказыванию q, то результат по-прежнему будет удовлетворять p. Отметим, что эти свойства устойчивости выполняются и в логике LRG. Здесь и далее доказательства некоторых утверждений опущены для экономии места.

Если имеем два высказывания о различных областях памяти, каждое из которых устойчиво под действием (оба действия различаются), то совместное выполнение не обязательно будет устойчиво.

Пример. Пусть $L_1 \mapsto 1, a_1 = \{L_2 \mapsto 2, L_2 \mapsto 3\}$ и $L_2 \mapsto 4, a_2 = \{L_1 \mapsto 5, L_1 \mapsto 6\}$ причем $L_1 \neq L_2$, т. е. имеем, что $Stab(p_1,a_1)$, $Stab(p_2, a_2)$ – истина, а $Stab(p_1 * p_2, a_1 * a_2)$ – ложь.

Этот факт связан с тем, что мы задаем высказывание на подмножестве общих состояний (аналогичная картина наблюдается и в LRG). Поэтому типичного определения инварианта как утверждения истинного «до» и «после» выполнения, нам недостаточно: необходимо еще требование точного инварианта I.

Будем говорить, что *действие a защище-*

но точным инвариантом $I \triangleright a$ тогда и только тогда, когда инвариант имеет место в начальном и конечном переходах, удовлетворяющих *a*, и является точным инвариантом *precise* (*I*): $a \Rightarrow (I \sim> I) \cap precise\,(I)$.

Доказана **лемма 2** (в оригинальном методе RGSep этой леммы нет, в LRG ссоответствующая лемма присутствует):

$$(Stab(p_1,a_1) \cap Stab(p_2,a_2) \cap p_1 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow I \cap (I \triangleright a) \;\Leftrightarrow\; Stab(p_1 * p_2, a_1 * a_2)\,.$$

В логике RGSep введено понятие слабейших предусловий и сильнейших постусловий, устойчивых под внешним действием. Ниже покажем, какими свойствами обладают такие высказывания в предложенном нами расширении метода RGSep, в котором есть регионы общей памяти, скрытые от других потоков.

Напомним определения из логики RGSep: $\lfloor p \rfloor_R = \cup\{q \mid q \Rightarrow p \cap Stab(q,R)\}$ – *слабейшее предусловие, устойчивое под действием R*; $\lceil p \rceil_R = \cap\{q \mid p \Rightarrow q \cap Stab(q,R)\}$ – *сильнейшее постусловие, устойчивое под действием R*.

В логике RGSep показаны следующие свойства, которые остаются истинными и при нашем разделении общей памяти на регионы (часть из которых скрыта от некоторых потоков): $p \Leftrightarrow \lceil p \rceil_{null} \Leftrightarrow \lfloor p \rfloor_{null}$; $(p \Rightarrow q) \Rightarrow (\lceil p \rceil_R \Rightarrow \lceil p \rceil_R)$; $(p \Rightarrow q) \Rightarrow (\lfloor p \rfloor_R \Rightarrow \lfloor p \rfloor_R)$.

Доказана **лемма 3** о новых свойствах для логики RGSep (свойства истинны и на предложенной нами многорегиональной модели памяти):

$$\lfloor p \rfloor_R \vee \lfloor q \rfloor_R \Rightarrow \lfloor p \vee q \rfloor_R;\; \lfloor p \wedge q \rfloor_R \Leftrightarrow \lfloor p \rfloor_R \wedge \lfloor q \rfloor_R;$$
$$\lceil p \wedge q \rceil_R \Rightarrow \lceil p \rceil_R \wedge \lceil q \rceil_R;\; \lceil p \vee q \rceil_R \Leftrightarrow \lceil p \rceil_R \vee \lceil q \rceil_R.$$

Правила вывода

Выводимость модифицированной тройки Хоара обозначена как $R;G;I \vdash \{pre\}C\{post\}$. Это означает, что если предусловия удовлетворяют *pre*, изменения общих состояний выполняются в соответствии с *R*, выполнение кода потока удовлетворяет *G* при защите точным инвариантом *I*, и если подпрограмма завершает работу, то постусловия удовлетворяют *post*.

По сравнению с логикой RGSep введено два новых правила для скрытия части общих данных и разбивки памяти на изменяемую и неизменную часть:

$$\frac{R;G;I \vdash \{P * \underline{\underline{Y}}\}C\{Q * \underline{\underline{Y'}}\} \quad Stab(\underline{\underline{M}}, R \vee G) \quad I \triangleright \{R',G'\}}{R,G,I \vdash \{P * \underline{\underline{M}} * \underline{\underline{Y}}\}C\{Q * \underline{\underline{M}} * \underline{\underline{Y'}}\}} \text{ (Frame);}$$

$$\frac{R * R';G * G';I * I' \vdash \{p\}C\{q\} \quad I \triangleright \{R,G\}}{R,G,I \vdash \{p\}C\{q\}} \text{ (Hide).}$$

Запись при слабейших предусловиях и сильнейших постусловиях будет иметь вид:

$$\frac{R;G;I \vdash \{P * \lfloor \underline{\underline{Y}} \rfloor\}C\{Q * \lfloor \underline{\underline{Y'}} \rfloor\} \quad Stab(\underline{\underline{M}}, R \vee G) \quad I \triangleright \{R',G'\}}{R,G,I \vdash \{P * \lfloor \underline{\underline{M}} * \underline{\underline{Y}} \rfloor_R\}C\{Q * \lceil \underline{\underline{M}} * \underline{\underline{Y'}} \rceil_R\}} \text{ (Frame').}$$

Здесь приведены примеры еще нескольких правил при слабейших предусловиях и сильнейших постусловиях:

$$\frac{R;G;I \vdash \{\lfloor pre_1 \rfloor_R\}C\{post\} \quad R;G;I \vdash \{\lfloor pre_2 \rfloor_R\}C\{post\}}{R;G;I \vdash \{\lfloor pre_1 \vee pre_2 \rfloor_R\}C\{post\}} \text{ (Disj);}$$

$$\frac{R;G;I \vdash \{pre\}C\{\lceil post_1 \rceil_R\} \quad R;G;I \vdash \{pre\}C\{\lceil post_2 \rceil_R\}}{R;G;I \vdash \{pre\}C\{\lceil post_1 \wedge post_2 \rceil_R\}} \text{ (Conj).}$$

Правила для пустых операторов, последовательных и зацикливания имеют стандартный вид:

$$\frac{Stab(pre,R)}{R;G;I \vdash \{pre\}skip\{post\}} \text{ (Skip);} \quad \frac{R,G,I \vdash \{pre\}C\{post\}}{R,G,I \vdash \{pre\}C*\{post\}} \text{ (Loop);}$$

$$\frac{R;G;I \vdash \{p\}C_1\{r\} \quad R;G;I \vdash \{r\}C_2\{q\}}{R;G;I \vdash \{p\}C_1;C_2\{q\}} \text{ (Seq).}$$

К тем командам, которые не имеют доступа к общим данным, нужно использовать адаптированные правила из сепарационной логики:

$$\frac{\vdash_{SepL} \{P\}c\{Q\}}{R,G,I \vdash \{Q\}c\{Q\}} \text{ (Prim).}$$

В правиле параллельного исполнения явно указываются утверждения о локальных и общих частях, при этом общие части должны удовлетворять точному инварианту:

$$\frac{\begin{array}{c} R \vee G_2;G_1;I \vdash \{P_1 * \underline{\underline{T}}\}C_1\{Q_1 * \underline{\underline{T_1}}\} \qquad I \rhd \{R,G\} \\ R \vee G_1;G_2;I \vdash \{P_2 * \underline{\underline{T}}\}C_2\{Q_2 * \underline{\underline{T_2}}\} \qquad T \vee T_1 \vee T_2 \Rightarrow I \end{array}}{R;G_1 \vee G_2;I \vdash \{P_1 * P_2 * \underline{\underline{T}}\}\ C_1 \mid C_2\ \{P_1 * P_2 * (\underline{\underline{T_1}} \wedge \underline{\underline{T_2}})\}} \text{ (Par).}$$

Запись при слабейших предусловиях и сильнейших постусловиях будет иметь вид:

$$\frac{\begin{array}{c} R \vee G_2;G_1;I \vdash \{P_1 * \lfloor \underline{\underline{T}} \rfloor_{R \vee G2}\}C_1\{Q_1 * \lceil \underline{\underline{T_1}} \rceil_{R \vee G2}\} \qquad I \rhd \{R,G\} \\ R \vee G_1;G_2;I \vdash \{P_2 * \lfloor \underline{\underline{T}} \rfloor_{R \vee G1}\}C_2\{Q_2 * \lceil \underline{\underline{T_2}} \rceil_{R \vee G1}\} \qquad T \vee T_1 \vee T_2 \Rightarrow I \end{array}}{R;G_1 \vee G_2;I \vdash \{P_1 * P_2 * \lfloor \underline{\underline{T}} \rfloor_{R \vee G2 \vee G1}\}\ C_1 \parallel C_2\ \{P_1 * P_2 * (\lceil \underline{\underline{T_1}} \rceil_{R \vee G2} \wedge \lceil \underline{\underline{T_2}} \rceil_{R \vee G1})\}} \text{ (Par').}$$

В качестве примера здесь приведено правило для исполнения команд во взаимоисключающем режиме, которые имеют доступ к нескольким регионам:

$$\frac{\begin{array}{c} \vdash \{(p'' * p_1' * \ldots * p_n')\}atomic\{C\}\{(q'' * q_1' * \ldots * q_n')\} \\ \forall i \in \{1,\ldots,n\}: \begin{pmatrix} Stab(p_i,R(r_i)) \quad Stab(q_i,R(r_i)) \\ p_i' \to q_i' \Rightarrow p_i \to q_i \quad (p_i \to q') \subseteq G(r_i) \quad I_i \rhd \{R_i,G_i\} \end{pmatrix} \end{array}}{R,G,I \vdash \{(p'' * \underline{\underline{p_1^{r1}}} * \ldots * \underline{\underline{p_N^{r,n}}})\}atomic\{C\}\{(q'' * \underline{\underline{q_1^{r1}}} * \ldots * \underline{\underline{q_N^{r,n}}})\}}.$$

Для интерпретации выводимости как доказательства в смысле частичной корректности необходимо, чтобы система вывода обладала свойством непротиворечивости, что отражает доказанная **теорема**. *Каждая выводимая формула – корректна: если* $R;G;I \vdash \{p\}C\{p\}$, *то* $R;G;I \models \{p\}C\{p\}$.

Практическое применение

С помощью предложенного метода верифицированы на отсутствие гонок несколько типичных программ добавления/удаления элемента из очереди, стека. Причем, в части из этих программ механизмы синхронизации реализованы с помощью структур, свободных от блокировок (lock-free).

В статье предложено расширение дедуктивного метода верификации RGSep, способствующее повышению декомпозиционности метода верификации. Описаны обоснованно внесенные изменения в модель состояний этого метода так, что он стал обладать выразительной силой для описания программ, в которых некоторые потоки имеют общие ячейки памяти, потенциально скрытые от других потоков. Решение этой проблемы позволило верифицировать разные свойства программ единым расширенным методом RGSep там, где ранее приходилось использовать сразу два метода – RGSep и LRG. В работе записано новое правило сокрытия ресурсов; внесены необходимые поправки в другие правила RGSep логики; расширены свойства слабейших предусловий и сильнейших постусловий, устойчивых под внешним воздействием; доказано, что внесенные в логику RGSep изменения, оставляют обновленную логику непротиворечивой.

Дальнейшая работа планируется в направлении исследования автоматизации процесса анализа на базе инструментов типа SmallfootRG, Isabelle/HOL.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vafeiadis, V.** A marriage of rely/guarantee and separation logic [Текст]/V. Vafeiadis, M. Parkinson//Proc. 18th Int'l Conf. on Concurrency Theory (CONCUR'07): Lecture Notes in Computer Science.–2007.–Vol. 4703. –P. 256–271.

2. **Jones, C.** Specification and design of (parallel) programs [Текст]/C. Jones//Proc. of IFIP'83.–North-Holland, 1983.–P. 321−332.

3. **Feng, X.** Local rely-guarantee reasoning [Текст]/X. Feng//ACM Symp. on Principles of Prog. Lang.–2009.–P. 315–327.

4. **Feng, X.** On the relationship between concurrent separation logic and assume-guarantee reasoning [Текст]/X. Feng, F. Rodrigo, S. Zhong//Proc. 16th European Symp. on Prog. (ESOP'07): Lecture Notes in Computer Science.– 2007.–Vol. 4421.–P. 173–188.

5. **Reynolds, C.** Separation logic: A logic for shared mutable data structures [Текст]/C. Reynolds//Proc. 17th Annual IEEE Symp. on Logic in Computer Science (LICS'02).–IEEE Computer Society, 2002.–P. 55–74.

6. **Gotsman, A.** Proving that non-blocking algorithms don't block [Текст]/A. Gotsman, B. Cook, M. Parkinson, V. Vafeiadis//Proc. 36th ACM. Symp. on Principles of Prog. Lang. (POPL'09).–ACM Press, 2009.

7. **Кларк, Э.М.** Верификация моделей программ: Model Checking [Текст]/Э.М. Кларк, О. Грамберг, Д. Пелед; Под ред. Р. Смелянского.–М.: МЦНМО, 2002. –416 с.

8. **Алешина, Н.А.** Логика и компьютер. Моделирование рассуждений и проверка правильности программ [Текст]/Н.А. Алешина, А.М. Анисов, П.И. Быстров.–М.: Наука, 1990.–240 с.

9. **Feng, X.** Local rely-guarantee reasoning [Текст]/X. Feng//ACM Symp. on Principles of Prog. Lang.–ACM, 2009.–P. 315–327.

10. **Dodds, M.** Deny-guarantee reasoning [Текст]/M. Dodds, X. Feng, M. Parkinson, V. Vafeiadis// Proc. ESOP.–2009.–P. 363–377.

11. **Cliff, B.Jones.** Wanted: a compositional approach to concurrency [Текст]/B.Jones, Cliff//In Prog. Methodology. –Springer-Verlag, 2003.−P 5–15.

12. **Vafeiadis, V.** Modular fine-grained concurrency verification: PhD thesis [Текст]/V. Vafeiadis.–Univ. of Cambridge. Computer Lab., 2008.

УДК 658.512:004.42,658.512:519.87

К.Г. Жуков, Д.Н. Бутусов

КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Широкий класс динамических систем описывается дифференциальными уравнениями второго порядка. Поэтому представляется целесообразным обеспечить на основе методики коррекции погрешности разомкнутых интеграторов [1] уменьшение величины погрешности интеграторов, охваченных отрицательной обратной связью.

Уравнение второго порядка в общем виде может быть записано следующим образом:

$$y'' + 2\varsigma\omega y' + \omega^2 y = \omega^2 x(t)\,. \qquad (1)$$

С нулевыми начальными условиями выражение (1) соответствует следующей передаточной функции:

$$W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{\omega^2}{S^2 + 2\varsigma\omega S + \omega^2}\,. \qquad (2)$$

В случае, когда $x(t) = 0$, уравнение (1) описывает свободные невынужденные колебания, а в случае, когда $x(t) = 0$ и $\varsigma = 0$ – свободные незатухающие колебания.

Приведем уравнение (1) к виду:

$$y'' = -2\varsigma\omega y' - \omega^2 y + \omega^2 x(t)\,, \qquad (3)$$

$$\frac{y''}{\omega} = -2\varsigma y' - \omega y + \omega x(t)\,. \qquad (4)$$

Как правило, численные методы интегрирования требуют задания уравнений в нормальной форме Коши. Перейдем от уравнения (4) к системе уравнений:

$$\begin{cases} y_1' = -2\omega\varsigma y_1 - \omega y_2 + \omega x(t); \\ y_2' = \omega y_1. \end{cases} \qquad (5)$$

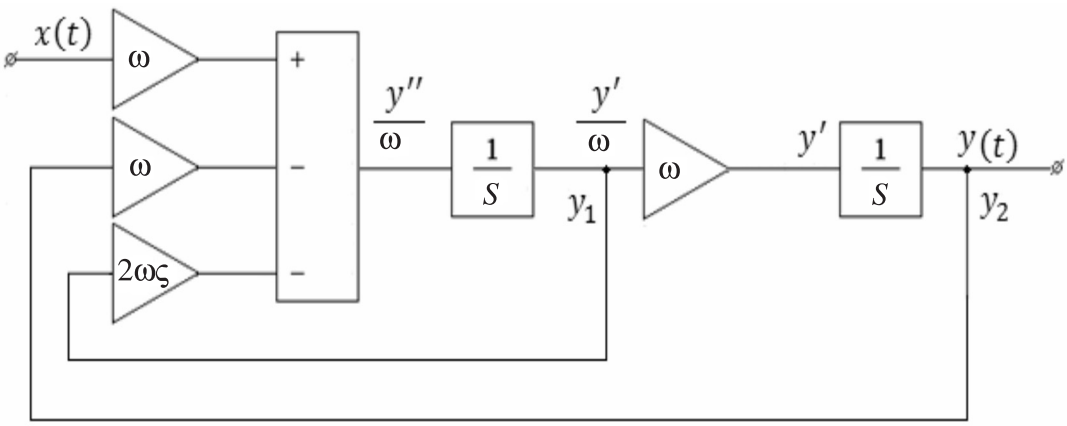


Рис. 1. Структурная схема решения системы (5)

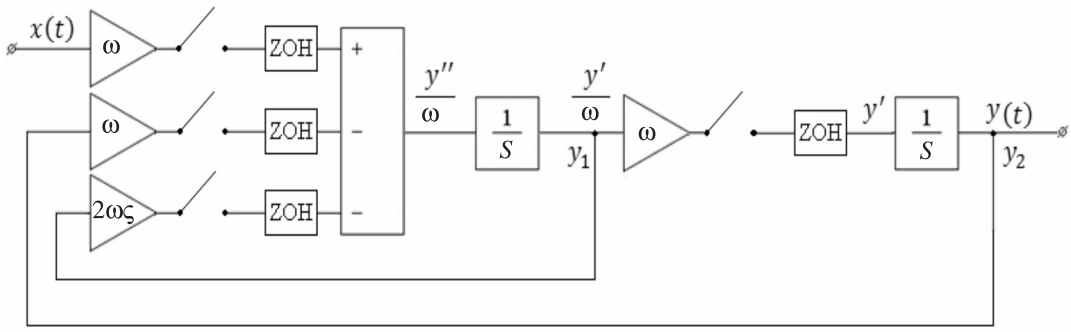


Рис. 2. Структурная схема импульсной модели решения уравнения (4)

Для реализации модели (рис. 1) методом последовательного интегрирования (МПИ) необходимо на входах сумматора непрерывной модели установить ключевые элементы и фиксаторы нулевого уровня, тем самым осуществив переход к импульсной модели (рис. 2).

В работе [2] описана коррекция МПИ путем организации второго вычислительного процесса с определенным порядком вычислений. Второй процессор коммутируется в обратном порядке. Установим окончательный порядок коммутации ключей для схемы решения уравнения (1) методом ПИ (рис. 3).

В соответствии с методикой, изложенной в работе [1], при реализации МПИ должна иметь место симметрия времен запаздывания ключевых элементов. При этом сумма времен запаздывания должна быть равна единице. Разделив промежуток интегрирования T_0 на восемь частей, получим временную диаграмму срабатывания импульсных элементов для каждого из процессоров (рис. 4).

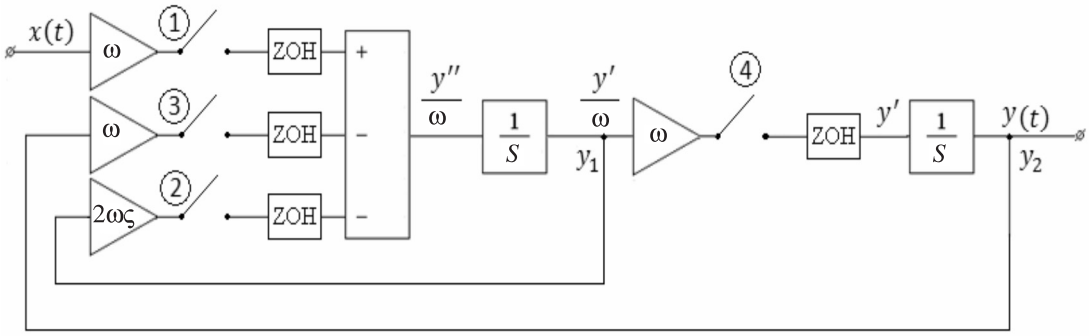


Рис. 3. Порядок коммутации импульсных элементов

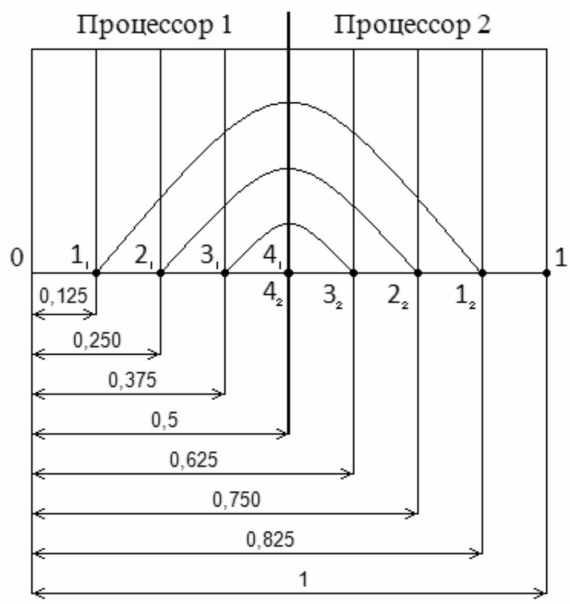


Рис. 4. Временная диаграмма срабатывания импульсных элементов

Частные случаи уравнения (1)

Случай свободных незатухающих колебаний. Уравнение гармонического осциллятора. Когда $x(t) = 0$ и $\varsigma = 0$, уравнение (1) принимает вид:

$$y'' + \omega^2 y = 0. \qquad (6)$$

Перейдем к нормальной форме Коши:

$$\begin{cases} y_1' = -\omega y_2 \\ y_2' = \omega y_1 \end{cases} \qquad (7)$$

при $y_1(0) = 1$ и $y_2(0) = 0$.

Найдем корни характеристического полинома для (6):

$$r^2 + \omega^2 = 0, \quad r_{1,2} = 0 \pm \omega i. \qquad (8)$$

Аналитическое решение уравнения (6) при заданных начальных условиях

$$y(t) = \sin(\omega t). \qquad (9)$$

Построим Simulink-модель согласно рис. 3. Для обеспечения максимальной точности применяемых «непрерывных» интеграторов выберем самый точный из имеющихся в инструментальной системе численных методов – метод ODE 8 (Dormand-Prince). Шаг интегрирования зададим равным 0,001 с при времени решения равном 5 с. Для удобства анализа результатов моделирования возьмем $\omega = 2\pi$.

На рис. 5 показаны графики погрешностей вычисления переменной y_2 в каждом из процессоров. На рис. 6 изображен график погрешности усредненного значения в сравнении с погрешностью метода Рунге-Кутта второго порядка. В табл. 1 приведены результаты компьютерного моделирования.

Скорректируем решение системы (7) согласно методике, изложенной в работе [1]. Для этого вычислим коэффициент коррекции по формуле:

$$K_{\text{кор}} = \frac{2\sin(\frac{\omega T_0}{2})}{\omega T_0 \cos(\omega T_0 (0{,}5 - \Delta))}. \qquad (10)$$

Таблица 1

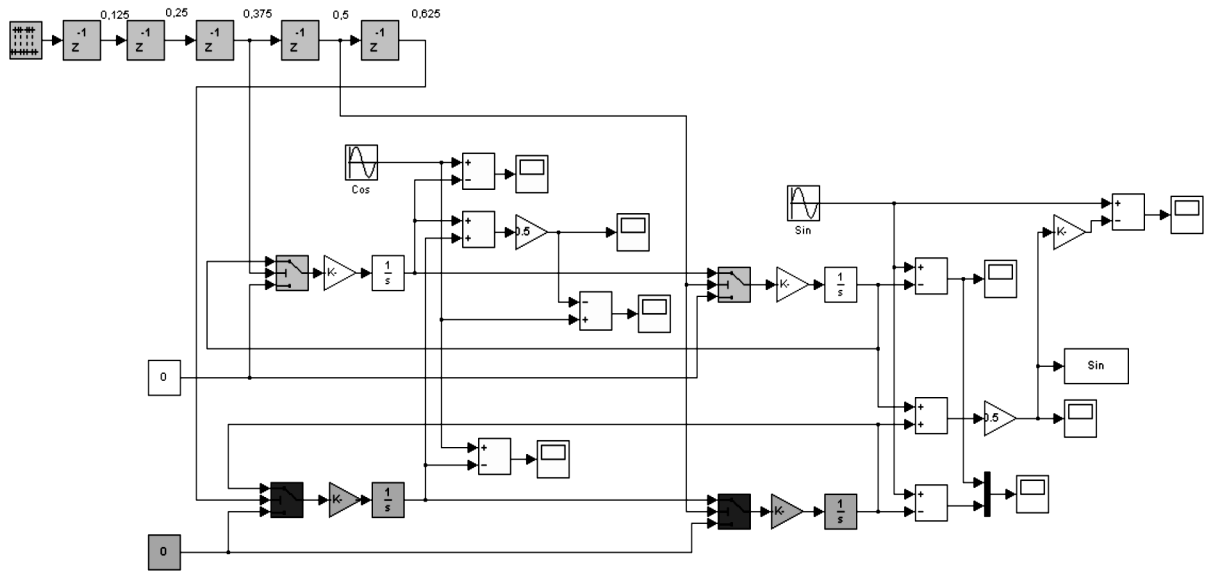
Погрешности решения (7) методом ПИ без коррекции

Имя переменной	Максимальная погрешность решения в первом процессоре	Максимальная погрешность решения во втором процессоре	Максимальная погрешность усредненного значения
y_1	0,003139024288966	0,003190701642487	$4{,}91208786803*10^{-5}$
y_2	$5{,}167761231231*10^{-5}$	$5{,}167761231231*10^{-5}$	$5{,}167761231231*10^{-5}$

Таблица 2

Погрешности решения (7) методом ПИ с одной коррекцией

Имя переменной	Максимальная погрешность решения первого процессора	Максимальная погрешность решения второго процессора	Максимальная погрешность усредненного значения
y_1	0,003141602989062	0,0031416029891	$1{,}11022302462*10^{-14}$
y_2	$4{,}934822503077641*10^{-6}$	$4{,}9348225030776*10^{-6}$	$4{,}934822503078*10^{-6}$



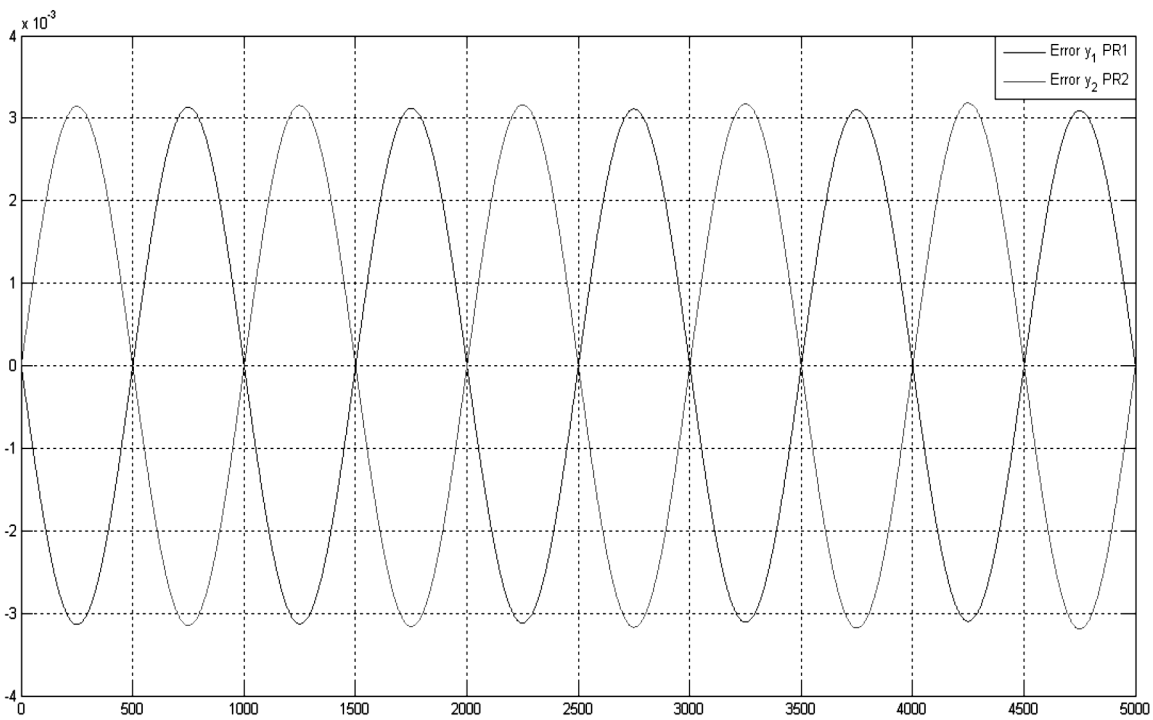


Рис. 5. Блок-диаграмма импульсной модели уравнения (7) и результаты ее исполнения

Подставим значение $\Delta = 0{,}5$ и, вычислив значение коэффициента, проведем коррекцию решения (рис. 5) путем изменения коэффициентов компьютерной модели. Результаты компьютерного моделирования системы (7) с коррекцией представлены в табл. 2.

Очевидно, что усреднение значений решения не дает эффекта для y_2, поскольку погрешности решения для обоих процессоров имеют одинаковый знак. Однако из рис. 7 видно изменение поведения погрешности по сравнению с рис. 6. Теперь погрешность имеет вид незатухающих колебаний, что позволяет провести еще одну коррекцию, найдя максимальное значение y_2 и вычислив коэффициент по формуле:

$$K_{\sin} = \frac{1}{y_{2\max}}. \qquad (11)$$

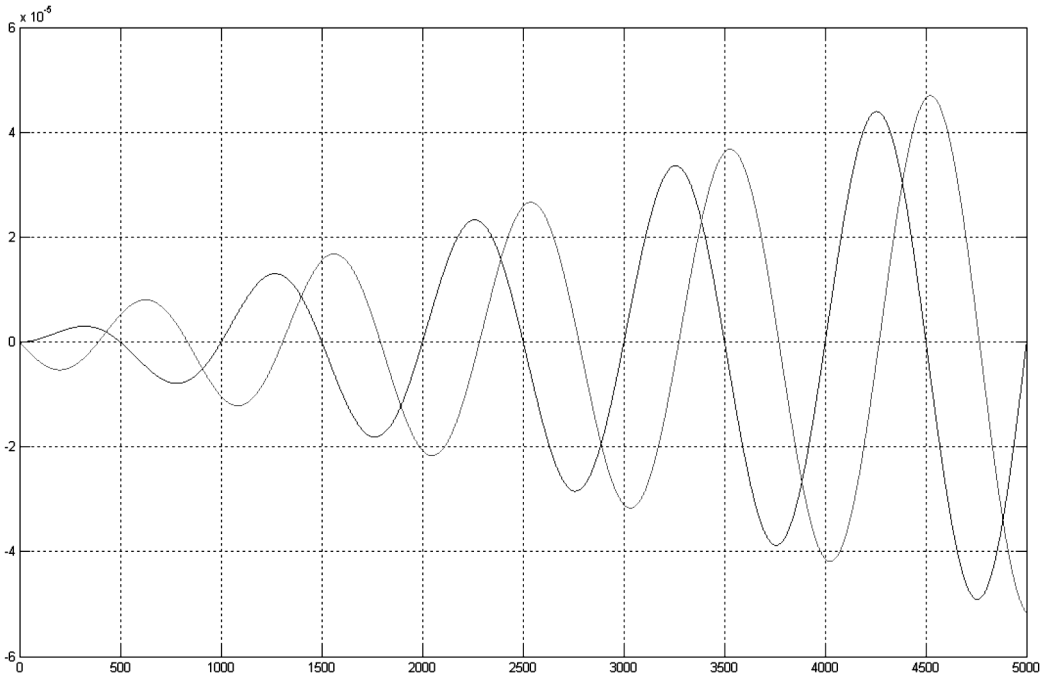


Рис. 6. Графики погрешности вычисления усредненных значений y_1 и y_2 методом ПИ без коррекции

Таблица 3

Погрешности решения (7) методом ПИ с двумя коррекциями

Имя переменной	Максимальная погрешность решения в первом процессоре	Максимальная погрешность решения во втором процессоре	Максимальная погрешность усредненного значения
y_1	0,0031416029891	0,003141602989056	$1{,}110223024625*10^{-14}$
y_2	$4{,}9348225031*10^{-6}$	$4{,}934822503078*10^{-6}$	$9{,}436895709314*10^{-15}$

Таблица 4

Погрешности решения системы (7) методом ПИ с коррекцией

Метод последовательного интегрирования			
Имя переменной	Максимальная погрешность решения в первом процессоре	Максимальная погрешность решения во втором процессоре	Максимальная погрешность усредненного значения
y_1	$4{,}93683237146492*10^{-4}$	$4{,}9368323714627*10^{-4}$	$3{,}7192471324943*10^{-15}$
y_2	0,031426266043352	0,031426266043355	$5{,}4400928206633*10^{-15}$
Метод Рунге-Кутта второго порядка			
y_1	0,020639061806329		
y_2	0,019654989833941		
Метод Рунге-Кутта четвертого порядка			
y_1	$2{,}843382012408802*10^{-5}$		
y_2	$2{,}991302502796882*10^{-5}$		

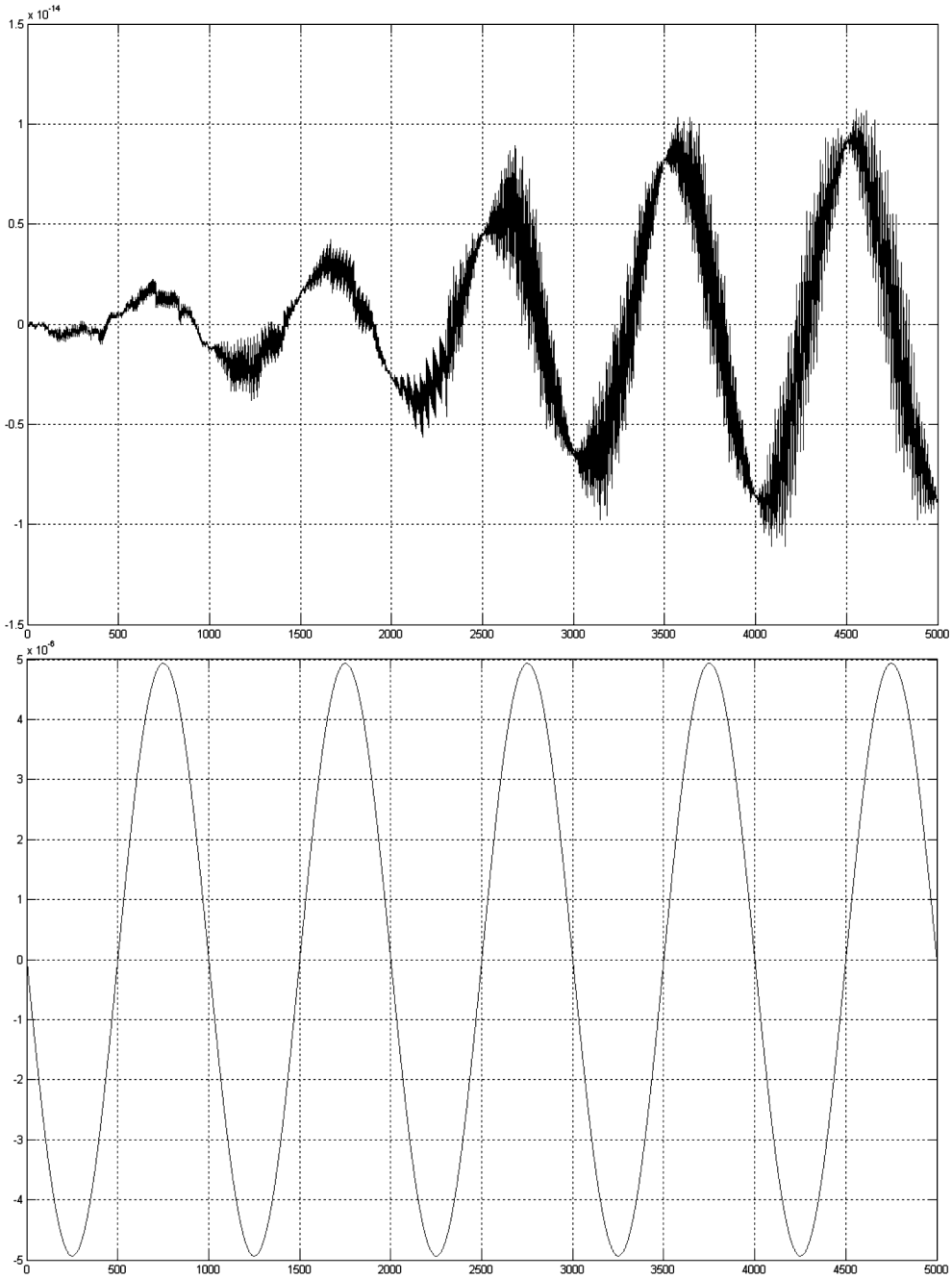


Рис. 7. Графики погрешности вычисления усредненных значений переменных y_1 и y_2

Умножив выходную величину y_2 на $K_{\sin}$, получим результаты, показанные на рис. 8.

Из рис. 8 и табл. 3 видно, что погрешность компьютерной реализации определяется точностью представления числовых данных типа double и практически равна нулю.

Переход к цифровой модели. Переход к цифровой модели требует замены непрерывных интеграторов на блоки умножения и суммирования с накоплением результата [3]. Блок-диаграмма модели решения системы (7) с цифровыми интеграторами приведена на рис. 9.

Рассчитаем корректирующие коэффициенты для шага 0,01 и изменим параметры блоков. В табл. 4 приведены значения погрешностей решения системы (7) методом ПИ и методами Рунге-Кутта второго и четвертого порядков на шаге 0,01 с.

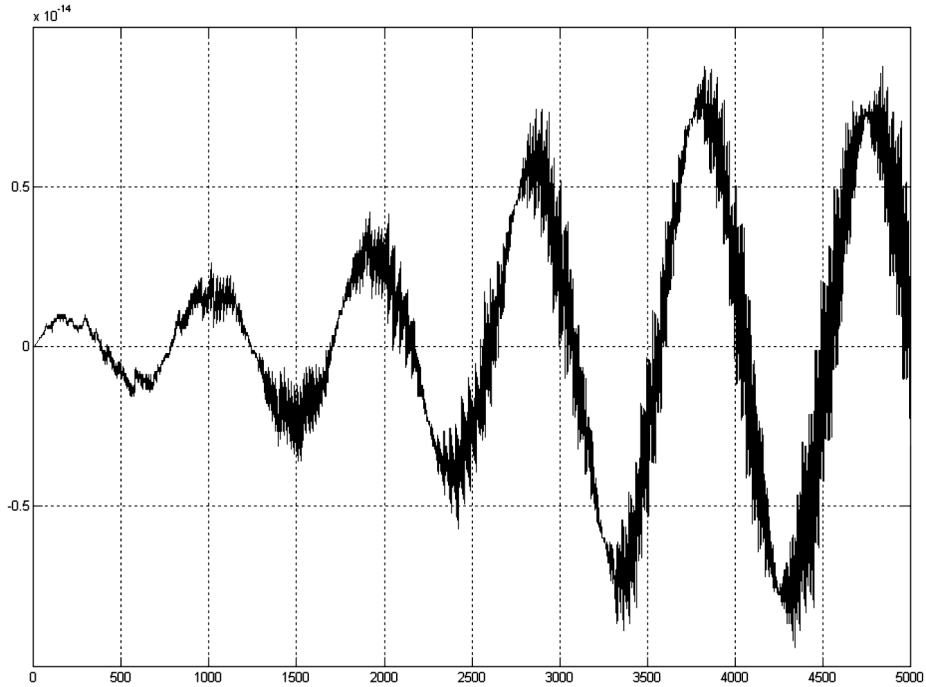


Рис. 8. Погрешность вычисления усредненного значения переменной y_2 после второй коррекции

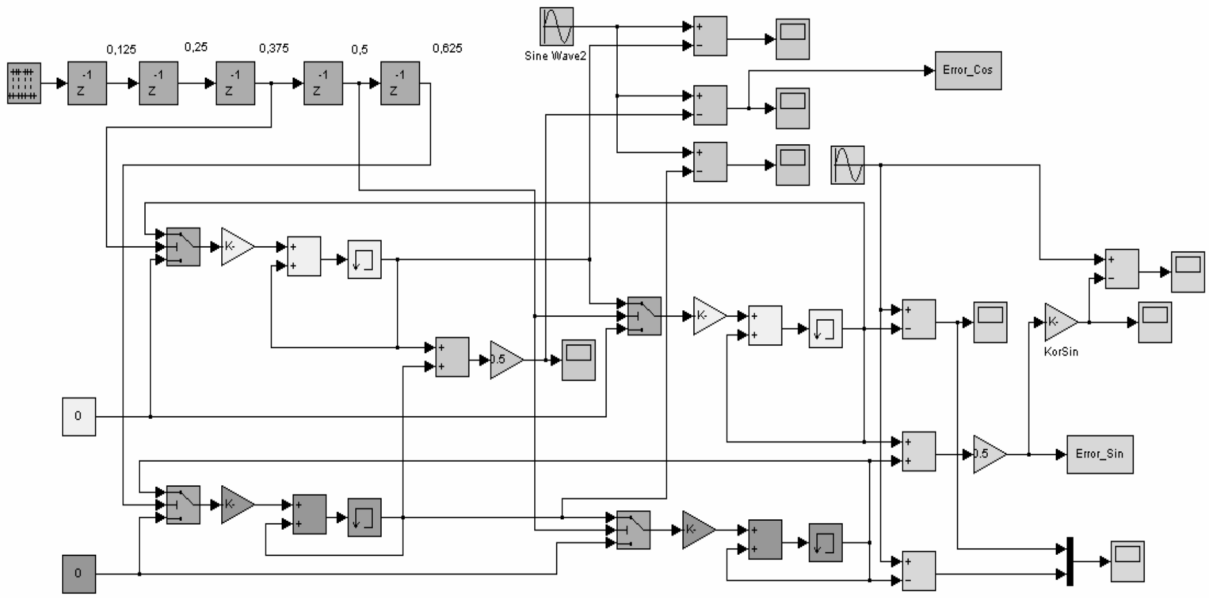


Рис. 9. Блок-диаграмма цифровой модели

Из табл. 4 видно, что при одинаковом шаге интегрирования метод ПИ точнее методов Рунге-Кутта второго и четвертого порядков. Стоит отметить, что погрешность методов Рунге-Кутта быстро растет с увеличением числа периодов.

Исследование системы, заданной передаточной функцией. Зависимые гармонические колебания

При $\varsigma = 0$, уравнение (1) принимает вид:

$$y'' + \omega^2 y = \omega^2 x(t). \qquad (12)$$

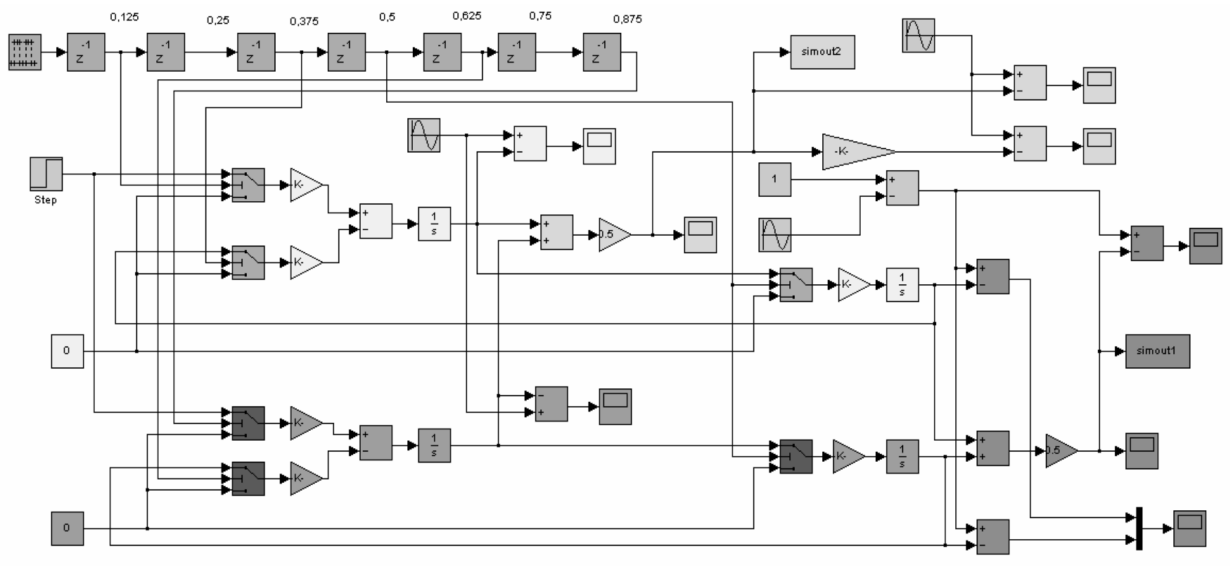


Рис. 10. Блок-диаграмма Simulink-модели решения системы (13)

Таблица 5

Погрешности решения (13) методом ПИ с двумя коррекциями

Имя переменной	Максимальная погрешность решения в первом процессоре	Максимальная погрешность решения во втором процессоре	Максимальная погрешность усредненного значения
y_1	$4{,}9348224997*10^{-6}$	$4{,}93482249819*10^{-6}$	$7{,}12624403931*10^{-15}$
y_2	0,003141602989058	0,003141602989057	$9{,}82547376793*10^{-15}$

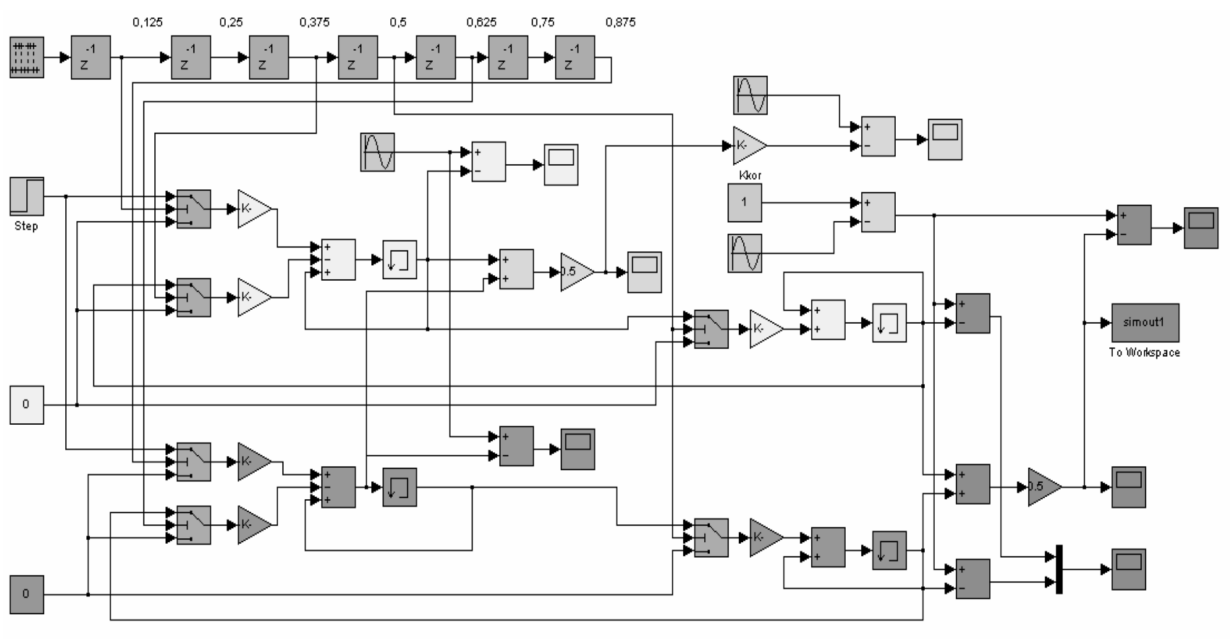
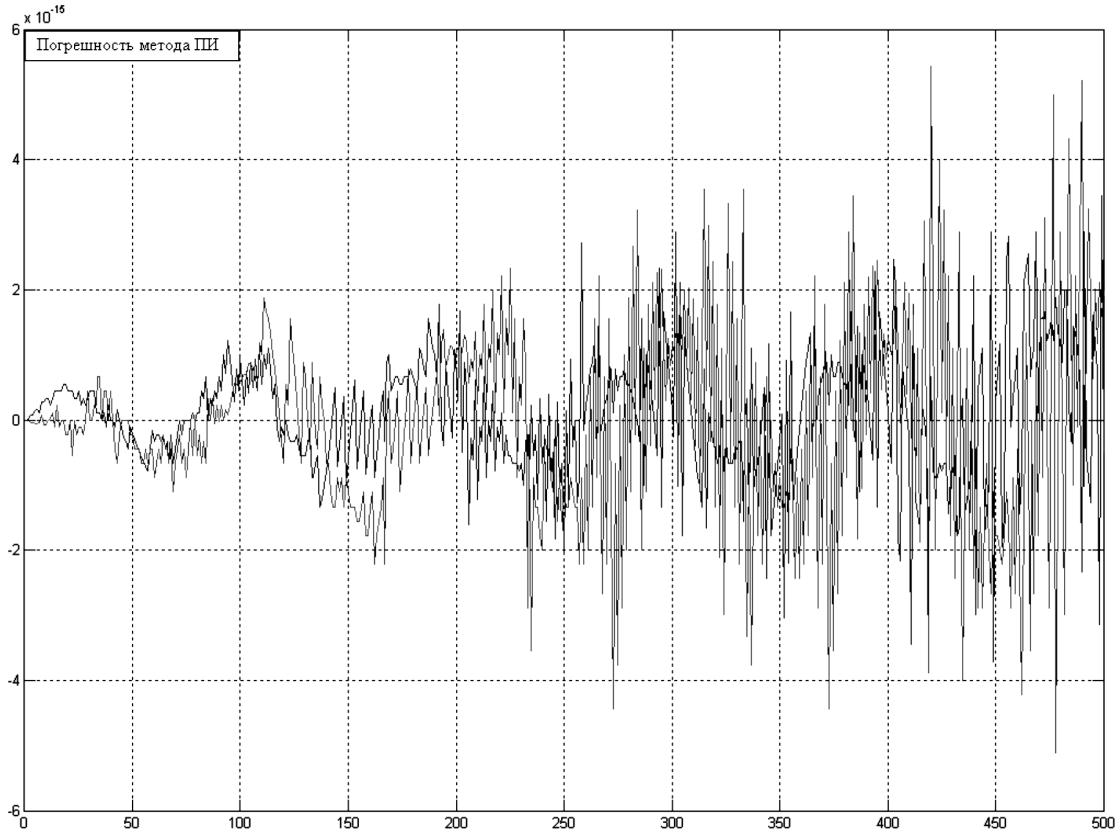


Рис. 11. Блок-диаграмма цифровой модели решения системы (13)



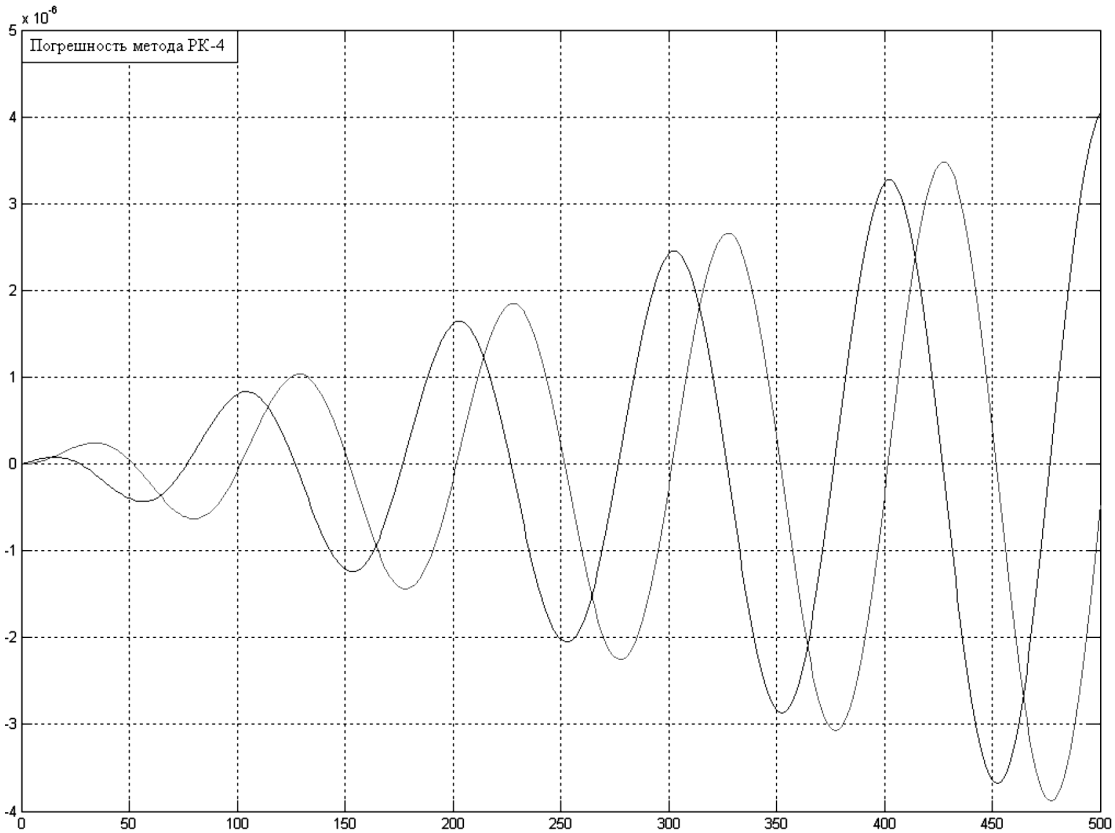


Рис. 12. Погрешность вычисления y_1 и y_2 методами ПИ и РК-4

В нормальной форме Коши:

$$\frac{y''}{\omega} + \omega y = \omega x(t)$$

$$\begin{cases} y_1' = -\omega y_2 + \omega x(t); \\ y_2' = \omega y_1 . \end{cases} \quad (13)$$

Аналитическое решение уравнения (12) выглядит следующим образом:

$$y(t) = 1 - \cos(\omega t). \quad (14)$$

Построим Simulink-модель импульсной системы по выражению (13) с теми же параметрами моделирования, что и у модели на рис. 5.

В табл. 5 приведены результаты моделирования рис. 10.

Реализуем модель с цифровыми (рис. 11) интеграторами и проведем сравнительную оценку точности метода ПИ и методов Рунге-Кутта второго порядка и Рунге-Кутта четвертого порядка при шаге интегрирования 0,01 с. Результаты моделирования сведены в табл. 6. Графики погрешностей приведены на рис. 12.

Из табл. 6 видно, что предлагаемый способ коррекции справедлив и для случая неоднородного уравнения. Погрешность решения уравнения методом ПИ при тех же параметрах моделирования существенно меньше, чем у классических численных методов, используемых в инструментальных системах моделирования [4].

Подтверждена возможность коррекции погрешности метода ПИ при решении задачи Коши на примере гармонического осциллятора до величины, определяемой длиной машинного слова.

Методы Рунге-Кутта второго и четвертого порядка имеют расходящийся характер погрешности, заметный при получении решения на нескольких периодах.

При тех же параметрах моделирования погрешность методов РК2 и РК4 составляет $10^{-2} – 10^{-6}$, погрешность метода ПИ практически отсутствует.

Предложенный способ коррекции может быть эффективно использован при построении высокоточных генераторов гармонических сигналов.

Таблица 6

Погрешности решения (7) различными численными методами

Метод последовательного интегрирования			
Имя переменной	Максимальная погрешность решения в первом процессоре	Максимальная погрешность решения во втором процессоре	Максимальная погрешность усредненного значения
y_1	0,031426266043355	0,0314262660433	$6{,}4392935428*10^{-15}$
y_2	$4{,}93683237*10^{-4}$	$4{,}936832372*10^{-4}$	$4{,}4408920985*10^{-15}$
Метод Рунге-Кутта второго порядка			
y_1	0,020664988026269		
y_2	0,019679575866569		
Метод Рунге-Кутта четвертого порядка			
y_1	$4{,}074510124584747*10^{-6}$		
y_2	$3{,}884044443291934*10^{-6}$		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жуков, К.Г.** Анализ и коррекция погрешности цифровых интеграторов встраиваемых систем управления [Текст]/К.Г. Жуков, Д.Н. Бутусов//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 6(91). –С. 17–25.

2. **Жуков, К.Г.** Методы и средства реализации последовательно-параллельных интегрирующих структур: Дис. … канд. техн. наук[Текст]/К.Г. Жуков.–Л., 1988.

3. **Ту, Ю.Т.** Цифровые и импульсные системы автоматического управления [Текст]/Ю.Т. Ту; Под. ред. В.В. Солодовникова.–М.: Машиностроение, 1964.

4. **Жуков, К.Г.** Анализ погрешности цифровых интеграторов в Simulink [Текст]/К.Г. Жуков//Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB: Тр. Всерос. науч. конф.–М.: ИПУ РАН, 2004.

УДК 545.81, 623.459.44

В.Д. Купцов, Р.А. Кянджециан, В.Я. Кателевский, В.П. Валюхов

ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ

Автоматические высокочувствительные газоанализаторы находят широкое применение в производстве, промышленности, научных исследованиях, системах мониторинга окружающей среды, медицине. К настоящему моменту созданы газоанализаторы на различных физических принципах. Особое место среди них занимают газоанализаторы, основанные на методе молекулярных ядер конденсации (МоЯК), поскольку именно они обеспечивают наивысшую чувствительность к детектируемым веществам.

Явление образования аэрозольных частиц из отдельных активных молекул в среде пересыщенного пара труднолетучих органических веществ с большим молекулярным весом впервые наблюдал Я.И. Коган в 1965 г. [1]. На основе этого явления был разработан метод определения ультрамалых концентраций примесей в газах [2], названный автором *методом молекулярных ядер конденсации* (МоЯК).

Сущность метода МоЯК заключается в ряде последовательных физико-химических воздействий на непрерывный поток газа-носителя, содержащего определяемые примеси.

1. Конвертирование молекул примеси в МоЯК. Свойствами МоЯК обладают, как правило, молекулы чрезвычайно труднолетучих веществ, либо координационно-ненасыщенные частицы. Молекулы большинства газовых примесей такими свойствами не обладают. Для превращения их в МоЯК применяют различные физико-химические воздействия: ультрафиолетовое излучение, химические реакции, высокую температуру, электрический разряд и др. [3, 4]. В качестве примера на рис. 1 представлен процесс конверсии в металлоорганических соединениях. Молекулы детектируемого вещества накапливаются в газохроматографической колонке 1, поступают в конвертер 2. В результате нагрева или облучения ультрафиолетовым светом образуются радикалы, содержащие атом металла. Далее радикалы окисляются кислородом воздуха с целью образования оксида металла. Молекулы оксидов металла, как правило, хорошо выполняют роль МоЯК.

2. Активация молекулярных ядер конденсации. Данный этап происходит в активаторе 3 и позволяет увеличить чувствительность метода МоЯК за счет воздействия на поток газа – носителя, паров веществ – активаторов, например, щавелевой кислоты. Несколько молекул таких веществ равновесно присоединяются к ядрам конденсации, увеличивая, тем самым, на несколько порядков вероятность дальнейшего превращения молекулярных ядер конденсации в аэрозольные частицы.

3. Проявление МоЯК – это воздействие на ядра конденсации пересыщенных паров так называемого *вещества проявителя* (весьма труднолетучего органического вещества, способного специфически взаимодействовать с ядрами конденсации). «Проявляющую» способность обнаруживают пары аминокислот, карбоновых кислот, аминов и сложных эфиров. Результат данного этапа – образование необратимо растущих зародышей аэрозольных частиц с радиусом около 0,1 мкм (первичного аэрозоля). Воздействие осуществляется в так называемых *конденсационных устройствах* (КУСТ) 4, состоящих из термостатированных испарительной (4 а) и смесительной (4 б) частей. В испарительной части, снабженной нагревателем, на пористом носителе размещается вещество – проявитель. Малый вспомогательный поток газа пропускается через испарительную часть нагревателя и насыщается в ней парами проявителя при температуре термостатирования. Этот малый поток попадает в смесительную часть, где смешивается с основным потоком газа,

несущим конвертированные молекулы примеси. Смесительная часть термостатируется при температуре, близкой к комнатной. При смешивании двух разнотемпературных потоков возникает пересыщение пара проявителя. Требуемая степень пересыщения задается разностью температур испарительной и смесительной частей. Проявление является ключевой стадией всего процесса детектирования МоЯК, в значительной степени определяющей чувствительность и избирательность детектора.

4. Укрупнение частиц первичного аэрозоля осуществляется в пересыщенном паре диизобутилфталата в приборах КУСТ 5, аналогичных используемым при проявлении. Оно необходимо для увеличения светорассеяния аэрозольных частиц перед их регистрацией нефелометрическим методом. В зависимости от способа конверсии примеси в молекулярные ядра конденсации и природы вещества – проявителя, детектор МоЯК позволяет определять индивидуальные соединения и группу соединений.

5. Измерение светорассеяния полученного аэрозоля проводится нефелометрическим методом. Для этого внутреннюю полость нефелометра 6 через отверстие освещают лампой или лазером и измеряют отраженный оптический сигнал под некоторым углом к падающему свету. Фототок фотоприемного устройства нефелометра 6 пропорционален счетной концентрации аэрозоля и, в конечном счете, – концентрации молекул примеси на входе в детектор.

Результатом воздействий на молекулу детектируемого вещества является то, что размер частиц полученного аэрозоля примерно в 1000 раз превышает размер исходной молекулы. Соответственно, отражающая способность частицы аэрозоля к падающему свету увеличивается в $\sim 10^5 \div 10^6$ раз и частица аэрозоля, в центре которой находится молекула детектируемого вещества, эффективно обнаруживается по обратному светорассеянию.

Ключевыми элементами детектора МоЯК (в которых реализуются третья и четвертая стадии процесса детектирования) являются конденсационные устройства (КУСТ), где в непрерывном потоке газа, содержащем МоЯК, образуется пересыщенный пар проявляющего (а затем – укрупняющего) вещества. В зависимости от способа конверсии примеси в молекулярные ядра конденсации и природы вещества – проявителя, детектор МоЯК позволяет селективно определять соединения и группы соединений веществ.

По принципу детектирования детектор МоЯК может быть отнесен к аэрозольным газоанализаторам. Принципиальное отличие детекторов МоЯК от других аэрозольных газоанализаторов заключается в том, что (благодаря специальному подбору детектирующих веществ и оригинальным конструкциям устройств для превращения газовых примесей в аэрозоль) в детекторе МоЯК аэрозольная частица образуется из одной молекулы примеси, тогда как в других газоанализаторах требуется коагуляция многих молекул примеси.

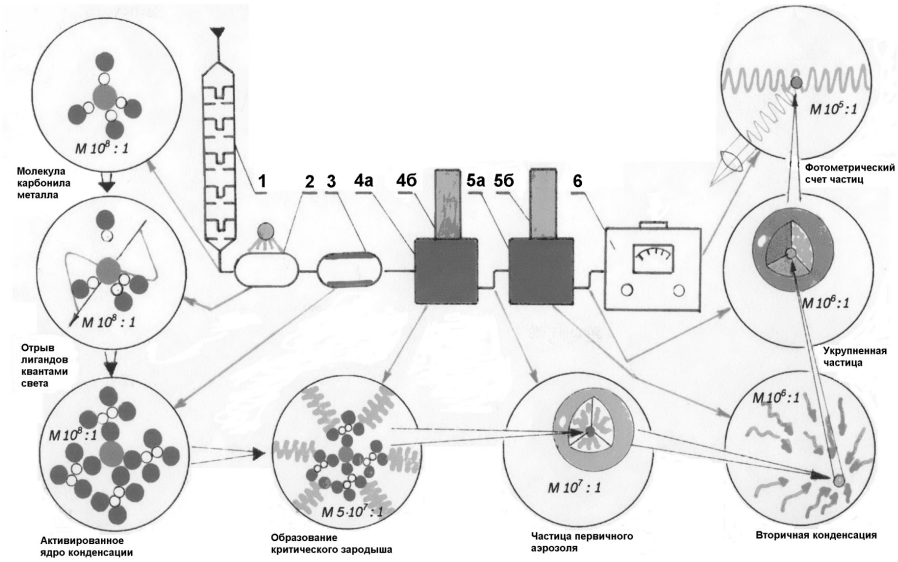


Рис.1. Схема проявления молекулярных ядер конденсации

Минимальные концентрации детектируемых веществ C_{min}, мг/л

Детектируемое вещество	Детектор МоЯК	Хроматографические детекторы		Другие аэрозольные детекторы
		Детектор	C_{min}	
Карбонилы металлов	до 10^{-13}	-	-	$5\cdot10^{-7}\div3\cdot10^{-5}$
Металлоорганические соединения переходных металлов	до 10^{-12}	Электронно-захватный	до 10^{-8}	–
Тетраэтилсвинец	10^{-10}	-	-	$4\cdot10^{-3}$
Галогениды элементов III-V групп Периодической системы	до 10^{-10}	Пламенно-фотометрический	$1\cdot10^{-4}$	$1\div5\cdot10^{-3}$
Кремний и оловоорганические соединения	до 10^{-10}	Пламенно-фотометрический	$5\cdot10^{-7}$	–
Ртуть и ее соединения	до 10^{-9}	–	–	$3\cdot10^{-6}$
Фторированные β-дикетонаты металлов	до 10^{-9}	Электронно-захватный	10^{-7}	–
Алкилнитриты, нитроалканы и нитроарены	до 10^{-9}	Электронно-захватный	10^{-6}	–
Фосфорорганические соединения	10^{-8}	Пламенно-фотометрический	$5\cdot10^{-7}$	–
Галогенорганические соединения	до 10^{-8}	Электронно-захватный	до 10^{-7}	$3\div5\cdot10^{-3}$
Хлор	10^{-8}	–	–	$2\cdot10^{-4}\div1\cdot10^{-3}$
Диоксид серы	10^{-8}	Пламенно-фотометрический	$3\cdot10^{-6}$	$3\cdot10^{-6}\div3\cdot10^{-3}$

Следствием этого является уникальная чувствительность детектора МоЯК и большой диапазон линейности измерения концентраций веществ.

По чувствительности детекторы на основе метода МоЯК превосходят газоанализаторы других принципов действия от 10^3 до 10^7 раз в зависимости от типа определяемых соединений. В таблице даны реально достигнутые на экспериментальной установке значения минимально измеримых методом МоЯК концентраций c_{min} различных классов и отдельных химических соединений в чистом газе. Для сравнения приведены данные лучших (для соответствующих химических соединений) хроматографических детекторов, а также аэрозольных газоанализаторов [5].

Таким образом, преимуществами газоанализаторов, основанных на методе МоЯК, являются: уникальная чувствительность к металлоорганическим и элементоорганическим соединениям, относительно низкая цена в случае серийного производства, возможность автономной работы, отсутствие дорогих расходных материалов (включая редко встречающиеся газы-носители).

Исследования по развитию метода МоЯК ведутся ОАО «ЭНПО «Неорганика» (г. Электросталь) совместно с СПбГПУ. В рамках выполнения проекта Международного научно-технического центра (МНТЦ) № 3676 разработаны газоанализаторы с детектором МоЯК на металло- и элементоорганическом соединении (МОС и ЭОС) [6]. Чувствительность детектора МоЯК к этим веществам является уникальной и превосходит чувствительность лучших известных детекторов на 4 ÷ 5 десятичных порядков, предел обнаружения на много порядков ниже их предельно допустимых концентраций (ПДК).

Газоанализаторы могут использоваться в трех приложениях:

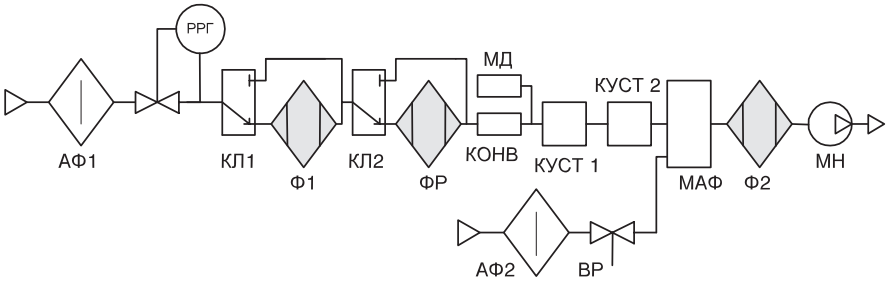


Рис. 2. Структурная пневматическая схема газоанализатора

1. Определение МОС в атмосфере карбонильных производств сверхчистых металлов, например, никеля (ОАО ГМК «Норильский никель», ГМК «Кольская»).

2. Измерение концентраций веществ-индикаторов в задачах контроля проницаемости высокоэффективных фильтров и герметичности высококлассных изделий, например, ТВЭЛ атомных станций. В этом применении требуется определять максимально доступные измерению перепады концентраций веществ-индикаторов (например, пентакарбонил железа позволяет определять перепад концентраций до 14 десятичных порядков).

3. Определение некоторых физико-химических характеристик (упругость пара, теплота испарения) веществ указанных классов с очень низкой летучестью, недоступной для измерения даже масс-спектрометрическим методом и методом Ленгмюра.

Основное внимание при выполнении проекта МНТЦ № 3676 было уделено разработке и изготовлению газоанализаторов на МОС: пентакарбонил железа (ПКЖ) $Fe(CO)_5$, тетракарбонил никеля (ТКН) $Ni(CO)_4$, декакарбонил марганца (ДКМ) $Mn_2(CO)_{10}$, цимантрен, ферроцен.

Структурная пневматическая схема газоанализатора представлена на рис. 2.

Поток воздуха последовательно проходит через аэрозольный микрофильтр АФ1, цифровой регулятор расхода газа РРГ, переключающий клапан КЛ1, который обеспечивает обход фильтра Ф1, переключающий клапан КЛ2, обеспечивающий обход фильтра, разбавляющего ФР, микродозатор МД, конвертор КОНВ, КУСТ 1, КУСТ 2 с нагревателями и холодильниками на элементах Пельтье, фотометр аэрозольный, малогабаритный ФАМ, фильтр выходной Ф2 и микронасос МН. В фотометре на выходе ФПУ интегрирующего типа формируется электрический сигнал, пропорциональный концентрации детектируемого вещества. Фотометр должен быть тщательно защищен от попадания внутрь фоновых засветок и отражений света от достаточно мощного источника света. Разработанная конструкция фотометра представлена на рис 3. Выходной сигнал фотометра – ток, изменяющийся пропорционально световому потоку в пределах от $1\cdot10^{-14}$ до $1\cdot10^{-7}$ А.

Алгоритм работы базового детектора универсального назначения состоит из операций: а – измерение фона; б – измерение опорного сигнала от дозатора; в – измерение концентрации карбонила в атмосфере. Для автоматической работы газоанализатора в соответствии с алгоритмом требуется управление вышеперечисленными блоками. Эти функции выполняет блок управления, регистрации и обработки информации (УРОИ). Он обеспечивает: управление исполнительными механизмами по заданному алгоритму (клапанами, насосами); возможность регулировки температур в широком диапазоне; термостатирование не менее 5 рабочих точек; управление осветителем (лазером); измерение концентрации аэрозольных частиц нефелометрическим методом фотоприемником интегрирующего типа; измерение и расчет данных, снятых с детектора; запись снятых графиков в файл компьютера; возможность работы детектора в ручном и автоматическом режимах; связь с компьютером по интерфейсу RS-232 и по локальной сети Ethernet.

Температуры должны поддерживаться в следующих диапазонах: конвертер (термореактор) – от 400 до 700 °С; КУСТ 1 – до 140 °С; КУСТ 2 – до 100 °С; холодильник – от +5 до 20 °С. Для поддержания температур с высокой точностью применен метод ПИД-коэффициентов, когда воздействие на нагревательный элемент рассчитывается пропорционально разности ошибки установки, ее производной и интегралу. Интегральная составляющая позволяет обеспечить выход на требуемую температуру независимо от теплообмена с окружающей средой. Дифферен-

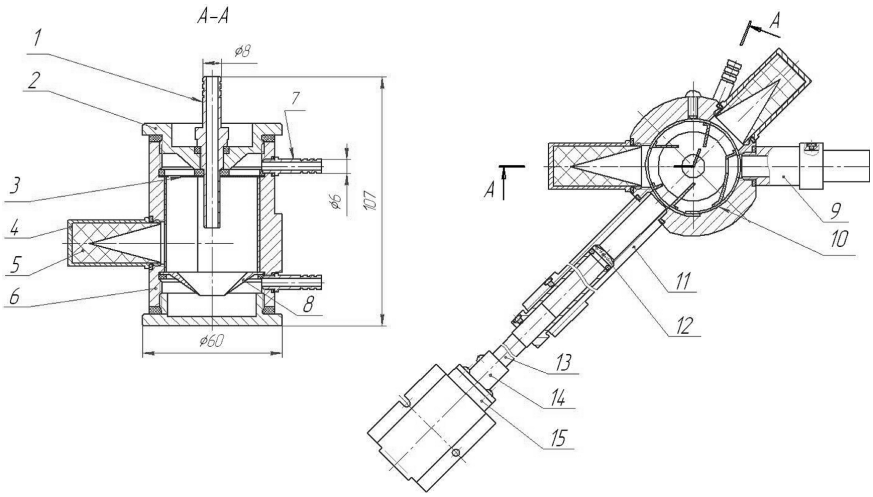


Рис. 3. Малогабаритный аэрозольный фотометр

1 – сопло; 2 – гайка; 3 – сетка; 4 – ловушка; 5 – светопоглотитель; 6 – корпус; 7 – штуцер; 8 – конус; 9 – тубус; 10 – шторка; 11 – тубус ФПУ; 12 – линза; 13 – световод; 14 – соединитель; 15 – фотоприемное устройство

циальная составляющая регулирует скорость отработки воздействия.

В качестве микроконтроллера, осуществляющего управление всеми модулями блока УРОИ, выбран AT91SAM9263, в состав которого входит процессор ARM926EJ-S^{TM} ARM^{R}. Кроме платы микроконтроллера в блок УРОИ входят платы управления узлами (модулями): клапанами 1 и 2, холодильником 1 и 2, микродозатором, излучателем, цифровым регулятором расхода и фотоприемным устройством интегрирующего типа. Эти платы имеют в своем составе микроконтроллер AT Tiny 85, обеспечивающий работу модуля. Связь с центральным процессором обеспечивается посредством SMBus с гальванической развязкой в каждом модуле. Программное обеспечение блока УРОИ работает под оболочкой основной программы LabView. На рис. 4 представлен вид экранного интерфейса для установки и контроля режимов, температур, параметров и вывода визуальной информации (фототока нефелометра) автоматического газоанализатора. Пик на графике свидетельствует о наличии в пробоотборе циантрена с концентрацией $5{,}2 \cdot 10^{-10}$ мг/л.

В настоящее время созданы макетные и опытные образцы полностью автоматических газоанализаторов различных классов химических соединений на основе эффекта проявления МоЯК с массой порядка 10 кг и энергопотреблением в десятки Вт. В приборах последнего поколения управление режимами работы и обработка информации осуществляются встроенным процес-

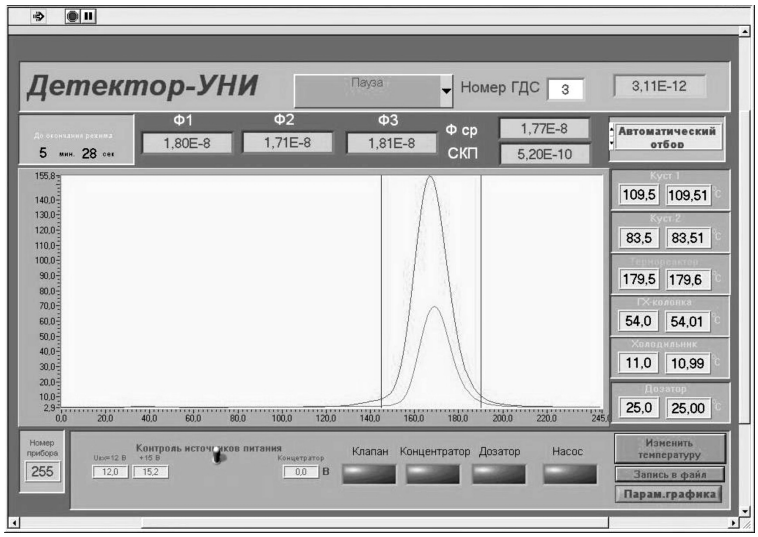


Рис. 4. Вид экранного интерфейса

Рис. 5. Основные узлы газоанализатора

сором с выдачей информации о параметрах работы узлов и результатах анализа на встроенный дисплей, а также речевой информации о текущей операции и о соответствии (несоответствии) концентрации определяемого соединения норме. В приборах осуществляется автоматический контроль чувствительности (раз за 60 мин) на базе встроенного дозатора микроконцентрации. По выходному сигналу и сигналам, характеризующим работу узлов, приборы имеют сопряжение с ЭВМ IBM PC. Газоанализатор выполнен в корпусе, представляющем собой чемодан с ручкой и на колесиках. Основные узлы газоанализатора представлены на рис. 5.

Проведенные испытания на разработанных газоанализаторах показали чувствительность к карбонилу железа (ГА ЛК) и металлоорганическим соединениям ряда цимантрена и ферроцена и декакарбонилу марганца (ГА МОС) не хуже 10^{-10} мг/л, что на несколько порядков превосходит чувствительность известных приборов. Быстродействие газоанализаторов составляет от нескольких секунд (ГА ЛК) до нескольких минут (ГА МОС).

Продемонстрировано, что достигнутые характеристики приборов позволяют решать уникальные задачи.

Так, ГА ЛК давал отчетливый отклик (через несколько секунд) на внесение в комнату объемом более 200 м^3 пенициллинового флакона с пентакарбонилом железа (отверстие в резиновой пробке диаметром 0,5 мм закрыто полиэтиленовой пленкой толщиной 0,5 мм) при расстоянии от флакона до прибора 7 м и направлении циркуляции воздуха в комнате от прибора к флакону. Таким образом, подобные приборы могут быть полезны при исследовании циркуляции в атмосфере.

Показано, что с помощью ГА МОС можно обнаружить наличие загрязнения металлоорганическими соединениями модельной подложки (кружочка фильтровальной бумаги) через много часов после нанесения микроколичеств МОС из раствора на подложку (10^{-5} мг цимантрена, 10^{-7} мг ферроцена или 10^{-8} мг декакарбонила марганца). Аналогично наличие МОС на подложке можно было обнаружить через несколько часов после ее кратковременного (несколько секунд) контакта с насыщенными парами МОС или более продолжительного контакта с разбавленными в десятки и сотни тысяч раз парами МОС.

Эти опыты демонстрируют перспективность использования МОС (в сочетании с их детектированием методом МоЯК) в качестве индикаторных веществ для метки материалов и предметов с целью предотвращения хищения и несанкционированного использования опасных (например, взрывчатых или отравляющих) веществ.

Работы по усовершенствованию аппаратуры с использованием детектора МоЯК продолжаются в направлении миниатюризации узлов, расширения круга определяемых веществ, увеличения чувствительности и избирательности их определения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коган, Я.И.** Молекулярные ядра конденсации [Текст]/Я.И. Коган//Доклады АН СССР.–1965.–Т. 161.–№ 2.–С. 388.

2. **Коган, Я.И.** Способ анализа примесей в газах [Текст]/Я.И. Коган//АС СССР.–1966.–Бюлл. изобретений № 21.–№ 188132.

3. **Коган, Я.И.** Эффект проявления молекулярных ядер конденсации и условия его наблюдения [Текст]/Я.И. Коган, Л.Е. Донецкая, Л.Н. Павлов [и др.]//Доклады АН СССР.–1968.–Т. 179.–№ 5.–С. 1145.

4. **Коган, Я.И.** Молекулярные ядра конденсации. Условия наблюдения и физико-химические особенности [Текст]/Я.И. Коган//Изв. АН СССР. –Сер. Хим. –1998.–№12.–С. 208.

5. **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 [и др.]//Российский химический журнал.–2002.–Т. XLVI. –Вып.6.–С. 20-31.

6. **Kjandzhetsian, R.A.** Development and creation of automatic highly sensitive gas analyzers based on molecular condensation nuclei effect to detect dangerous substances [Текст]/R.A. Kjandzhetsian, V.J. Katelevski, V.P. Valjuchov, S.V. Demin, V.D. Kuptsov [et al.]//Proc. of ISMTII-2009. –2009. –ISTC Special Session. –P. 51–54.

УДК 681.5

А.Б. Чернышев, В.Ф. Антонов, Д.Л. Шураков

СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССЕ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Многие технологические процессы и объекты рассматриваются как системы с распределенными параметрами. Задача реализации систем управления объектами с распределенными параметрами значительно усложняется по сравнению с сосредоточенными системами. Принципиально расширяется класс управляющих воздействий, прежде всего, за счет возможности включения в их число пространственно-временных управлений, описываемых функциями нескольких аргументов – времени и пространственных координат. Особую сложность представляют нелинейные системы. Класс нелинейных моделей очень широк, что чрезвычайно затрудняет их единообразное описание, возможность использования универсальных методов анализа и синтеза. Поэтому при разработке методик исследования автоматических систем управления по нелинейным моделям выбираются некоторые расчетные формы моделей, к которым, по возможности, пытаются привести исходные [1]. Достаточно широкий класс нелинейных систем управления составляют системы, структурная схема которых представляется последовательным соединением нелинейного блока и линейной части [2]. В этом случае можно использовать аппарат передаточных функций линейной части системы.

Рассмотрим систему утилизации тепла, выделяемого в процессе контактной сварки. Тепло, выделяемое при работе сварочного агрегата, рассеивается в окружающем пространстве. С увеличением времени точечной сварки доля теплоты, отводимой в окружающий металл и электроды, увеличивается, т. е. с увеличением времени сварки всегда уменьшается КПД процесса нагрева [3]. Это тепло может быть использовано для поддержания определенного температурного поля на поверхности свариваемых изделий, а также для хозяйственных нужд. В целях утилизации тепла предполагается закрыть зону сварки специальным кожухом (рис. 1). Снаружи кожух покрыт теплоизолирующим материалом. Математическая модель тепловых полей внутри кожуха может быть описана следующим уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \delta(x_i, y_i, z_i) \cdot q(t), \quad (1)$$

$$0 < x < X,\ 0 < y < Y,\ 0 < z < Z,$$

где $T(x, y, z, t)$ – температурное поле воздуха внутри кожуха; a – коэффициент температуропроводности воздуха; $\delta(x_i, y_i, z_i)$ – дельта функция, указывающая координаты i-го источника тепла; $q(t)$ – функция, отражающая мощность i-го источника тепла.

При описании граничных условий сделаем следующие допущения: боковая поверхность кожуха покрыта теплоизоляционным слоем; температура воздуха во входных отверстиях ($i = 1, \ldots, 6$) остается постоянной. Учитывая сделанные выше допущения, граничные и начальные условия, при которых следует решать уравнение (1), записываются в виде следующих соотношений:

$$\frac{\partial T(0,y,z,t)}{\partial x} = \frac{\partial T(X,y,z,t)}{\partial x} = \frac{\partial T(x,0,z,t)}{\partial y} =$$

$$= \frac{\partial T(x,Y,z,t)}{\partial y} = \frac{\partial T(x,y,0,t)}{\partial z} = 0.$$

$$T(x_j, y_j, Z, t) = u_j(x, y, t),\ j = \overline{1,6},$$

$$T(y, x, z, 0) = 0.$$

Здесь $u_j(x, y, t)$ – управляющие воздействия, реализованные в виде регулятора прямого действия; x_j, y_j – координаты регуляторов в плоскости $z = Z$, осуществляющих сток тепла. Следует отметить, что рассматриваемая математическая модель не

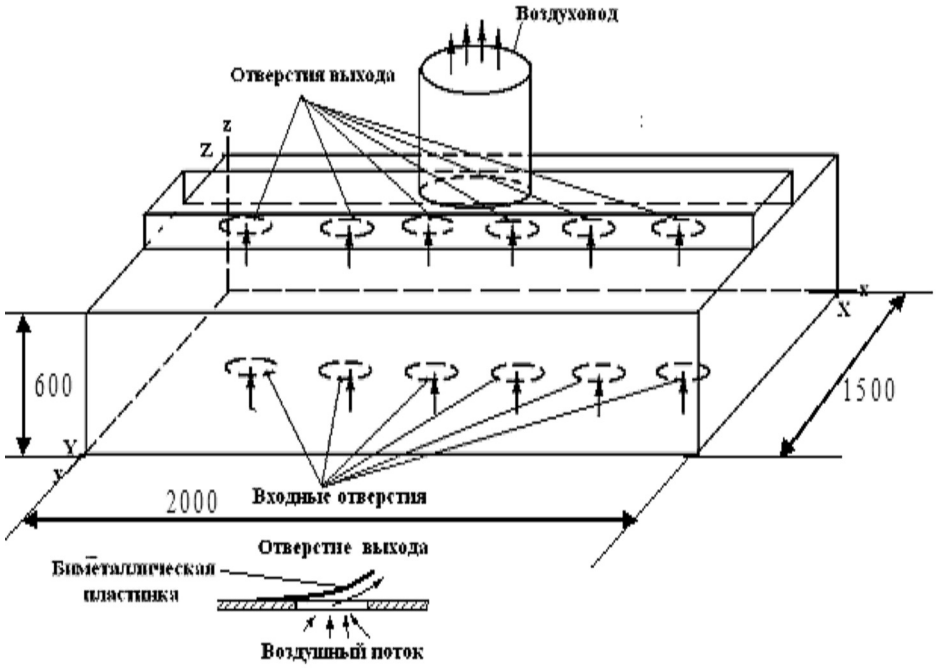


Рис. 1. Схема движения воздуха в кожухе

учитывает движение воздушных потоков внутри кожуха, а также передачу тепловой энергии посредством излучения. Цель регулирования – поддержание температуры внутри кожуха в заданном диапазоне. С увеличением выделяемой мощности температура внутри кожуха возрастает по линейному закону [4]. Регулирование температурного поля осуществляется посредством регулятора прямого действия, реализованного в виде биметаллической пластинки (БП). Эти регуляторы управляют «живым» сечением канала теплового потока и используются в системах подвода (отвода) тепловой энергии. В качестве входного воздействия служит температурное поле потока, воздействующего на регулятор прямого действия. В качестве функции выхода регулятора – перемещение свободного конца биметаллической пластинки $L(z, t)$, в результате которого формируется управляющее воздействие $u_j(x, y, t)$, определяющее количество отводимого тепла. Структурная схема рассматриваемой системы может быть представлена в виде последовательного соединения нелинейного регулятора и линейной части (рис. 2).

Передаточная функция линейной части системы для каждой пространственной моды может быть записана в виде [5]:

$$W_n(s) = \frac{\exp(\beta_n \cdot \bar{z}) + \exp(-\beta_n \cdot \bar{z})}{\exp(\beta_n \cdot Z) + \exp(-\beta_n \cdot Z)},$$

где $\beta_n = \left(\frac{s}{a} + \varphi_n^2 + \psi_m^2\right)^{\frac{1}{2}}$, $\varphi_n = \frac{\pi \cdot n}{X}$, $\psi_m = \frac{\pi \cdot m}{Y}$, $n, m = \overline{1, \infty}$, s – оператор преобразования Лапласа, $\bar{z}$ – заданное значение, определяющее плоскость, в которой осуществляется стабилизация температурного поля. Предполагается, что рас-

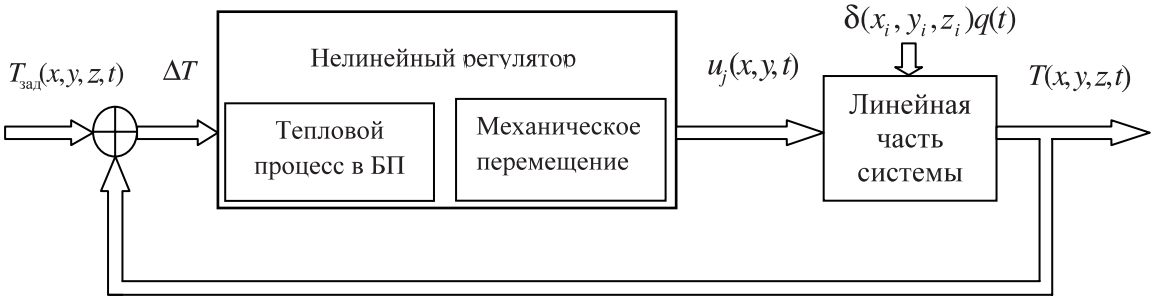


Рис. 2. Структурная схема системы

сматриваемая система удовлетворяет следующим условиям: структурно система представлена в виде последовательного соединения нелинейного элемента и линейной части; линейный блок системы может быть представлен бесконечной совокупностью независимых контуров; линейная часть системы является устойчивой. Для систем, удовлетворяющих указанным условиям, разработан модифицированный критерий абсолютной устойчивости [6].

«Если передаточная функция разомкнутой системы не имеет полюсов, лежащих в правой полуплоскости, тогда для абсолютной устойчивости замкнутой системы достаточно, чтобы модифицированный пространственный годограф не пересекал поверхность, проходящую через линию $\left\{\mathrm{Re}(W) = -\dfrac{1}{E_1\left[\dfrac{n_1-1}{n_1}+\dfrac{1}{n_1}G\right]};\ \mathrm{Im}(W)=0\right\}$ и прямую $\{\mathrm{Re}(W) = 0;\ \mathrm{Im}(W) = q;\ G\}$».

На основе этого критерия может быть предложен следующий метод расчета параметров регулятора рассматриваемой системы.

• Исследовать устойчивость линейной части системы. Частотные характеристики линейной части предполагаются известными

$$W(j\omega) = \mathrm{Re}[W(j\omega)] + j\mathrm{Im}[W(j\omega)].$$

Устойчивость линейной части можно проверить, например, при помощи известного критерия Найквиста [5].

• Построить модифицированный годограф линейной части для нескольких значений обобщенной координаты G_i, т. е. для нескольких пространственных мод m_i, (i = 1, 2, 3, ...)

$$G_1 = \left(\frac{\pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l_y}\right)^2,\ G_2 = \left(\frac{2\pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{l_y}\right)^2,$$

$$G_m = \left(\frac{m\pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{l_y}\right)^2.$$

• Определить предельные значения R_1, R_1, ..., R_m на оси $X = \mathrm{Re}(W_i)$ как точки пересечения модифицированного годографа с осью.

• Найти предельные значения угловых коэффициентов нелинейной характеристики для каждой из выбранных пространственных мод

$$K_m = -\frac{1}{R_m}.$$

• Найти угол, определяющий сектор, которому должна принадлежать нелинейная характеристика, обеспечивающий абсолютную устойчивость системы:

$$K_m = E\left[\frac{n_1-1}{n_1}+\frac{1}{n_1}G_m\right],$$

при $n_1 = 1$, получим $K_m = E \cdot G_m$, откуда

$$E_1 = \frac{K_1}{G_1},\ E_2 = \frac{K_2}{G_2},\ \ldots,\ E_m = \frac{K_m}{G_m};$$

$$k = \min[E_1, E_2, \ldots, E_m].$$

• Определить вид нелинейной характеристики исходя из постановки задачи.

• Определить параметры нелинейного звена, от которых зависит требуемое значение полученной нелинейной характеристики.

Для рассматриваемой системы утилизации тепла возьмем несколько значений обобщенной координаты $G_m = \varphi_m^2 + \psi_m^2$, m = 1, 2, 3, 10, при геометрических параметрах l_x = 2í, l_y = 1,5í.

$$G_1 = \left(\frac{\pi}{1{,}5}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 = 6{,}854,$$

$$G_2 = \left(\frac{2\cdot\pi}{1{,}5}\right)^2 + \left(\frac{2\cdot\pi}{2}\right)^2 = 27{,}416,$$

$$G_3 = \left(\frac{3\cdot\pi}{1{,}5}\right)^2 + \left(\frac{3\cdot\pi}{2}\right)^2 = 61{,}685,$$

$$G_{10} = \left(\frac{10\cdot\pi}{1{,}5}\right)^2 + \left(\frac{10\cdot\pi}{2}\right)^2 = 685{,}389.$$

Оценки минимальных значений точек пересечения годографа с действительной осью комплексной плоскости:

$$R_1 = -0{,}07;\ R_2 = -0{,}025;\ R_3 = -0{,}0075;$$
$$R_{10} = -0{,}0000003.$$

Из соотношения $K_m = -\dfrac{1}{R_m}$ найдем предельные значения угловых коэффициентов нелинейной характеристики для каждой из выбранных пространственных мод: K_1 = 14,3; K_2 = 40; K_3 = 133,3; K_{10} = 3333333,3.

Используя выражение углового коэффициента как коэффициента усиления пространственно усилительного звена $K_m = E\left[\dfrac{n_1-1}{n_1}+\dfrac{1}{n_1}G_m\right]$, найдем значение общего коэффициента усиления E для каждого из найденных значений K_m. Значение весового коэффициента примем n_1 = 1.

Тогда $K_n = E \cdot G_n$, откуда $E_m = \dfrac{K_m}{G_m}$. В результате, получим:

$$E_1 = \frac{K_1}{G_1} = \frac{14{,}3}{6{,}854} = 2{,}086\,;$$

$$E_2 = \frac{K_2}{G_2} = \frac{40}{27{,}416} = 1{,}459\,;$$

$$E_3 = \frac{K_3}{G_3} = \frac{133{,}3}{61{,}685} = 2{,}161\,;$$

$$E_{10} = \frac{K_{10}}{G_{10}} = \frac{3333333{,}3}{685{,}389} = 4863{,}4\,.$$

Чтобы поверхность, ограничивающая сектор нелинейной характеристики, не пересекала пространственный годограф, необходимо из всех значений найденных коэффициентов выбрать наименьший: $k = \min\{E_1, E_2, E_3, E_{10}\} = 1{,}46$. Для рассматриваемого примера статическая нелинейная характеристика будет иметь вид, показанный на рис. 3.

Используя полученное значение углового коэффициента нелинейной характеристики, можно определить параметры регулятора. Например, при заданном значении температуры $T_{зад} = 300$ °C и заданном значении зоны нечувствительности

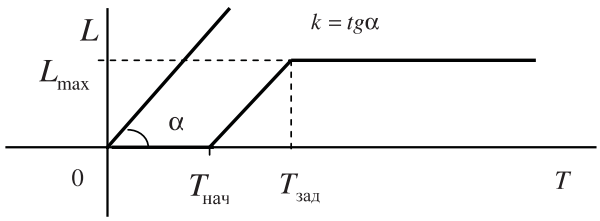


Рис. 3. Нелинейная характеристика

$T_{нач} = 250$ °C, можно определить значение максимального перемещения свободного конца биметаллической пластинки

$$\frac{L_{max}}{T_{зад} - T_{нач}} = k,$$

$$L_{max} = 1{,}46 \cdot (300 - 250) = 1{,}46 \cdot 50 = 73\text{íí}.$$

Построение прямых, соответствующих выбранному угловому коэффициенту нелинейной характеристики, для различных значений пространственных мод представлено на рис. 4.

Рассмотренная система утилизации тепла позволяет увеличить КПД сварочного процесса и использовать выделяемое тепло для хозяйствен-

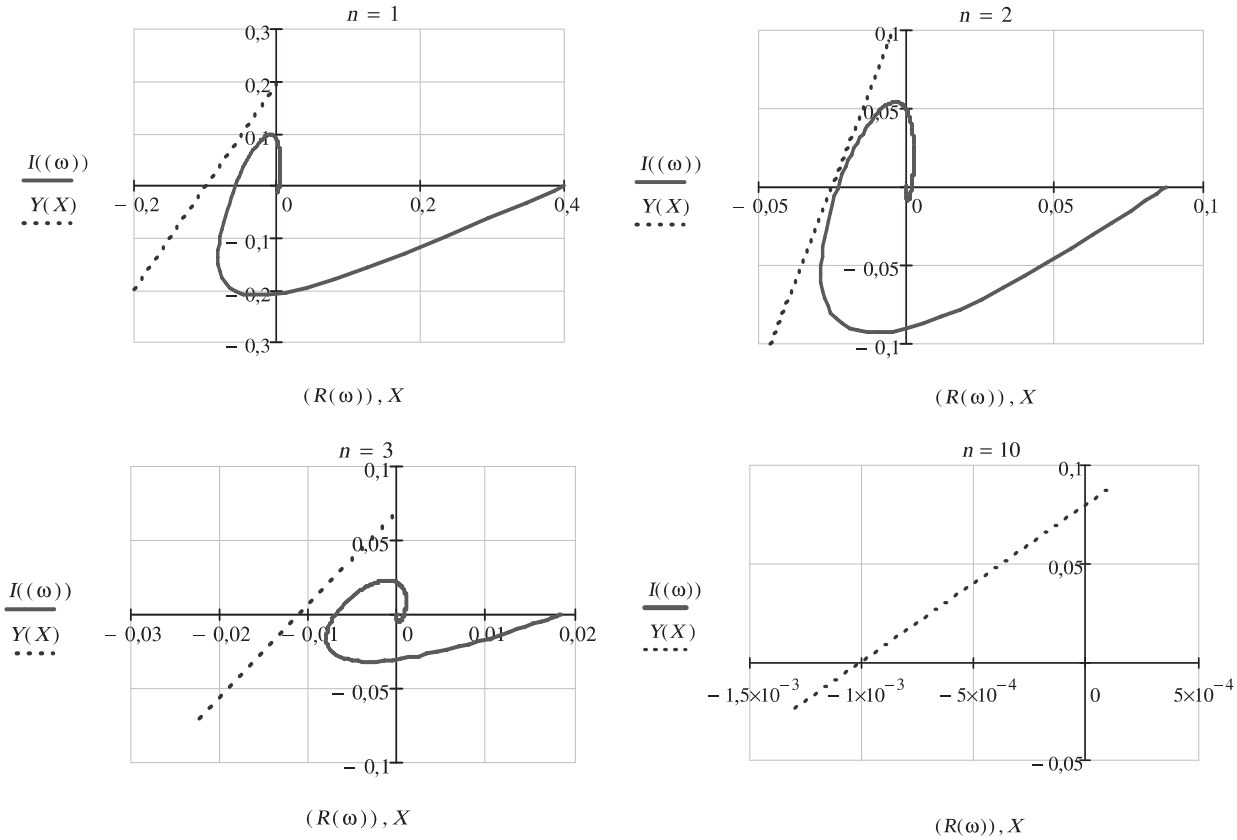


Рис. 4. Демонстрация устойчивости системы

ных нужд. Предложенная методика синтеза регулятора позволяет в зависимости от частотных характеристик передаточной функции линейной части системы определить сектор нелинейной характеристики, при котором обеспечивается устойчивость. Таким образом, в зависимости от требуемого значения температуры, зоны нечувствительности нелинейной характеристики, максимального перемещения свободного конца биметаллической пластинки и углового коэффициента нелинейной характеристики могут быть подобраны параметры регулятора прямого действия, при которых гарантировано устойчивое функционирование системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Душин, С.Е.** Теория автоматического управления [Текст]/С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев [и др.]; Под ред. В.Б. Яковлева.–М.: Высш. шк., 2003.
2. **Рапопорт, Э.Я.** Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами [Текст]/Э.Я. Рапопорт.–М.: Высш. шк., 2003.
3. **Колосов, В.И.** Новые возможности контактной точечной сварки [Текст]/В.И. Колосов, П.А. Гореликов, Р.А Мусин//Сварочное производство.–2001.–№ 10.–С. 25–28.
4. **Козлов, В.Н.** Негладкие операторы и распределенные системы. Модели теплопроводности [Текст]/В.Н. Козлов, К.А. Магомедов.–СПб.: Изд-во СПб ГТУ, 2003.
5. **Першин, И.М.** Анализ и синтез систем с распределенными параметрами [Текст]/И.М. Першин.–Пятигорск: Изд-во РИА-КМВ, 2007.
6. **Чернышев, А.Б.** Адаптация частотного критерия абсолютной устойчивости к системам с распределенными параметрами [Текст]/А.Б. Чернышев//Мехатроника, автоматизация, управление. –2009. –№ 7. –С 13–18.

УДК 05.13.06

Ю.А. Константинов, И.И. Крюков, М.М. Поскребышев, Н.А Харламова

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ В ХОДЕ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО ПАРОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Один из основных методов изготовления заготовок специальных волоконных световодов – метод химического парофазного осаждения (MCVD) [1]. При его реализации кварцевая труба (т. н. *опорная*) устанавливается на специальную установку и разогревается пламенем кислородно-водородной горелки; при этом внутрь трубы подается смесь кислорода с парами хлоридов кремния, германия и других галогенидов легирующих элементов. Образующиеся в результате реакции оксиды этих элементов осаждаются на внутренние стенки трубы и формируют слой легированного кварца. В результате операции коллапсирования («схлопывания») трубы формируется преформа – цилиндрический кварцевый стержень, центральная легированная часть которого образует после вытяжки сердцевину будущего волоконного световода.

Управление процессом MCVD включает в себя регулирование температуры трубы в зоне разогрева изменением расхода водорода в горелке. Этот расход изменяется в соответствии с показаниями оптического пирометра, наведенного на зону разогрева трубы.

Уровень легирования осадка меняется по заданной программе регулировкой подачи паров реагентов внутрь трубы.

Многолетний опыт реализации этого процесса в производстве выявил необходимость непрерывного контроля наружного диаметра трубы в ходе процесса осаждения и особенно при коллапсировании. Необходимо отметить, что значительная продолжительность процесса осаждения (несколько часов) приводит к испарению кварца с наружной поверхности трубы и к уменьшению ее диаметра. Коллапсирование трубы в заготовку выполняется,

как правило, за несколько проходов, в течение каждого из которых наружный диаметр трубы должен измениться на заданную величину. Необходимость обеспечения жестких допусков на отклонение заготовки от цилиндричности (не более 5 % от номинального диаметра) также требует непрерывного контроля ее геометрии. До сих пор контроль формы заготовки и оценка ее размеров производились визуально оператором с помощью измерительного микроскопа с рабочим расстоянием 173 мм. При сильном тепловом излучении от заготовки такой метод не обеспечивал требуемой точности и стабильности технологического процесса.

Измерение диаметра преформы контактным способом также исключается – любой измерительный инструмент может повредить нагретую вращающуюся заготовку.

К сожалению, далеко не все станки MCVD в базовой комплектации снабжены системой бесконтактного измерения диаметра заготовки, поэтому производители волоконных световодов вынуждены находить собственные технические решения [2, 3].

В связи со сказанным выше был разработан метод бесконтактного измерения геометрических характеристик цилиндрических преформ при помощи мегапиксельной камеры видеонаблюдения с интерфейсом USB2.0 VEC 545 (ООО «ЭВС», Санкт-Петербург) и собственным программным обеспечением. Для увеличения изображения, получаемого с видеокамеры, был использован объектив Computar TG10Z0513FCS-2 с четырехкратным защитным серым светофильтром. Видеокамера была смонтирована на кронштейне пирометра станка MCVD.

Программное обеспечение, поставляемое вместе с камерой, не предусматривает какой-либо обработки информации; для этого была написана специальная собственная утилита. Разработанный программный продукт имеет дружественный пользовательский интерфейс. Пользователю предоставляется доступ к настройкам видеоизображения непосредственно в программе, без запуска оболочки драйвера, а также выбор исследуемой области, что существенно упрощает и ускоряет расчеты. По желанию пользователя может быть изменена пространственная ориентация исследуемого образца, включена или выключена фильтрация по цветовым компонентам RGB, произведена инверсия изображения.

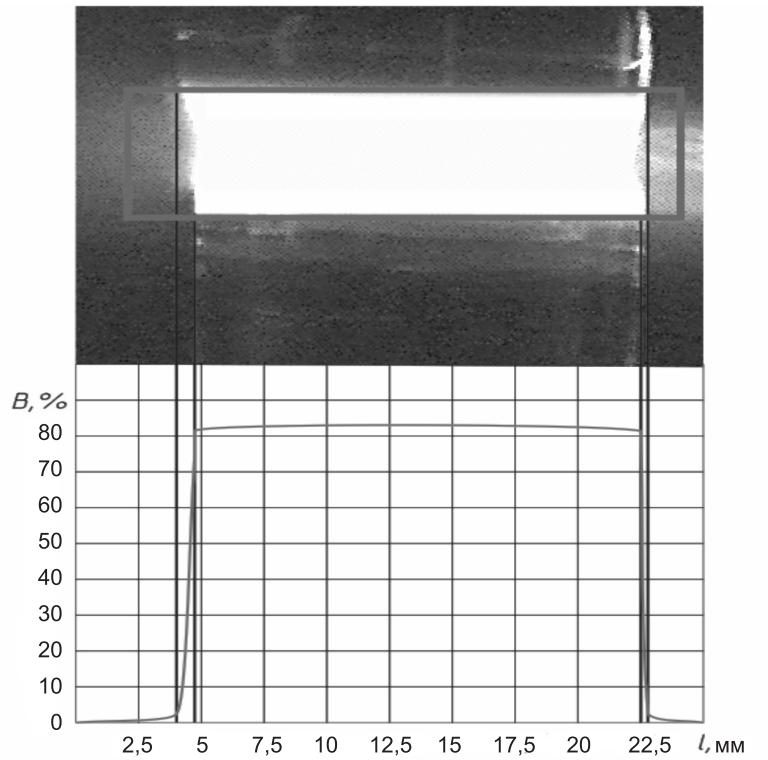


Рис. 1. Средняя яркость при определении диаметра
B – яркость, % от белого

Пользователь может вручную выделить в главном окне программы исследуемую область, данные из которой немедленно начинают обрабатываться. Программа в нижней части окна строит график яркости от координаты, накапливая данные по оси ординат, если задана вертикальная ориентация, или по оси абсцисс, если заготовка отображается горизонтально. Необходимо отметить, что камера должна быть точно ориентирована относительно оси заготовки.

На графике в нижней части окна программы (рис.1) отображается интенсивность компонент красного, зеленого и синего цветов. При обработке изображения пользователь может использовать каждый из них в отдельности или в любом сочетании.

Для вычисления диаметра были опробованы несколько алгоритмов: корреляционный (по величине первой производной) и пороговый. В итоге самым эффективным оказался пороговый. При его реализации пользователь задает пороговое значение яркости (выраженное в процентах от максимальной яркости) в области исследования.

В начале работы программа предлагает пользователю ввести начальный диаметр заготовки. Далее производится калибровочное измерение, после которого рассчитывается коэффициент пересчета пикселей в миллиметры. В ходе выполнения технологического процесса температура горелки меняется, что может привести к изменению формы графика яркости. При этом потребуется дополнительная калибровка, возможность которой также реализована в программе.

Рис. 2. Блок-схема программы

Кроме измерения диаметра, система может регистрировать стрелу прогиба заготовки при вращении, а в некоторых случаях – и ее овальность.

Работу программы иллюстрирует блок-схема, приведенная на рис. 2.

Скриншоты окон программы показаны на рис. 3, 4.

В качестве тестовых испытаний системы производился контроль кварцевой трубы диаметром 20 мм при ее коллапсировании за три прохода горелки. На рис. 5 показаны три прохода горелки, при которых осуществлялась данная операция. По оси абсцисс отложен номер реализации измерения (программа может выдавать системное время и дату). По оси ординат отложен диаметр в миллиметрах. Заметно изменение диаметра заготовки по ее длине. Точность работы системы была проверена

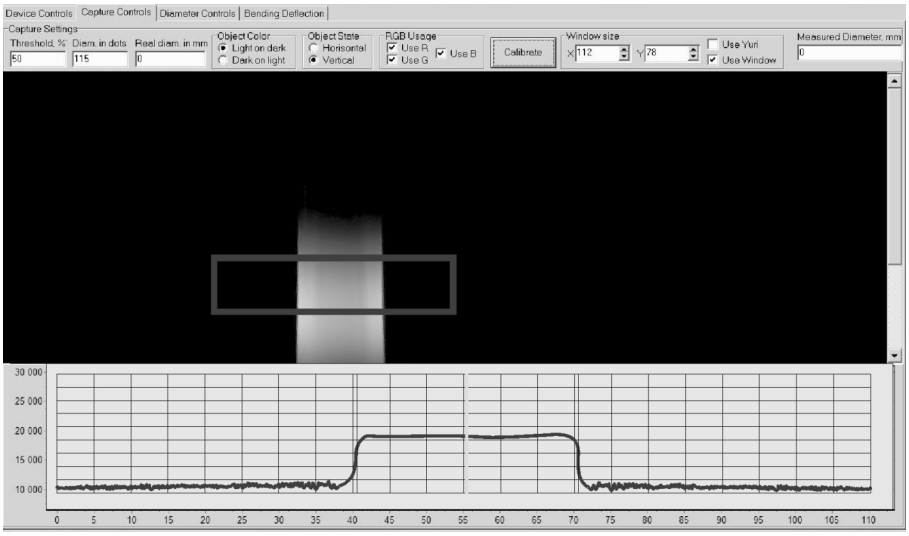


Рис. 3. Главное окно программы

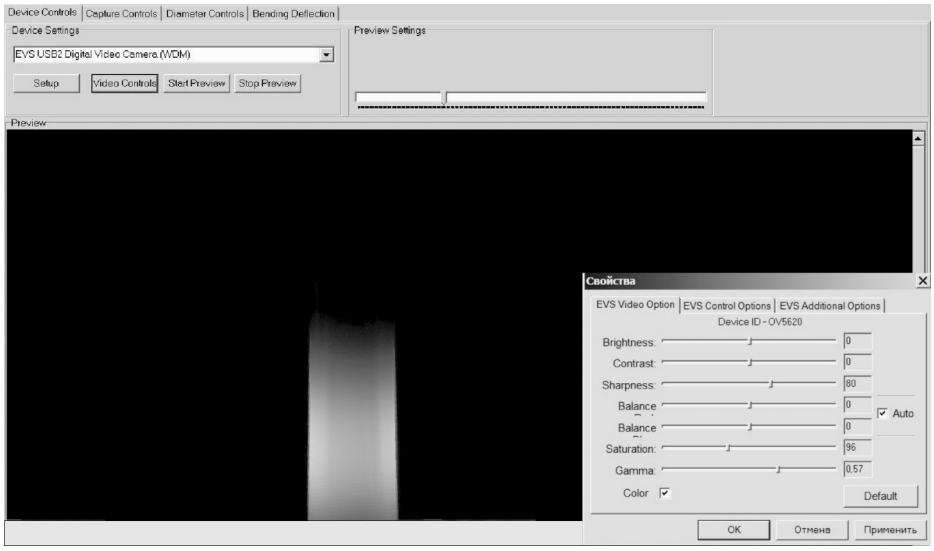


Рис. 4. Окно настройки изображения

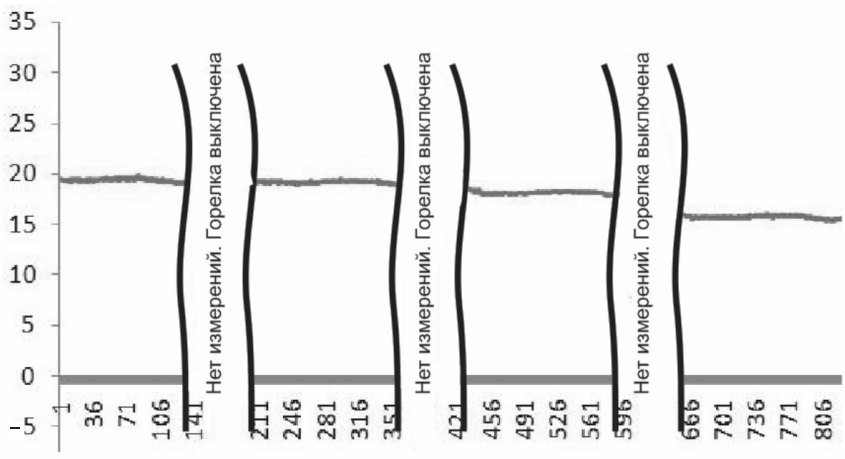


Рис. 5. Зависимость диаметра заготовки от времени при коллапсировании

на «холодной» трубе контактным способом – при помощи штангенциркуля. По результатам контактных измерений диаметра было установлено, что максимальное отклонение значения измеренного от фактического не превышает 0,2 мм (1 %).

Применение телевизионной измерительной системы позволило в значительной степени стабилизировать технологический процесс изготовления заготовок волоконных световодов методом MCVD.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Никоноров, Н.В.** Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: Учеб. пособие, курс лекций [Текст]/Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров.–СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009.–130 с.

2. **Казанцев, Г.Д.** Измерительное телевидение [Текст]/Г.Д. Казанцев, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский.–М.: Высш. шк. 1994.–288 с.

3. **Прэтт, У.** Цифровая обработка изображений [Текст]/У. Прэтт. –М.: Мир, 1982.–480 с.

УДК 378.147

В.А. Сороцкий

АКТИВИЗАЦИЯ ПОЗНАВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБУЧАЮЩИХСЯ СРЕДСТВАМИ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ УНИВЕРСИТЕТА

Постоянно возрастающие требования к выпускникам университетов вынуждают вузы все активнее использовать новые технологии обучения, позволяющие при их рациональном применении повысить качество подготовки выпускников. К числу таких новшеств следует отнести технологии электронного обучения (*e-learning*), основанные на широком использовании новейших информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). Однако сам по себе переход к использованию технологий электронного обучения (ТЭО) еще не гарантирует получение требуемого качества подготовки выпускников. Одним из обязательных условий, которым должен сопровождаться переход к использованию ТЭО, является активизация самостоятельной учебной деятельности студентов. При этом изменяется и роль преподавателя: его задача в современных условиях заключается не в том, чтобы передать обучающемуся максимально возможный объем знаний, а в том, чтобы научить его умению самостоятельно овладевать знаниями, стимулировать познавательные интересы обучающегося, помочь ему в самостоятельном поиске необходимой информации, в организации собственной деятельности.

Система основных приемов активизации познавательной деятельности обучающихся, сформировавшаяся в классической дидактике

В классической дидактике, рассматривающей научные основы традиционного (аудиторного) обучения, проблеме активизации самостоятельной учебной деятельности обучающихся уделяется большое внимание [1–3]. Как известно, знания, подлежащие усвоению, не могут быть переданы обучаемому в готовом виде, путем простого сообщения или показа, а должны быть сформированы в его сознании в результате выполнения определенных действий. Формализованная последовательность действий преподавателя может быть представлена следующей схемой: постановка познавательной проблемы (создание проблемной ситуации на основе приема сопоставления) – создание условий для решения этой проблемы обучающимися (здесь вновь используется прием сравнения и сопоставления) – обобщение и конкретизация (сопоставление нового понятия с родственными, выяснение всего многообразий проявления нового понятия и т. п.) [7].

Можно выделить несколько уровней активности обучающихся [7–10]. На *первом уровне* активности преобладают малочисленные мотивы, направленные на то, чтобы избежать определенных неудобств (вынужден учиться, т. к. этого требуют родители, преподаватели) или реализовать узколичные желания как-то устроиться в жизни. Для этого уровня характерны ситуативное и кратковременное осознание цели освоения профессии, владение системой ведущих знаний лишь на уровне представлений и фактов. Самоконтроль не осуществляется даже по эталону. Фрагментарно сформированные учебные умения действуют лишь с помощью преподавателя.

Второй уровень активности характеризуется осознанием того, что учение и труд выступают в качестве средства достижения личного благополучия. Обучающийся владеет системой ведущих знаний на уровне оперирования понятиями, учебные умения сформированы на уровне самоуправления деятельностью по определенному алгоритму при наличии «целеуказаний» со стороны преподавателя; по определенному эталону возможен самоконтроль.

Третий уровень активности характерен сформированной устойчивой положительной мотивацией учения и труда. Обучающийся четко выделяет то, что для него важно; осознанно стремится достичь высоких показателей в рамках овладения профессией; участвует в постановке целей обучения и поиске рациональных путей их достижения; владеет системой ведущих знаний на уровне оперирования законами; самостоятельно выполняет учебные задания, связанные с применением известной информации к условиям новой ситуации.

На *четвертом уровне* четко выражены потребности и ценностные ориентиры, проявляется стремление глубоко изучить профессию, осознается место текущих целей в общей системе жизненно значимых ценностей. Обучающийся проявляет полную самостоятельность в учебной деятельности: видит проблему, формулирует задачу, намечает план действий, анализирует решения, владеет системой ведущих знаний на уровне оперирования теориями.

Рассмотренный комплекс показателей интегрально отражает внешнюю и внутреннюю стороны активности обучения и может быть использован на практике для диагностики и целенаправленного управления процессом ее формирования посредством специально организованных дидактических воздействий.

В процессе обучения преподаватель, используя непосредственный контакт с обучающимися, должен обеспечить направленность и сосредоточенность их внимания на объекте усвоения. Для того чтобы тот или иной объект стал центром внимания обучающихся, он должен сначала стать центром их деятельности. Следовательно, для успеха в обучении необходимо постоянно создавать мотивы для деятельности обучающихся. Прежде чем переходить к усвоению содержания той или иной темы, обучающиеся должны осознать цель усвоения, настроиться на овладение данным учебным материалом. Только при выполнении этого условия процесс усвоения учебного материала может быть продуктивным.

Важная роль в реализации указанных выше механизмов побуждения обучающихся к активной познавательной деятельности принадлежит начальной стадии занятия. Тема учебного занятия должна быть специально дидактически поставлена в форме особого приема, повышающего реакцию обучающихся. Наибольшую эффективность имеют следующие приемы постановки темы занятия [1–3]:

побуждение обучающихся к сопоставлению ряда фактов, в результате которого возникает познавательный вопрос, соответствующий цели очередного занятия;

побуждение обучающихся к предварительному обобщению новых фактов; затруднения, возникающие при этом, используются для нового познавательного поиска;

побуждение обучающихся к рациональному практическому действию; осознание обучающимися недостаточности имеющихся знаний используется как фактор активного отношения к изучаемой теме;

предварительная организация практической работы обучающихся с целью получения эмпирических выводов; возникающий при этом интерес к научному обоснованию этих выводов используется при изложении соответствующего нового теоретического материала;

предварительный показ практической значимости предстоящего изучения очередного раздела (темы);

постановка темы занятия на фоне познавательных противоречий между явлениями; возникающее при этом стремление к разрешению этих противоречий используется для активного усвоения новых знаний;

побуждение обучающихся к формулированию гипотез по основному вопросу (основным вопросам) новой темы; дальнейшее усвоение нового материала осуществляется в форме проверки истинности этих гипотез обучающихся.

Постановка перед обучающимися учебно-познавательных задач для самостоятельного разрешения должна стимулировать их к анализу, обобщению и систематизации воспринимаемого материала. О степени сознательного усвоения учебного материала обучающимися можно судить по следующим косвенным признакам:

возникновение положительного отношения к новому знанию;

сознательно усвоенные знания всегда активны, т. е. обучающийся постоянно пользуется ими, что, несомненно, заметит опытный преподаватель.

Обобщая обсуждение приемов активизации самостоятельной учебной деятельности обучающихся, сложившихся в классической дидактике, отметим, что современный уровень развития ИКТ позволяет с учетом определенных корректив

успешно использовать большинство из них и в электронном обучении.

Особенности переноса приемов активизации познавательной деятельности обучающихся из аудиторного обучения в электронное

Как уже было отмечено выше, применение ТЭО позволяет подняться на качественно новый уровень подготовки специалистов. Это достигается, в т. ч., за счет таких возможностей электронного обучения, как [4–6]:

существенное повышение дидактических свойств электронных образовательных ресурсов, вытекающее из интегрированного воздействия на несколько органов чувств (каналов восприятия) обучающегося;

быстрая доставка учебных материалов в электронном виде;

оперативный доступ к базам знаний, размещенным в Интернете;

возможность организации самоконтроля обучающихся и тестирования их знаний в дистанционном режиме;

возможность прохождения компьютерного лабораторного практикума, основанного на использовании высококачественных цифровых моделей уникального научного оборудования;

возможность реализации удаленного сетевого доступа к реальному лабораторному оборудованию и т. д.

Учитывая, что в электронном обучении основной акцент делается на самостоятельную работу студента, до недавнего времени одним из основных его недостатков, важных, в т. ч., и в контексте обсуждаемой проблемы активизации, считалось недостаточное общение как обучающегося с преподавателем, так и между самими обучающимися. В настоящее время данная проблема в значительной мере решена благодаря появлению технологий, предоставивших возможность реализации интерактивного взаимодействия обучаемого с преподавателем в диалоговом режиме, немногим уступающего по форме и эффективности к взаимодействию при традиционном аудиторном обучении. На основе технологии создания «виртуальных групп» решается и проблема преодоления дефицита оперативного взаимодействия обучаемых между собой [5, 11].

Рассмотрим важнейшие формы активизации учебно-познавательной деятельности обучающегося, перспективные для использования в электронном обучении и органически вытекающие из рассмотренных выше методов, сформировавшихся в классической дидактике.

К приемам *опосредованной* активизации учебно-познавательной деятельности обучающегося, планируемым и «закладываемым» в учебный курс *на этапе разработки электронных учебных материалов,* необходимо отнести:

1) планирование целей и задач изучения курса (ожидаемые профессиональные способности (знания, умения и навыки) и качества их усвоения;

2) выбор рациональной модели обучения (форм, методов, средств индивидуальной и коллективной учебной деятельности) в соответствии с целью и основными задачами курса;

3) планирование логической структуры построения учебного материала курса, ориентированной на формирование необходимых профессиональных способностей;

4) разработку инструкции по обучению, раскрывающую обучающемуся:

какие цели он должен ставить перед собой (профессионально-ценностные ориентации, обусловливающие потребность усвоения нового материала);

каким должен быть уровень обученности по завершении изучения курса, чтобы он мог в дальнейшем успешно осуществлять определенные виды профессиональной деятельности;

как этот уровень диагностировать (методы осуществления оперативного и отсроченного контроля достижения поставленных целей);

как он будет организовывать свою деятельность (необходимые навыки и умения целеполагания и планирования предстоящей деятельности);

какие технологии электронного обучения использовать и как;

какие коммуникативные и организаторские способности необходимы для успешного освоения курса;

как рационально сочетать индивидуальную деятельность и коллективное взаимодействие на основе применения интерактивных технологий электронного обучения и т. п.

Наиболее перспективные приемы активизации учебно-познавательной деятельности обучающегося *при поддержке курсов с помощью ТЭО* предусматривают:

1) рациональное сочетание самостоятельной и коллективной (обсуждение способов решения

задачи и полученных результатов, обмен опытом и т. п.) учебной деятельности обучающихся. При этом следует учесть, что одной из наиболее эффективных форм совместной деятельности обучающихся является коллективная деятельность «в малых группах», которая сравнительно легко может быть осуществлена в сетевом режиме на основе использования технологий коллективной работы распределенных групп пользователей («чаты», приложение «Белая доска», видеоконференцсвязь и т. п.) [11];

2) формирование учебных и интеллектуальных умений обучающихся по эффективному сбору и переработке учебной информации: переход от пассивного восприятия учебного материала, приводимого в учебном пособии или излагаемого преподавателем, к самостоятельному поиску и сбору требуемой учебной информации, осуществляемому преимущественно в сетевом режиме (включая работу с ресурсами электронных библиотек и т. п.). Основной функцией преподавателя при этом становится управление процессом поиска и отбора нужной информации, стимулирование обучающихся на поиск и овладение новыми знаниями, формирование у них способности формулировать цели очередного этапа учебной деятельности, формирование умений обобщать новые сведения, осуществлять контроль выполнения поставленных целей;

3) внедрение форм текущего и промежуточного контроля знаний на основе компьютерного тестирования, осуществляемого в сетевом режиме в информационно-образовательной среде университета;

4) стимулирование перехода от вербального мышления, характерного при использовании учебных пособий на бумажных носителях, к интеграции визуального и вербального мышления, основанной на использовании интерактивных цифровых образовательных ресурсов (ЦОР) нового поколения [12]. Следует учесть, что применение интерактивных ЦОР даже при использовании объяснительно-иллюстративных методов способствует как заметному повышению познавательной активности обучающихся за счет увеличения наглядности и эмоциональной насыщенности (анимация, звук, видео и другие мультимедийные эффекты), так и повышению их самостоятельности в изучении нового материала;

5) использование потенциала метода проектов: кооперирование существенно повышает активность каждого обучающегося, его занятость, степень осмысления учебного материала; технологической основой при реализации метода проектов в электронном обучении могут служить технологии коллективной работы распределенных групп пользователей [11], о которых уже говорилось выше;

6) применение методов разноуровневого и разнотемпового обучения, создающих основу для индивидуализации обучения. При этом очень важно, что контроль и подведение итогов могут быть осуществлены оперативно и носят объективный характер.

Экспериментальная апробация предложенных методик

Экспериментальная апробация предложенных методик была осуществлена в информационно-образовательной среде Центра ТЭО СПбГПУ. Содержание эксперимента предусматривало проверку эффективности методик активизации учебно-познавательной деятельности обучающихся в рамках проведения лекционных занятий, лабораторного практикума и курсового проектирования по дисциплине «Спутниковые системы связи», изучавшейся в весеннем семестре 2009/2010 учебного года в рамках направлений 210300 «Радиотехника» и 210400 «Телекоммуникации» [13].

В эксперименте участвовали две академические группы кафедры радиотехники и телекоммуникаций. В качестве показателей успеваемости использовались усредненные результаты текущего и промежуточного тестирования. Техническая поддержка эксперимента осуществлялась с использованием системы управления обучением (*Learning Management System, LMS*) *Moodle*, установленной на сервере ЦТЭО СПбГПУ.

Электронный образовательный контент дисциплины был представлен:

материалами электронных лекций и справочными материалами в форматах графических и гипертекстовых редакторов MS Word, Adobe Acrobat и MHTML;

электронной библиотекой и текущей периодикой в форматах *.pdf и *.djv;

интерактивными компьютерными моделями в форматах Java и Flash;

тестами самопроверки и контрольными тестами по изученному материалу.

Традиционный образовательный контент был представлен учебными пособиями по изучаемой дисциплине, которыми группы были обеспечены в полном объеме через библиотеку. Внеаудиторное взаимодействие студентов с преподавателем и между собой осуществлялось посредством предоставляемых *LMS Moodle* услуг электронной почты и системы форумов.

Исследуемый подход к организации обучения предусматривал изложение теоретической части курса в форме очных лекций, проводимых в аудитории с привлечением интерактивных компьютерных моделей, демонстрируемых при помощи мультимедийного проектора. От студентов не требовалось конспектировать лекции – основной упор делался на рациональное осмысление материала, достигаемое в ходе живого обмена мнениями, инициируемого лектором непосредственно в процессе занятия.

Проработка и закрепление учебного материала проводились студентами во внеаудиторное время с использованием печатных учебных пособий и электронных материалов, доступ к которым осуществлялся через *LMS* (электронные материалы дополняли и уточняли печатное пособие, отражая последние тенденции в предметной области и предоставляя богатый иллюстративный материал). Внеаудиторное обращение студентов к материалам лекций и дополнительным справочным материалам инициировалось принудительно с использованием системы контрольного тестирования *LMS Moodle*. Система тестирования *LMS* на 24-часовой период открывала доступ студентам к контрольным тестам по завершении очередной лекции (закрепление материала) и перед очередной лекцией (повторение материала). При этом объем контрольных тестов последовательно наращивался в процессе изучения дисциплины за счет введения дополнительных вопросов по ранее пройденному материалу. Для обеспечения самостоятельности выполнения тестовых заданий использовались такие возможности *LMS Moodle*, как случайный выбор вопросов в тестовом задании и вариантов ответа внутри отдельных вопросов, а также работа в «защищенном окне», исключающем возможность общения через Интернет в ходе тестирования.

Результаты эксперимента показали следующее. Количество оценок «отлично» и «хорошо» по итогам экзаменационной сессии у студентов экспериментальной группы было, соответственно, на 34 и 62 % больше, чем у студентов контрольной группы. Среднее число студентов, выполнивших лабораторные работы и защитивших отчеты в ходе аудиторных занятий, в экспериментальной группе на 58 % превысило аналогичный показатель контрольной группы. По итогам проведенного опроса о том, насколько полезным было использование ТЭО в курсовом проектировании, 30 % студентов экспериментальной группы охарактеризовали их роль как «определяющую», а 60 % – как «высокую».

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об эффективности предложенных методик активизации самостоятельной учебной деятельности обучающихся как при проведении лекционных занятий, так и при проведении лабораторного практикума и курсового проектирования. Систематическое двухэтапное дистанционное тестирование студентов с последовательным наращиванием объема тестовых заданий и формированием итоговой оценки за курс с использованием текущих оценок за тесты проявило себя действенным стимулом, побуждающим обучающихся к самостоятельному внеаудиторному изучению пройденного материала.

Потенциальные возможности ТЭО по своей эффективности не только не уступают, но в ряде случаев и значительно превосходят возможности применяемых в высшей школе традиционных методов обучения. При правильной организации учебного процесса ТЭО способствуют своевременному усвоению существенно большего объема информации, чем это может быть реализовано при использовании традиционных методов обучения и учебных материалов на бумажном носителе. В электронном обучении имеется большой арсенал средств ИКТ, позволяющих активизировать познавательную деятельность студентов. В этой связи возрастает роль преподавателя как организатора и координатора управления познавательной активностью студентов. Важная роль в усилении мотивации к обучению принадлежит системе контроля знаний обучающихся, осуществляемого на основе компьютерного тестирования. Учитывая, что типовые программные продукты класса *LMS* предусматривают встроенную функцию разработки и проведения тестов в сетевом режиме, блок тестирования знаний обучающихся следует рассматривать как обязательный элемент цифровых образовательных ресурсов, применяемых в информационно-образовательной среде университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабанский, Ю.К.** Оптимизация процесса обучения (Общедидактический аспект) [Текст]/Ю.К. Бабанский. –М.: Педагогика, 1977.–256 с.

2. **Подласый, И.П.** Педагогика. Новый курс: учебник для студ. педвузов [Текст]/И.П. Подласый. –М.: Гуманит. изд.центр «ВЛАДОС», 1999. –В 2 кн.–576 с.

3. **Буланова-Топоркова, М.В.** Педагогика и психология высшей школы: Учеб. пособие для вузов [Текст]/М.В. Буланова-Топоркова, А.В. Духавнева, Л.Д. Столяренко [и др.]. –Ростов н/Д: Феникс. 2002. –2-е изд., доп. и перераб.–543 с.

4. **Гриценко, В.И.** Дистанционное обучение: теория и практика [Текст]/В.И. Гриценко, С.П. Кудрявцева, В.В. Колос [и др.]. –Киев: Наукова Думка, 2004. –375 с.

5. Подготовка и проведение учебных курсов в заочно-дистанционной форме обучения: Метод. рекомендации преподавателям [Текст]/Под ред. И.А. Цикина.–СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.–90 с.

6. **Полат, Е.С.** Новые педагогические и информационные технологии в системе образования: Учеб. пособие для студ. педвузов и системы повышения квалиф. педагогических кадров [Текст]/Е.С. Полат, М.Ю. Бухаркина, М.В. Моисеева [и др.]; Под ред. Е.С. Полат.–М.: Издат. центр «Академия», 2002.–272 с.

7. **Шамова, Т.И.** Активизация учения школьников [Текст]/Т.И. Шамова.–М.: Педагогика, 1982.–209 с.

8. **Смолкин, А.М.** Методы активного обучения: Научн.-метод. пособие [Текст]/А.М. Смолкин. –М.: Высш. шк., 1991.–176 с.

9. **Щукина, Г.И.** Методы изучения и формирования познавательных интересов учащихся [Текст]/Г.И. Щукина. –М.: Педагогика, 1971.–358 с.

10. **Лернер, И.Я.** Проблемное обучение [Текст]/И.Я. Лернер.–М.: Знание, 1974.–64 с.

11. **Никитин, А.Б.** Групповая работа в сети (Технологии и программные средства *Groupware*) [Текст]/А.Б. Никитин, А.А. Поляков, Н.К. Розова [и др.]; Под ред. проф. И.А.Цикина//Сер. Связь и бизнес.–М.: МЦНТИ, ИТЦ «Мобильные коммуникации», 2002.–248 с.

12. **Ветринский, Ю.А.** Сетевые интерактивные обучающие материалы. Разработка и применение в учебном процессе: Учебно-метод. пособие [Текст]/Ю.А. Ветринский, А.Б. Никитин, С.Н. Поздняков, В.А. Сороцкий, И.А. Цикин; Под ред. проф. И.А. Цикина.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.–52 с.

13. **Ветринский, Ю.А.** Опыт использования технологии смешанного обучения в практике преподавания технических дисциплин [Текст]/Ю.А. Ветринский//Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 5 (86).–Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та.–С. 185–190.

УДК 378.4

Ю.А. Ветринский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ В ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ШКОЛЕ

Одно из объективных препятствий внедрению методов электронного обучения (*e-Learning*) в практику преподавания в общеобразовательных учебных заведениях – отсутствие в школах квалифицированных специалистов в области современных компьютерных технологий, способных грамотно организовать процесс *e-Learning* и осуществлять его поддержку с использованием специализированных программных средств. Другое препятствие – недостаточное для эффективной организации *e-Learning* количество персональных компьютеров. Так, типовая отечественная школа имеет, как правило, один компьютерный класс, предназначенный для изучения информатики и недоступный учителям других дисциплин в каждодневное пользование.

Перечисленные проблемы могут быть решены на основе расширения сотрудничества школ с местными вузами. Формами такого сотрудничества могут стать повышение квалификации учителей в области *e-Learning*, хостинг школьных учебных сайтов на серверах вузов, а также внедрение в практику преподавания общеобразовательных дисциплин современных вузовских методик, предусматривающих работу учащихся с электронными образовательными ресурсами не-

посредственно из дома, во внеклассное время [1]. При правильной организации такая форма обучения не только позволит в определенной степени решить проблему нехватки компьютеров в российских школах, но и повысит эффективность учебного процесса, активизировав самостоятельную познавательную деятельность учеников.

Организация *e-Learning* во внеклассное время предусматривает обеспечение удаленного доступа учащихся к сетевым образовательным ресурсам, управление процессом их изучения и постоянный контроль за достигнутыми результатами. Названные функции могут быть эффективно реализованы только на базе специализированных программных средств, к которым относятся системы управления обучением (*Learning Management System – LMS*) и программы-конструкторы образовательных *web*-сайтов [2].

По возможностям управления учебной деятельностью, разнообразию форм тестирования учащихся и способов обработки их результатов профессиональные *LMS* существенно превосходят такие программы, как «Конструктор образовательных сайтов» (www.edu.of.ru) и «Конструктор школьных сайтов» (www.edusite.ru), позиционируемые в ряде источников в качестве основных инструментальных средств для организации *e-Learning* в школах [3]. Наиболее предпочтительным вариантом *LMS* для внедрения методов *e-Learning* в практику изучения школьных дисциплин является *LMS* открытого кода *Moodle*, широко используемая в информационно-образовательных средах отечественных вузов. Достоинствами *LMS Moodle*, выгодно отличающими ее от других *LMS* открытого кода, являются полная русификация системы и наличие доступных справочных источников как сетевых, так и от издательств местных вузов [4, 5].

Возможности *LMS Moodle* позволяют обеспечить планомерное изучение домашнего задания, организовав его в стандартном формате «курса-структуры» (рис. 1). Теоретическая часть учебного материала может представлять собой методические разработки школьных педагогов по вопросам, недостаточно хорошо освещенным в учебниках, ссылки на учебные объекты из федеральных и вузовских хранилищ информационных образовательных ресурсов, а также на сетевые интерактивные модели, развивающие пространственное воображение учащихся и активизирующие их самостоятельную учебную деятельность (рис. 2) [6].

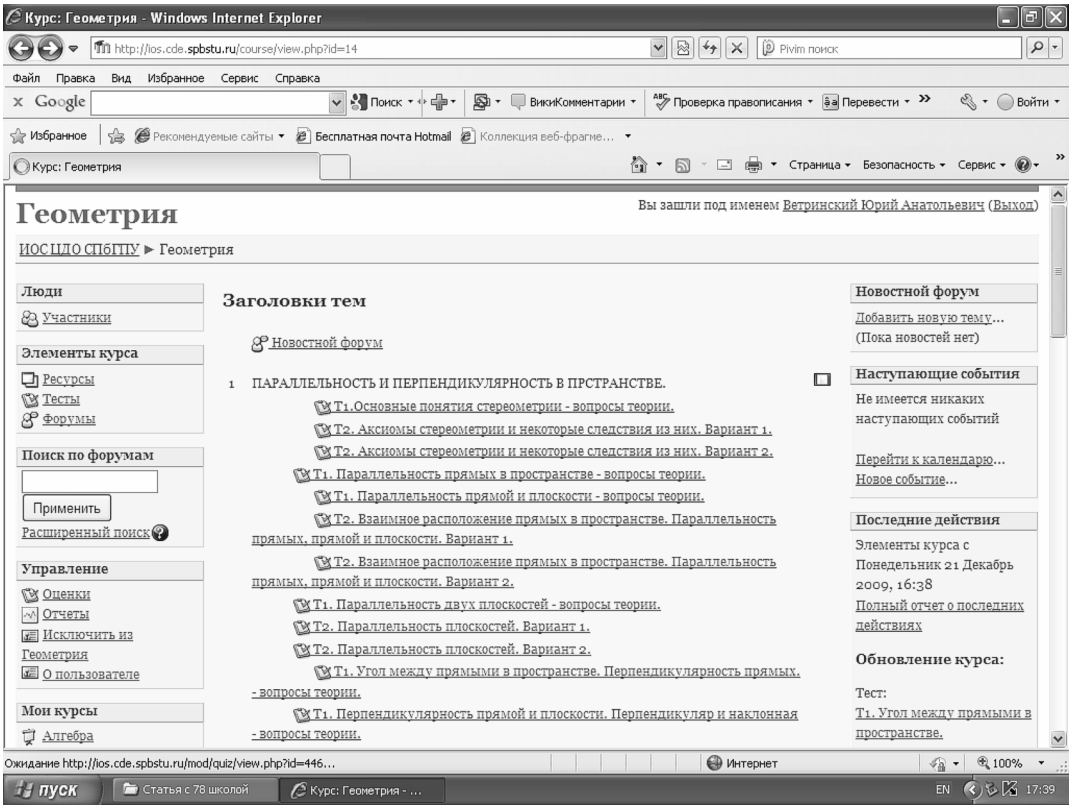


Рис. 1. Организация учебного материала в формате «курса-структуры»

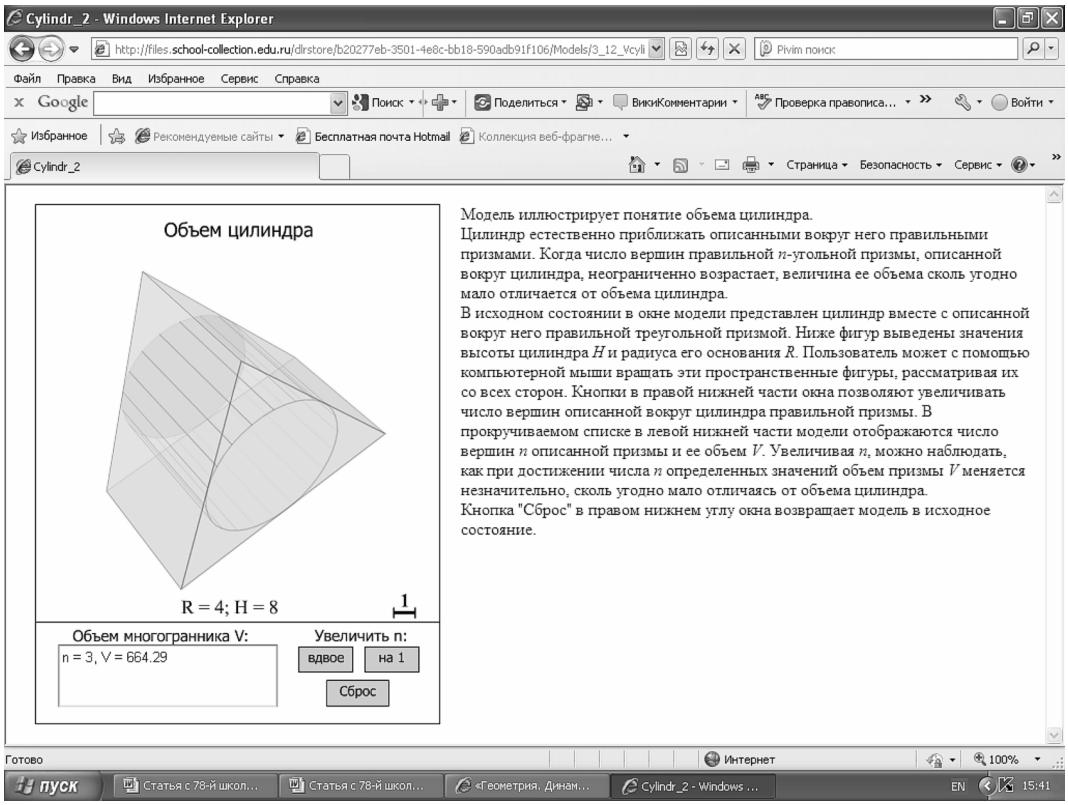


Рис. 2. Работа с сетевой интерактивной моделью через интерфейс *LMS*

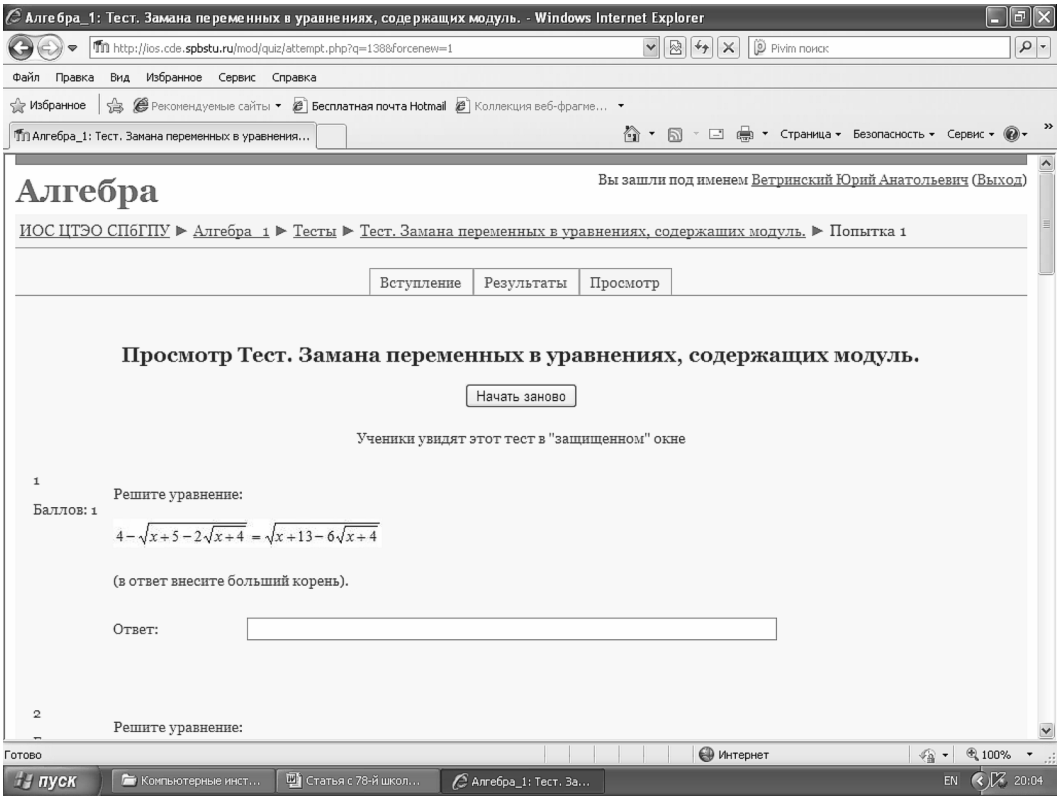


Рис. 3. Тестирование в «защищенном окне» через интерфейс *LMS*

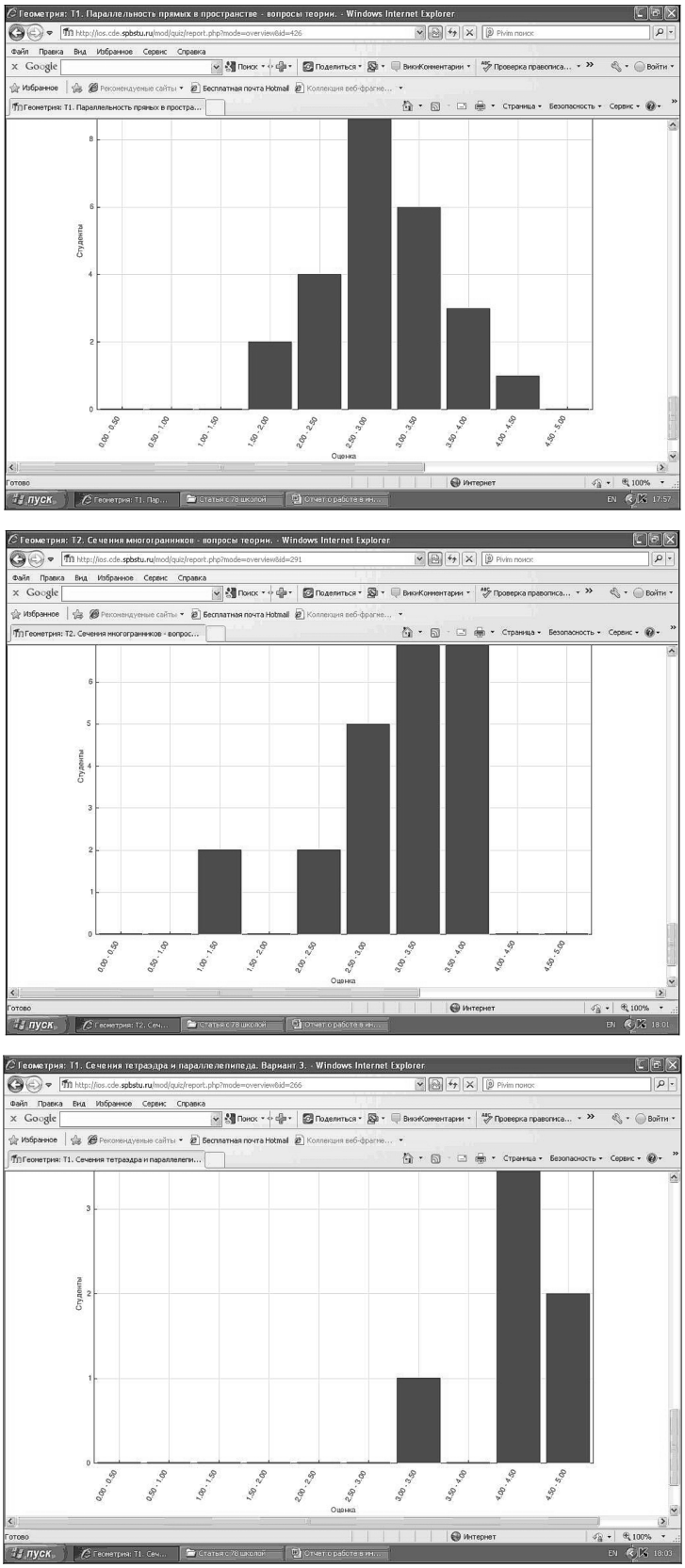


Рис. 4. Результаты контроля успеваемости учащихся средствами *LMS*

Еще одной формой активизации учебной деятельности являются контрольные тесты, под которые может быть отведено до 90 % содержания электронных образовательных материалов. Тесты могут быть разделены на группы: например, тесты на понимание существа заданного материала, в которых не предполагается проведение вычислений; тесты, включающие решение задач и примеров; тесты, соответствующие вопросам ЕГЭ и т. д. Система *Moodle* предоставляет широкие возможности по разработке тестовых вопросов и управлению процессом тестирования, одна из задач которого – обеспечение самостоятельности выполнения тестовых заданий. Для этого в системе предусмотрено индивидуальное случайное перемешивание вопросов в задании и вариантов ответов в отдельных вопросах, а также работа учеников в «защищенном окне», исключающем возможность обмена мнениями через Интернет при тестировании (рис. 3).

Простейший вариант организации *e-Learning* в общеобразовательной школе может выглядеть следующим образом. На период выполнения домашнего задания учащиеся через интерфейс *LMS* получают доступ к новому блоку учебных материалов, включающему методические указания, теоретическую часть, тесты для самоконтроля и контрольный тест. Доступ к контрольному тесту производится в заданный промежуток времени, после чего он закрывается, а не успевшие получают неудовлетворительные оценки. Такой подход побуждает учащихся к изучению теоретической части и самоконтролю до начала контрольного тестирования. Тесты для самоконтроля не имеют ограничений по времени и количеству попыток. По завершению каждой попытки учащиеся имеют возможность ознакомиться со своими оценками. При этом правильные ответы им не показываются, что инициирует обсуждение учебных вопросов среди учащихся с использованием средств *LMS* – электронной почты, форумов и чата. Коллективная работа приводит к лучшему усвоению учебного материала, степень изучения которого проверяется контрольным тестом. Время прохождения контрольного теста и количество попыток его прохождения ограничено (оптимальным вариантом будут две попытки – на случай возможных сбоев в работе сети). Во избежание коллективного обсуждения учащимися вопросов контрольного теста в промежутке между попытками интервал между ними не должен превышать 30 мин.

Эффективность такого подхода подтверждена в ходе эксперимента по организации *e-Learning*, проведенного Центром технологий электронного обучения СПбГПУ совместно с 78-й общеобразовательной школой Санкт-Петербурга в 2009/2010 учебном году. На рис. 4 приведены усредненные результаты тестирования учащихся 10 класса 78-й школы по геометрии за три четверти. Видно, что если в начале первой четверти основная часть учеников получала оценку «удовлетворительно», то в третьей четверти большая часть класса стала получать оценки «хорошо» и «отлично».

Таким образом, даже в условиях недостаточного обеспечения общеобразовательных школ персональными компьютерами и Интернет, возможна организация эффективной работы учащихся с электронными образовательными ресурсами, ведущая к заметному росту успеваемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ветринский, Ю.А.** Опыт использования технологии смешанного обучения в практике преподавания технических дисциплин [Текст]/Ю.А. Ветринский// Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2009.–№ 5 (86) Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.–Изд-во Политехн. ун-та.–С. 185–190.

2. **Ветринский, Ю.А.** Программные средства поддержки учебного процесса в информационно-образовательной среде университета [Текст]/Ю.А. Ветринский, А.Б. Никитин, В.А. Сороцкий, И.А. Цикин//Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2008. –№ 3 (60) Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. –С. 256–264.

3. **Осипова, О.П.** Создание школьного сайта на основе свободного программного обеспечения. [Текст]/О.П. Осипова//Справочник руководителя образовательного учреждения. –2010. –№ 3.

4. **Ветринский, Ю.А.** Работа с информационными ресурсами в типовой информационно-образовательной среде: Учеб.-метод. пособие [Текст]/ Ю.А. Ветринский, А.Б. Никитин, В.А. Сороцкий, И.А. Цикин; Под ред. И.А. Цикина.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. –44 с.

5. **Белозубов, А.В.** Система дистанционного обучения Moodle: Учеб.-метод. пособие [Текст]/А.В. Белозубов, Д.Г. Николаев.–СПб.: Изд-во ИТМО, 2007.–108 с.

6. **Никитин, А.Б.** Использование сетевых интерактивных моделей при изучении школьной математики: Учеб.-метод. пособие [Текст]/А.Б. Никитин, И.А. Цикин.–СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. –31 с.

УДК 378.146

В.Б. Моисеев, А.Ф. Зубков, В.Н. Деркаченко

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ ПО ОБЩЕПРОФЕССИОНАЛЬНЫМ И СПЕЦИАЛЬНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Процессы, протекающие в системе образования, требуют постоянной объективной оценки, корректировки и управления. Без прогнозирования управление невозможно.

Поэтому возникает необходимость прогнозирования показателей качества образования как на завершающих этапах обучения, так и в ходе учебного процесса.

Качество образования определяется квалификацией профессорско-преподавательского состава, его заинтересованностью педагогической деятельностью, уровнем образовательных технологий, состоянием учебно-материальной базы, базовой подготовкой обучаемых и отношением их к приобретению знаний и умений по дисциплине, применением современных методов контроля качества учебных достижений студентов.

Менеджмент качества обучения – важная задача системы образования высшего учебного заведения.

Профессиональная подготовка обучающихся зависит от многих факторов и, в частности, она может быть повышена за счет применения математических моделей и прогнозных оценок успеваемости по общепрофессиональным и специальным дисциплинам в зависимости от уровня усвоения материалов обеспечивающих курсов.

Эти модели могут быть получены на основе реальной информации об успеваемости студентов и применения регрессионного анализа.

На первоначальном этапе исследования необходимо выбрать общепрофессиональные и специальные дисциплины, установить перечень обеспечивающих курсов и провести сбор статистической информации об успеваемости студентов.

Система подготовки профессиональных специалистов может быть представлена схемой (рис. 1).

Эта система включает следующие элементы: преподаватель, студент, документация и учебно-материальная база. Все элементы системы постоянно совершенствуются. Для оценки качества подготовки студентов используются различные методики и методы.

Одно из направлений повышения качества подготовки студентов является управление уров-

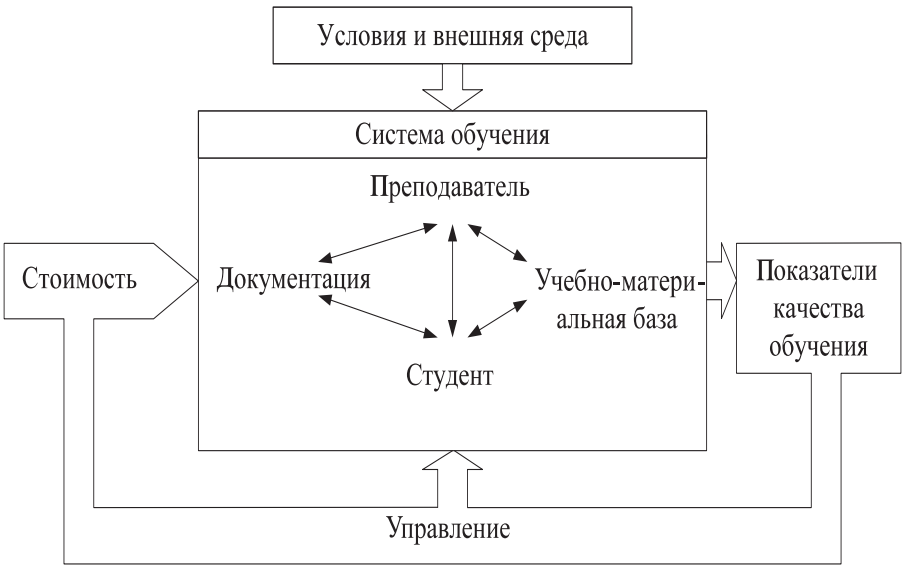


Рис. 1. Система обучения студентов

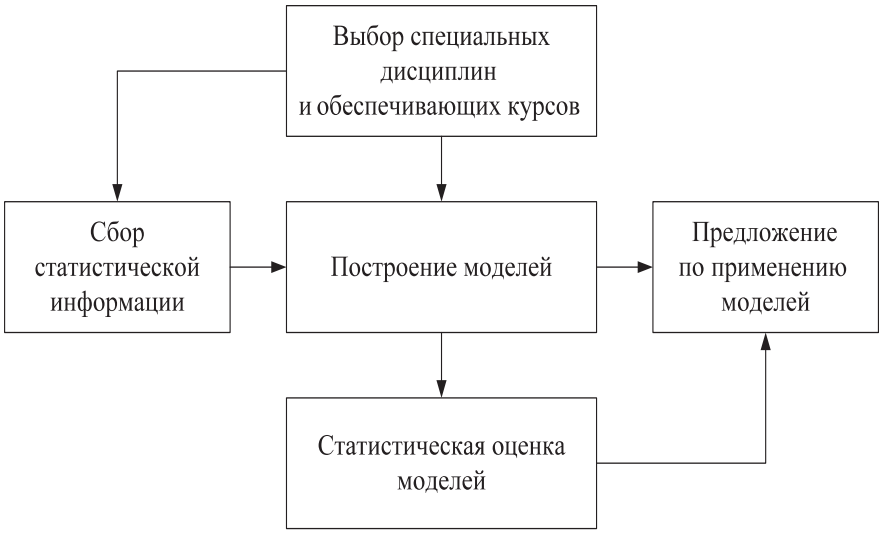


Рис. 2. Этапы методики построения моделей

нем их знаний и умений за счет информации, полученной по моделям прогнозирования успеваемости по общепрофессиональным и специальным дисциплинам в зависимости от обеспечивающих курсов. Предлагаемая методика включает следующие этапы (рис. 2).

Построение регрессионных моделей связи успеваемости студентов по общепрофессиональным и специальным дисциплинам с обеспечивающими курсами может проводиться как отдельно для каждой учебной группы, так и для студентов специальности.

Так как на уровень знаний и умений студентов по общепрофессиональной или специальной дисциплине оказывают влияние обеспечивающие курсы, то такая связь может быть представлена многофакторной регрессионной моделью.

Многофакторная линейная регрессионная модель имеет вид:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \ldots + a_k x_k, \qquad (1)$$

где y – оценки экзаменационных сессий студентов по общепрофессиональной или специальной дисциплине или государственного экзамена; x_1, x_2, ..., x_k – оценки экзаменационных сессий студентов по обеспечивающим дисциплинам; k – число обеспечивающих дисциплин; a_0, a_1, a_2, ..., a_k – коэффициенты регрессионных моделей.

Построение статистических моделей проводилось 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; расчетное значение критерия Фишера.

Значимость модели оценивается по критерию Фишера. Расчетное значение критерия Фишера определяется по формуле:

$$F = \frac{\sigma^2_{\hat{y}}}{\sigma^2_{\varepsilon}}, \qquad (2)$$

где $\sigma^2_{\hat{y}}$ – факторная дисперсия; σ^2_{ε} – остаточная дисперсия.

Вывод о значимости (незначимости) модели выводится на экран компьютера.

Качество модели в целом оценивается через коэффициент детерминации:

$$R^2 = \frac{\sigma^2_{\hat{y}}}{\sigma^2_{y}}, \qquad (3)$$

где σ^2_{y} – общая дисперсия.

Наряду с множественным коэффициентом детерминации определяется приведенный коэффициент детерминации:

$$R^2_{\text{пр}} = \frac{R^2(n-1)-k}{n-1-k}, \qquad (4)$$

где n – объем выборки (число студентов).

Его применение обусловлено тем, что при увеличении числа факторов, например, количества обеспечивающих дисциплин, коэффициент детерминации имеет тенденцию к росту. Однако это не всегда соответствует логическому характеру изменения изучаемого процесса. Поэтому

определяется приведенный коэффициент детерминации, который может уменьшаться при некорректном выборе факторов.

Стандартная ошибка модели определяется по формуле:

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2}{n-1-k}}, \qquad (5)$$

где $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$; y_i – реальное i-е значение показателя (семестровая оценка обучаемого по общепрофессиональной или специальной дисциплине); $\hat{y}_i$ – прогнозная оценка i-го значения показателя, полученная по модели.

Точность модели оценивается либо через стандартную ошибку, либо на основе ошибки аппроксимации:

$$\varepsilon = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i}\right| \cdot 100\ \%. \qquad (6)$$

Если ошибка аппроксимации менее 5 %, то модель можно применять в практических целях.

В данном исследовании использовалась статистическая информация о семестровых оценках обучающихся по общепрофессиональным, специальным и обеспечивающим дисциплинам учебных групп специальности «Математические методы в экономике».

Построение моделей по данным учебной группы третьего курса проводилось в зависимости от увеличения числа обеспечивающих дисциплин:

первая модель – связь дисциплины «Статистика» с обеспечивающими курсами «Математический анализ» и «Теория вероятностей»;

вторая модель – связь дисциплины «Статистика» с обеспечивающими курсами «Математический анализ» и «Математическая статистика»;

третья модель – связь дисциплины «Статистика» с обеспечивающими курсами «Математический анализ», «Теория вероятностей», «Математическая статистика» и «Информатика».

По результатам сдачи семестровых экзаменов студентами пятого курса получена модель связи успеваемости по дисциплине «Моделирование макроэкономических процессов и систем» с обеспечивающими курсами «Эконометрическое моделирование», «Методы социально-экономического прогнозирования», «Моделирование микроэкономических процессов и систем», «Математические методы финансового анализа».

По результатам сдачи государственного экзамена и семестровых оценок студентов-выпускников 2008 г. построена регрессионная модель связи оценок государственного экзамена с общепрофессиональными и специальными дисциплинами.

После ввода статистических данных по успеваемости студентов третьего курса по дисциплине «Статистика» и обеспечивающим курсам «Математический анализ» и «Теория вероятностей» в электронную таблицу «Stadia 6.2» и соответствующих действий по управлению процессом построения моделей получены результаты (табл.).

Информация о статистической модели и ее характеристиках в системе «Stadia 6.2»

Коэффициенты		a_0	a_1	a_2	
Значение		1,146	0,3455	0,4153	
Стандартная ошибка		0,6879	0,1529	0,1826	
Значимость		0,1087	0,0339	0,0329	
Источник	Сумма квадратов		Ст. своб.	Средн. кв.	
Регрессионная	4,7		2	2,35	
Остаточная	4,073		19	0,2144	
Вся	8,773		21		
Множеств. R	R^2	$R^2_{пр}$	Ст. ошибка	F	Знач.
0,73192	0,53573	0,48686	0,463	10,96	0,0009
Регрессионная модель адекватна экспериментальным данным					

Из таблицы можно записать модель связи успеваемости по «Статистике» с обеспечивающими курсами:

$$С = 1{,}146 + 0{,}3455МА + 0{,}4153ТВ, \qquad (7)$$

где С – статистика; МА – математический анализ; ТВ – теория вероятностей.

Модель (7) показывает, что с повышением успеваемости по «Математическому анализу» и «Теории вероятностей» улучшается оценка по «Статистике».

Например, при увеличении оценки на 1 балл по «Математическому анализу» улучшается на 0,3455 балла оценка по «Статистике».

При этом более высокий вклад в успеваемость по «Статистике» вносят результаты по дисциплине «Теория вероятностей».

Расчетные значения в таблице получены по формулам (2–5)

Расчетное значение критерия Фишера определяется по формуле (2):

$$F = \frac{2{,}35}{0{,}2144} = 10{,}96.$$

Коэффициент детерминации определяется по формуле (3):

$$R^2 = \frac{4{,}7}{8{,}773} = 0{,}53573 \approx 0{,}54.$$

Таким образом, успеваемость студентов по дисциплине «Статистика» на 54 % зависит от результатов, полученных по курсам «Математический анализ» и «Теория вероятностей».

Приведенный коэффициент детерминации определяется по формуле (4):

$$R^2_{пр} = \frac{0{,}53573 \cdot 21 - 2}{19} = 0{,}48686.$$

Стандартная ошибка модели рассчитывается по формуле (5):

$$\sigma_\varepsilon = \sqrt{0{,}2144} = 0{,}463.$$

Вывод о значимости модели делается исходя из расчетного значения критерия Фишера и установленной вероятности ($\alpha = 0{,}05$). Если уровень значимости α меньше 0,05, то модель значима.

Наряду с моделью (7) построены другие модели связи успеваемости студентов по дисциплине «Статистика» с обеспечивающими курсами:

$$С = 1{,}508 + 0{,}343МА + 0{,}3247МС, \qquad (8)$$

где МС – математическая статистика.

Характеристики модели: $R = 0{,}71$; $R^2 = 0{,}50$; $\sigma_\varepsilon = 0{,}4803$; $F = 9{,}515$. Модель значима.

Наиболее точный прогноз об успеваемости студентов по дисциплине «Статистика» можно получить на основе модели связи с достаточно полным перечнем обеспечивающих курсов.

Такая модель имеет вид:

$$С = –0{,}1989 + 0{,}3270МА + 0{,}1565ТВ + \\ + 0{,}0709МС + 0{,}4571И, \qquad (9)$$

где И – информатика.

Характеристики модели: $R = 0{,}77$; $R^2 = 0{,}59$; $\sigma_\varepsilon = 0{,}4586$; $F = 6{,}1764$. Модель значима.

Кроме моделей (7–9) получена модель связи успеваемости студентов по дисциплине «Моделирование макроэкономических процессов и систем» с обеспечивающими курсами. Эта модель построена по данным успеваемости студентов пятого курса. Модель имеет вид:

$$ММаЭПиС = 0{,}5725 + 0{,}5741ЭМ + \\ + 0{,}0127МСЭП – 0{,}0228ТИ + \\ + 0{,}1172ММиЭПиС + 0{,}1263ММФА, \qquad (10)$$

где ММаЭПиС – моделирование макроэкономических процессов и систем; ЭМ – эконометрическое моделирование; МСЭП – методы социально-экономического прогнозирования; ТИ – теория игр; ММиЭПиС – моделирование микроэкономических процессов и систем; ММФА – математические методы финансового анализа.

Характеристики модели: $R = 0{,}701922$; $R^2 = 0{,}49269$; $R^2_{пр} = 0{,}3719$; $\sigma_\varepsilon = 0{,}5596$; $F = 4{,}079$. Модель значима, однако в ней дисциплина «Теория игр» со знаком минус.

По-видимому, данная дисциплина не имеет связи с дисциплиной ММаЭПиС.

Исключив данную дисциплину, получили следующую модель:

$$ММаЭПиС = 0{,}5685 + 0{,}5654ЭМ + \\ + 0{,}0140МСЭП + 0{,}1065ММиЭПиС + \\ + 0{,}1222ММФА. \qquad (11)$$

Характеристики модели: $R = 0{,}70179$; $R^2 = 0{,}4925$; $R^2_{пр} = 0{,}40023$; $\sigma_\varepsilon = 0{,}5468$; $F = 5{,}338$. Модель значима.

Сравнивая характеристики моделей (10 и 11) можно заметить, что коэффициент детерминации модели (10) увеличился по сравнению с моделью (11) за счет включения дисциплины «Теория игр», т. е. увеличилось число обеспечивающих курсов. Однако приведенный коэффициент детерминации модели (10) по сравнению с моделью (11) уменьшился. Это свидетельствует о том, что дис-

циплина «Теория игр» необоснованно включена в регрессионную модель.

Поэтому в практических целях необходимо использовать модель (11).

Важная задача учебного процесса – организация и сдача государственного экзамена. Результаты сдачи государственного экзамена зависят от уровня подготовки студентов по общепрофессиональным, математическим и специальным дисциплинам. По успеваемости студентов-выпускников 2008 г. построена следующая модель:

$$\begin{gathered}\text{ГЭ} = 0{,}0136 + 0{,}1909\text{ТРиМРС} + \\ + 0{,}0207\text{ММаЭПиС} + 0{,}0860\text{ММФА} + \\ + 0{,}2140\text{МСЭП} + 0{,}0340\text{ММиМИО} + \\ + 0{,}4237\text{С} + 0{,}05\text{ММиЭПиС},\end{gathered} \quad (12)$$

где ГЭ – государственный экзамен; ТРиМРС – теория риска и моделирование рисковых ситуаций; ММиМИО – математические методы и модели исследования операций.

Характеристики модели: $R = 0{,}83$; $R^2 = 0{,}6889$; $\sigma_\varepsilon = 0{,}3970$; $F = 4{,}43$. Модель значима.

Регрессионную модель (12) предлагается использовать для прогнозирования оценок государственного экзамена студентов специальности «Математические методы в экономике».

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что дальнейшие исследования могут быть направлены на построение моделей связи успеваемости студентов других специальных дисциплин с обеспечивающими курсами; оценок по специальным дисциплинам с результатами защиты курсовых работ; результатов сдачи государственного экзамена и защиты дипломных работ с семестровыми оценками по математическим, общепрофессиональным и специальным дисциплинам. Это будет способствовать повышению качества подготовки специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моисеев, В.Б.** Система многоуровневого непрерывного профессионального образования в Пензенской государственной технологической академии [Текст]/В.Б. Моисеев, А.Б. Андреев//Лидерство и профессиональное образование.–2008.–№1–С. 4–13.

2. **Зубков, А.Ф.** Математические модели оценки профессиональных качеств преподавателя [Текст]/А.Ф. Зубков//Академия профессионального образования.–2007.–№3–4–С. 36–39.

3. **Деркаченко, В.Н.** Методы социально-экономического прогнозирования: Учебник [Текст]/В.Н. Деркаченко, А.Ф. Зубков.–Пенза: ПГТА, 2008.–192 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АНИКИН Игорь Вячеславович – *заведующий кафедрой систем информационной безопасности Казанского государственного технического университета имени А.Н. Туполева, доцент, кандидат технических наук, докторант.*

420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10. Тел. (843) 231-00-56, e-mail: anikinigor@evm.kstu-kai.ru

АНТОНОВ Владимир Феохарович – *аспирант кафедры управления и информатики в технических системах Пятигорского государственного технологического университета.*

357500, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, д. 56. Тел. (87937) 7-35-07, e-mail: antonovpgtu@mail.ru

АТРОЩЕНКО Валерий Александрович – *декан факультета компьютерных технологий и автоматизированных систем Кубанского государственного технологического университета.*

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. Тел. (861) 259-60-83, e-mail: atroschenko@kubstu.ru

БЕНДЕРСКАЯ Елена Николаевна – *доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29. Тел. (812) 297-42-18, e-mail: Helen.bend@gmail.com

БИСКУБ Константин Николаевич – *аспирант кафедры электропривода и автоматизации технологических процессов Норильского индустриального института.*

663310, г. Норильск, ул. 50 лет Октября, д. 7. Тел. (3919) 47-39-19, e-mail: scub111@mail.ru

БЛОХИН Юрий Владимирович – *аспирант кафедры вычислительной техники Московского государственного института электронной техники.*

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5. E-mail: ds@inbox.ru

БРАГИН Николай Анатольевич – *соискатель кафедры информатики Кубанского государственного технологического университета.*

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. Тел. (861) 259-60-83, e-mail: notabene@rambler.ru

БУККА Елена Станиславовна – *старший преподаватель кафедры естественнонаучных дисциплин и информационных технологий Ставропольского кооперативного института.*

355000, г. Ставрополь, ул. Голенева, д. 36

БУТУСОВ Денис Николаевич – *аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.*

197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5. Тел. (812) 234-36-75

ВАЛЮХОВ Владимир Петрович – *профессор кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корп. 2. Тел. (812) 552-96-78, e-mail: kuptsov@radio.rphf.spbstu.ru

ВЕТРИНСКИЙ Юрий Анатольевич – *доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-76-39, e-mail: vetrinsky@mail.spbstu.ru

ВЕТРОВ Юрий Викторович – *доцент кафедры радиоэлектронных средств защиты информации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ГАБДРАХМАНОВ Артур Айратович – *инженер связи ЗАО «Самара-Транстелеком», соискатель кафедры телекоммуникационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета.*

450022, г. Уфа, ул. Владивостокская, д. 2, корп. 1. Тел. (347) 275-20-42, e-mail: Kwon@ufamail.ru, a.gabdrahmanov@samara.ttk.ru

ГАБДРАХМАНОВА Наиля Талгатовна – *доцент кафедры высшей математики Российского университета дружбы народов, кандидат технических наук.*

450022, г. Уфа, ул. Владивостокская, д. 2, корп. 1. Тел. (347) 275-20-42, e-mail: Kwon@ufamail.ru

ГУЗАИРОВ Мурат Бакеевич – *профессор кафедры вычислительной техники и защиты информации Уфимского государственного авиационного технического университета, доктор технических наук.*

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д.12. Тел. (347) 273-06-72, e-mail: KostyukovaN@yandex.ru

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

ДЬЯЧЕНКО Роман Александрович – *доцент кафедры информатики Кубанского государственного технологического университета.*

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. Тел. (861) 259-60-83, e-mail: emessage@rambler.ru

ЖУКОВ Константин Георгиевич – *доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета, кандидат технических наук.*

197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5. Тел. (812) 234-36-75, e-mail: k.g.zhukov@gmail.com

ЖУКОВА Софья Витальевна – *доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-42-18, e-mail: flyingbug2@mail.ru

ЗАВЬЯЛОВ Сергей Викторович – *студент кафедры радиоэлектронных средств защиты информации Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

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

ИВАНОВ Марат Валерьевич – *соискатель кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: imv@gce.ru

ИЛЬИНА Наталия Андреевна – *студентка кафедры прикладной математики Государственного университета управления.*

109542, Москва, Рязанский пр., д. 99. Тел. (495) 371-11-65, e-mail: nailyina@gmail.com

КАТЕЛЕВСКИЙ Вадим Яковлевич – *заведующий лабораторией ОАО «ЭНПО "Неорганика"», кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

КОНСТАНТИНОВ Юрий Александрович – *аспирант кафедры прикладной математики Пермского государственного технического университета.*

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 19а. Тел. (342)-2-198-340, e-mail: olga@pstu.ru

КОСТЮКОВА Анастасия Петровна – *аспирант кафедры вычислительной техники и защиты информации Уфимского государственного авиационного технического университета.*

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 273-06-72, e-mail: KostyukovaN@yandex.ru

КОЧКАРОВ Расул Ахматович – *докторант Финансовой академии при Правительстве РФ, кандидат экономических наук.*

125993, Москва, Ленинградский пр., д. 49

КРЮКОВ Игорь Иванович – *доцент кафедры прикладной математики Пермского государственного технического университета, кандидат технических наук.*

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 19а. Тел. (342)-2-198-340, e-mail: olga@pstu.ru

КУПЦОВ Владимир Дмитриевич – *докторант кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук, доцент.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, к. 2. Тел. (812) 552-96-78, e-mail: kuptsov@radio.rphf.spbstu.ru

КЯНДЖЕЦИАН Рубен Арамович – *старший научный сотрудник ОАО «ЭНПО "Неорганика"», кандидат химических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

МАКЕЕВ Михаил Игоревич – *ведущий инженер ООО «Фирма "НИТА"»*

196210, Санкт-Петербург, ул. Взлетная, д. 15 А. Тел. (812) 331-9840, e-mail: nita@nita.ru

МАТВЕЕВ Александр Владимирович – *доцент кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: fcvega_10@mail.ru

МЕЛЬНИКОВ Пётр Николаевич – *ведущий научный сотрудник Московского государственного института электронной техники и НИИ вычислительных средств и систем управления, кандидат технических наук, доцент.*

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5. Тел. (499)720-87-17, e-mail: amper_@mail.ru

МОИСЕЕВ Василий Борисович – *ректор Пензенской государственной технологической академии, доктор педагогических наук.*

440605, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11

ПИСАРЕВ Александр Иванович – *заведующий кафедрой электропривода и автоматизации технологических процессов Норильского индустриального института.*

663310, г. Норильск, ул. 50 лет Октября, д. 7. Тел. (3919) 47-39-19, e-mail: apissarev@yandex.ru

ПОСКРЕБЫШЕВ Максим Михайлович – *инженер Пермского государственного технического университета.*

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 19а. Тел. (342)-2-198-340, e-mail: olga@pstu.ru

ПРОКОПЕНКО Артем Сергеевич – *аспирант кафедры информатики Московского физико-технического института.*

1414700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. E-mail: artjom.prokopenko@gmail.com

РОСТОВ Николай Васильевич – *доцент кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-59-60

РУБЕЖНАЯ Ирина Николаевна – *старший преподаватель Ставропольского кооперативного института, филиал Белгородского университета потребительской кооперации.*

355000, г. Ставрополь, ул. Голенева, д. 36. Тел. 8(8652)26-98-21, e-mail: inrub@rambler.ru

САЛАНГИН Алексей Александрович – *доцент кафедры физики Псковского государственного политехнического института, кандидат технических наук.*

180000, г. Псков, ул. Л. Толстого, д. 4. Тел. (8112) 79-78-78, e-mail: alsalan@yandex.ru

СИМОНОВ Сергей Борисович – *соискатель кафедры вычислительной техники Московского государственного института электронной техники, ведущий инженер-программист НИИ вычислительных средств и систем управления, кандидат технических наук.*

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5. Тел. (499) 720-87-17, e-mail: sb.simonov@gmail.com

СМОЛЬНИКОВА Мария Анатольевна – *старший преподаватель Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации.*

196210, Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38. E-mail: mariasmol@inbox.ru

СОЛОВЬЕВ Владимир Игоревич – *доцент кафедры прикладной математики Государственного университета управления, кандидат экономических наук.*

109542, Москва, Рязанский пр., д. 99. E-mail: visoloviev@yandex.ru

СОРОЦКИЙ Владимир Александрович – *доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Тел. (812) 552-76-79, e-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru

ТАРАСОВ Сергей Дмитриевич – *ассистент кафедры информационных систем и компьютерных технологий Балтийского государственного технического университета «Военмех» имени Д.Ф. Устинова.*

190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1. Тел. (812) 316-24-30, e-mail: Tarasov_sd@mail.ru

ТЕРПИГОРЕВ Михаил Александрович – *старший научный сотрудник НИИ вычислительных средств и систем управления Московского государственного института электронной техники, кандидат технических наук, доцент.*

124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, д. 5. Тел. (499)720-87-51, e-mail: terpm@olvs.miee.ru

ТОКАРЕВ Юрий Петрович – *начальник управления организации использования воздушного пространства Министерства транспорта РФ федерального агентства воздушного транспорта (Росавиация).*

125167, Москва, Ленинградский пр., д. 37, корп. 2. Тел. (499) 231-50-09

ТОРМАСОВ Александр Геннадьевич – *заместитель заведующего кафедрой информатики Московского физико-технического института, доктор физико-математических наук.*

141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел. 8-495-408-66-95, e-mail: tor@crec.mipt.ru

ФИРСОВ Андрей Николаевич – *доцент, заместитель заведующего кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат физико-математических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ХАРЛАМОВА Нелли Артемьевна – *доцент кафедры общей физики Пермского государственного технического университета, кандидат технических наук.*

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 19а. Тел. (342)-2-198-340, e-mail: nellia@dom.raid.ru

ЧЕРНЫШЕВ Александр Борисович – *доцент кафедры информатики и информационных технологий Пятигорского государственного технологического университета, кандидат технических наук.*

357500, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, д. 56. Тел. (87937) 7-35-07, e-mail: chalbor@rambler.ru

ШЕВЦОВ Юрий Дмитриевич – *профессор кафедры информатики Кубанского государственного технологического университета.*

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. Тел. (861) 259-60-83

ШЕВЧЕНКО Андрей Борисович – *соискатель кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ШУРАКОВ Дмитрий Леонидович – *аспирант кафедры управления и информатики в технических системах Пятигорского государственного технологического университета.*

357500, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, д. 56. Тел. (87937) 7-35-07, e-mail: dmi-shurakov@mail.ru

ЮМАЕВ Константин Рустамович – *начальник отдела ООО «Фирма "НИТА"»*

196210, Санкт-Петербург, ул. Взлетная, д. 15 А. Тел. (812) 331-98-40, e-mail: nita@nita.ru

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Токарев Ю.П. ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ.

Изучена задача организации командной радиолинии для управления БПЛА. Проанализированы характеристики радиолинии АЗН-В режима 4. Рассмотрены возможные схемы управления БПЛА. Выбрана схема управления БПЛА, отвечающая характеристикам радиолинии АЗН-В режима 4. Показана возможность использования данной радиолинии для управления рассматриваемым классом БПЛА.

УПРАВЛЕНИЕ. РАДИОЛИНИИ. БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ. ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.

Бендерская Е.Н., Жукова С.В. АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНОСТИ В ХАОТИЧЕСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ФРАГМЕНТАРНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ.

Рассмотрено применение рекуррентных и кросс-рекуррентных диаграмм для исследования фрактальных свойств фрагментарной синхронизации в хаотической нейронной сети. Обнаружен эффект самоподобия траекторий макроскопического аттрактора многомерной нелинейной системы с хаосом.

ХАОТИЧЕСКАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ. ФРАКТАЛЬНОСТЬ. ФРАГМЕНТАРНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ. РЕКУРРЕНТНЫЕ ДИАГРАММЫ.

Ветров Ю.В., Завьялов С.В. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИЕМА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИМВОЛОВ, ВСТРОЕННЫХ В ЦИФРОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ.

Рассмотрены вопросы повышения эффективности алгоритмов сокрытия данных в цифровых изображениях при реализации защищенной системы передачи информации.

СТЕГАНОГРАФИЯ. ДИСКРЕТНОЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ. ПСЕВДО-СЛУЧАЙНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ.

Мельников П.Н., Терпигорев М.А., Симонов С.Б. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА, ПОСТРОЕННОГО НА ДИНАМИЧЕСКОМ ЗВЕНЕ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОРЯДКА.

Предложена структура многокаскадного фильтра, построенного на динамических звеньях произвольного порядка для решения задачи восстановления полиномиального сигнала, подверженного высокочастотным искажениям.

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ. ФИЛЬТР. ВОССТАНОВЛЕНИЕ. ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ СИГНАЛ.

Купцов В.Д., Валюхов В.П. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ.

Предложен метод эквивалентных канонических шумовых схем для расчета чувствительности фотоприемных устройств волоконно-оптических систем связи. Рассмотренная методика подтверждена экспериментально на серийно выпускаемых образцах фотоприемных устройств.

ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ. КОЭФФИЦИЕНТ ШУМА. ТРАНСИМПЕДАНС.

Смольникова М.А. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА С ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ.

Рассмотрены вопросы обоснования структуры зоны внимания и зоны предупреждения бортовых систем раннего предупреждения близости земли.

ЗОНА ВНИМАНИЯ. ЗОНА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ. БОРТОВЫЕ СИСТЕМЫ. БАЗА ДАННЫХ РЕЛЬЕФА. РАБОЧЕЕ ПРОСТРАНСТВО.

Гузаиров М.Б., Костюкова А.П. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ РИСКАМИ СЛОЖНОСВЯЗНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ.

Рассмотрен новый подход к разработке структурной схемы управления рисками эксплуатации индукционной тигельной печи (ИТП) и оптимизации этой схемы по параметрам диагностического устройства. Рассмотрена разработка структурной схемы динамической модели поведения ИТП, выполнен расчет параметров процесса функционирования ИТП, проведен анализ параметров функционирования ИТП с целью определения эффективности различных систем диагностирования.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ РИСК. СЛОЖНОСВЯЗНЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ.

Ростов Н.В. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.

Изложена методика многокритериальной оптимизации, проводимой последовательно (поэтапно) методами скалярной оптимизации по интегральному и аддитивному критериям на начальных этапах и зондированием динамических показателей нелинейной САУ на заключительном этапе по векторным критериям. Приведен пример настройки цифрового ПИД-регулятора в нелинейной системе стабилизации.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. РЕГУЛЯТОРЫ. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ, АДДИТИВНЫЙ И ВЕКТОРНЫЙ КРИТЕРИИ. ЗОНДИРОВАНИЕ. ПАРЕТО-РЕШЕНИЯ.

Салангин А.А. ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ СОЗДАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ.

Предложен класс директивных распределений для задач разработки проектов создания новой техники при ограниченном и неограниченном времени их реализации в условиях нереализуемости или неэффективности вариационного подхода.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ. СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ДИРЕКТИВНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.

Токарев Ю.П., Макеев М.И., Юмаев К.Р. ПОСТРОЕНИЕ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ КОМПОНЕНТ.

Предложен способ построения наземного пункта управления беспилотными летательными аппаратами с использованием стандартных компонент, входящих в состав современной АС УВД. Рассмотрена структура НПУ БПЛА. Показана возможность и целесообразность использования компонент АС УВД в составе НПУ БПЛА.

УПРАВЛЕНИЕ. РАДИОЛИНИИ. БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ. ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.

Тарасов С.Д. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕФЕРИРОВАНИЯ.

Проведен глубокий анализ существующих подходов к проблеме автоматического реферирования текста. Подробно рассмотрены различные методы монографического и сводного (обзорного) реферирования, показано историческое развитие данного направления научных исследований в контексте проблемы обработки текста на естественном языке при помощи ЭВМ. Произведена подробная классификация существующих подходов, сформулированы их основные преимущества и недостатки. Проанализированы, сопоставлены и выявлены наиболее важные и перспективные направления развития современных исследований в области автоматического реферирования. Сделаны выводы о текущем состоянии научных исследований в данной области.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕФЕРИРОВАНИЕ. АВТОМАТИЧЕСКОЕ СВОДНОЕ РЕФЕРИРОВАНИЕ. РЕФЕРАТ. СВОДНЫЙ РЕФЕРАТ. МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕФЕРИРОВАНИЯ.

Фирсов А.Н. МЕТОД МОМЕНТОВ В ТЕОРИИ ОБОБЩЕННЫХ ФУНКЦИЙ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ.

Построено «моментное» представление классов обобщенных функций, заданных на основных пространствах целых функций многих вещественных переменных. Доказаны теоремы, описывающие основные свойства таких классов. Показано, что полученные результаты могут быть положены в основу новых методов решения некоторых важных прикладных задач математической физики.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ОПЕРАТОРЫ. ЛИНЕЙНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЫ. МЕТОД МОМЕНТОВ. ОБОБЩЕННЫЕ ФУНКЦИИ. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ.

Бискуб К.Н., Писарев А.И. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ПЛАВИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ.

Разработана система управления процессом очистки технологических газов электропечей. В системе предусмотрен адаптивный регулятор, использующий модель процесса для выработки управляющих сигналов. Адекватность модели подтверждена экспериментальными данными. Использование разработанной системы позволяет значительно уменьшить выбросы неочищенного технологического газа в атмосферу.

ПЛАВИЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОПЕЧЬ. ОТХОДЯЩИЙ ГАЗ. СКРУББЕР-ОХЛАДИТЕЛЬ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.

Соловьев В.И., Ильина Н.А. РАВНОВЕСИЕ ШТАКЕЛЬБЕРГА В МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ АППАРАТНОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.

Рассмотрено использование стратегий ценового лидерства участниками смешанной олигополии – производителями аппаратного обеспечения Intel и AMD и разработчиками коммерческого программного обеспечения Windows и некоммерческого программного обеспечения Linux. Получены результаты, отличающиеся от своих аналогов для рынков традиционных товаров, что объясняется особенностями программного обеспечения как товара.

СМЕШАННАЯ ОЛИГОПОЛИЯ. РАВНОВЕСИЕ КУРНО. РАВНОВЕСИЕ ШТАКЕЛЬБЕРГА. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ. СВОБОДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ.

Матвеев А.В., Иванов М.В., Шевченко А.Б. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ АЭС.

Разработана аналитическая модель системы управления пожарной безопасностью на объектах ядерной энергетики. Проведенные исследования направлены на предупреждение возникновения пожаров на АЭС. Разработан метод оценивания эффективности управленческих решений по предупреждению возникновения пожаров.

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. АЭС. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. УПРАВЛЕНИЕ. ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ПОЖАРОВ.

Атрощенко В.А., Шевцов Ю.Д., Дьяченко Р.А., Брагин Н.А. К ВОПРОСУ ДИАГНОСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ДЭС ПО ПАРАМЕТРАМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛЯНОГО ОЧИСТИТЕЛЯ.

Рассмотрены вопросы диагностики двигателя по параметрам частотных характеристик центрифуги. Изложена основная методика получения математической модели очистителя и определены основные зависимости изменения параметров его частотных характеристик в зависимости от изменения технического состояния двигателя ДЭС.

МОДЕЛЬ. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ФИЛЬТР. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ.

Блохин Ю.В. МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ.

Рассмотрена модель системы технического зрения для дистанционно управляемого объекта. Предложена обобщенная структура обработки видеоинформации с минимальной задержкой.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ. ВИДЕОИНФОРМАЦИЯ. ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ.

Букка Е.С., Кочкаров Р.А. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА ВНУТРЕННЕГО ЦЕНТРА ПРЕДФРАКТАЛЬНОГО ГРАФА.

Статья посвящена параллельному алгоритму поиска внутреннего центра предфрактального графа, смежность старых ребер которого сохраняется. Алгоритм построен для PRAM (Parallel Random Access Machine) – модели параллельной вычислительной системы.

ЗАТРАВКА. ПРЕДФРАКТАЛЬНЫЙ ГРАФ. ВНУТРЕННИЙ ЦЕНТР ГРАФА. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ.

Рубежная И.Н., Кочкаров Р.А. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСКРАСКИ ПРЕДФРАКТАЛЬНОГО ГРАФА, ПОРОЖДЕННОГО МНОЖЕСТВОМ ЗАТРАВОК.

Рассмотрен параллельный алгоритм вершинной раскраски предфрактального графа, порожденного множеством затравок, смежность старых ребер которого сохраняется.

ПРЕДФРАКТАЛЬНЫЙ ГРАФ. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ. ЗАТРАВКА. РАСКРАСКА ГРАФА. СМЕЖНОСТЬ РЕБЕР ГРАФА.

Аникин И.В. ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАРУШИТЕЛЕЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ.

Проведены экспериментальные исследования ряда методов интеллектуального анализа данных и осуществлен их сравнительный анализ для решения задачи обнаружения вторжений в компьютерные сети, основанной на выявлении аномалий. Предлагается технология интеллектуального анализа данных для обнаружения событий, связанных с получением нарушителя доступа к системе под учетной записью другого пользователя.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ. ОБНАРУЖЕНИЕ ВТОРЖЕНИЙ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ. ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ.

Габдрахманов А.А., Габдрахманова Н.Т. НЕЙРОСЕТЕВАЯ ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ САМОПОДОБНОГО ТРАФИКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С ПАКЕТНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ДАННЫХ.

Исследованы статистические характеристики интенсивностей трафика сети Gigabit Ethetnet. Доказана самоподобная природа реального сетевого трафика. Изучены возможности использования для идентификации трафика сети Gigabit Ethetnet нейросетевых технологий. Описан алгоритм построения модели, приведен анализ адекватности построенной модели. С помощью построенной модели получены прогнозные значения итенсивностей трафика на несколько шагов вперед.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА. ТЕОРЕМА ТАКЕНСА. НЕЙРОННЫЕ СЕТИ. МНОГОСЛОЙНЫЙ ПЕРСЕПТРОН. ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ. ТРАФИК СЕТИ GIGABIT ETHERNET. САМОПОДОБИЕ.

Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА.

Изучена методика коррекции решения дифференциальных уравнений, описывающих линейные звенья второго порядка. Методика основана на переходе от передаточной функции к нормальной форме Коши по методу совместного интегрирования с последующим применением выражений коррекции, описывающих погрешность разомкнутого интегратора.

Приведены скорректированные компьютерные модели уравнений, реализованные в инструментальной системе MATLAB/ Simulink.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ. СОВМЕСТНОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ. МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПАКЕТЫ.

Прокопенко А.С., Тормасов А.Г. АКСИОМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЕРИФИКАЦИИ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ СОСТОЯНИЙ В МЕТОДЕ RGSEP.

Предложено расширение аксиоматического метода верификации RGSep. Описаны обоснованно внесенные изменения в модель состояний этого метода. Записано новое правило сокрытия ресурсов, внесены необходимые правки в другие правила RGSep логики.

МУЛЬТИПРОЦЕССОРНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ. ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММ. ЛОГИКА ХОАРА.

Жуков К.Г., Бутусов Д.Н. КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ.

Рассмотрена методика коррекции решения классического дифференциального уравнения гармонического осциллятора. Методика основана на применении аналитических выражений, описывающих погрешность вычисления интеграла методом последовательного интегрирования.

Приведены скорректированные импульсные и цифровые модели уравнения, реализованные в инструментальной системе MATLAB/ Simulink с начальными условиями и заданным входным воздействием в виде ступенчатой функции.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ИМПУЛЬСНАЯ СИСТЕМА. ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ. МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПАКЕТЫ.

Купцов В.Д., Кянджециан Р.А., Кателевский В.Я., Валюхов В.П. ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ.

Изложены основы метода молекулярных ядер конденсации (МоЯК), приведена преимущества метода в сравнении с другими типами газоанализаторов, представлены структурная схема и конструкция разработанного газоанализатора. На разработанном газоанализаторе достигнута уникальная чувствительность к детектируемым веществам, что открывает возможности их использования в специальных применениях.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЯДРА КОНДЕНСАЦИИ. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА. СВЕТОРАССЕЯНИЕ АЭРОЗОЛЯ. МЕТАЛЛО-ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ. НЕФЕЛОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД. ИНТЕГРАТОР ФОТОТОКА.

Чернышев А.Б., Антонов В.Ф., Шураков Д.Л. СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССЕ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ.

Рассмотрена нелинейная система управления объектом с распределенными параметрами. Предложена методика определения параметров регулятора прямого действия. Представлена реализация методики на практическом примере.

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ. РЕГУЛЯТОР. УСТОЙЧИВОСТЬ.

Константинов Ю.А., Крюков И.И., Поскребышев М.М., Харламова Н.А. ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ ЗАГОТОВКИ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ В ХОДЕ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО ПАРОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ.

Разработана телевизионная измерительная система для определения размеров нагретой заготовки оптического волокна. Система использовалась в ходе реализации процесса химического парофазного осаждения (MCVD). Экспериментальная определенная погрешность системы – примерно 1 %.

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО. ХИМИЧЕСКОЕ ПАРОФАЗНОЕ ОСАЖДЕНИЕ. ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА.

Сороцкий В.А. АКТИВИЗАЦИЯ ПОЗНАВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОБУЧАЮЩИХСЯ СРЕДСТВАМИ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ УНИВЕРСИТЕТА.

Рассмотрены особенности переноса в электронное обучение форм и методов активизации познавательной деятельности, сформировавшихся в классической педагогике.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОБУЧЕНИЕ. АКТИВИЗАЦИЯ. ОБУЧАЮЩИЙСЯ. ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СРЕДА.

Ветринский Ю.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ В ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ШКОЛЕ.

Обобщен опыт использования программной системы управления обучением Moodle в практике преподавания в старших классах общеобразовательной школы. Предложена концепция дистанционного тестирования учащихся во внеклассное время, рассмотрены способы обеспечения самостоятельности выполнения ими тестовых заданий. Показана эффективность предложенного подхода к электронному обучению.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОБУЧЕНИЕ. ПЕРСОНАЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ. ТЕСТИРОВАНИЕ.

Моисеев В.Б., Зубков А.Ф., Деркаченко В.Н. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСПЕВАЕМОСТИ СТУДЕНТОВ ПО ОБЩЕПРОФЕССИОНАЛЬНЫМ И СПЕЦИАЛЬНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ.

Профессиональная подготовка студентов может быть повышена за счет применения математических моделей и получения на их основе прогнозных оценок успеваемости по дисциплинам специальности. Предложена методика прогнозирования успеваемости студентов по общепрофессиональным и специальным дисциплинам. Построены модели для прогнозирования успеваемости студентов по дисциплинам с целью принятия управленческих решений в ходе учебного процесса.

СИСТЕМА И КАЧЕСТВО ОБРАЗОВАНИЯ. ОЦЕНКА УЧЕБНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ.

ANNOTATION

KEYWORDS

Tokarev Y.P. APPLICATION DATA LINK TO CONTROL UNMANNED AERIAL VEHICLES.

The article deals with the problem of organization of command radio to control the UAV. Analyzes the characteristics of radio ADS-B Mode 4. Considers possible control schemes UAV. Chosen control scheme corresponding to the characteristics of the UAV radio ADS-B Mode 4. Demonstrates the use of the radio to control the above class of UAV.

MANAGEMENT. RADIO LINES. THE UNMANNED AERIAL VEHICLES. THE DATA TRANSMISSION LINE.

Benderskaya E.N., Zhukova S.V. FRACTAL ANALYSIS OF FRAGMENTARY SYNCHRONIZATION PRODUCED BY CHAOTIC NEURAL NETWORK.

Recurrent and cross recurrent diagrams are applied to analyze fractal structure of fragmentary synchronized outputs of chaotic neural network. Self similarity of oscillatory cluster dynamics is discovered.

CHAOTIC NEURAL NETWORK. FRACTAL. FRAGMENTARY SYNCHRONIZATION. RECURRENCE PLOT.

Vetrov U.V., Zavyalov S.V. NOISE STABILITY OF RECEPTION OF THE INFORMATION SYMBOLS WHICH HAVE BEEN BUILT IN DIGITAL IMAGES.

The problem of increasing efficiency of algorithms for data hiding into digital images in protected system for information transmission have been considered.

STEGANOGRAPHY. DISCRETE WAVELET TRANSFORM. PSEUDO-RANDOM SEQUENCE.

Melnikov P.N., Terpigorev M.A., Simonov S.B. RESTORING POLYNOMIAL SIGNAL USING FILTER BUILT ON THE DYNAMIC ELEMENT OF ARBITRARY ORDER.

The paper considers multistage filter structure, built on the dynamic elements of arbitrary order to solve the problem of restoring a polynomial signal, subjected to high-frequency disturbances.

SIGNAL PROCESSING. FILTER. RESTORING. POLYNOMIAL SIGNAL.

Kuptsov V.D., Valjuchov V.P. SENSITIVITY OF PHOTORECEPTION DEVICES FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES.

The method of equivalent canonical noise schemes for photoreceiver sensitivity design of fiber optic systems is considered. The proposal method is confirmed on photoreceiver serial devices.

PHOTORECEIVER. INTEGRAL SENSITIVITY. NOISE FACTOR. TRANSIMPEDANCE.

Smolnikova M.A. STRUCTURE OF PREVENTING COLLISION OF AIRCRAFT WITH THE EARTH'S SURFACE.

The article deals with the study zone structure and focus areas to prevent airborne early warning systems, ground proximity. The author expresses his gratitude to A.I. Krasov for his assistance in preparing this article.

FOCUS AREA. WARNING AREA. THE ONBOARD SYSTEMS. DATABASE OF RELIEF. WORKSPACE.

Guzairov M.B., Kostyukova A.P. OPERATING RISK CONTROL SYSTEM OF MULTILINKED HEATING OBJECTS.

The article deals with the new way of induction crucible furnace exploitation risk control structure scheme development and optimization by parameters of diagnostic device. Induction furnace behavior dynamic model structure scheme is concerned, induction furnace functioning process parameters are computed and analyzed in the aim of different diagnostic devices efficiency definition.

CONTROL SYSTEM. EXPLOITATION RISK. MULTILINKED HEATING OBJECT.

Rostov N.V. SEQUENTIAL MULTIOBJECTIVE PARAMETRICAL OPTIMIZATION OF CONTROLLERS FOR NONLINEAR CONTROL SYSTEMS.

The technique of sequential (step-by-step) multiobjective parametrical optimization of controllers for nonlinear control systems are presented, which uses scalar optimization with integral and additive criteria on initial stages and sounding dynamic performances of a system on final stage with vector criteria. The example is given to Pareto-optimal tuning of digital PID-controller parameters for a nonlinear stabilization system.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS. CONTROLLERS. MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION. INTEGRAL, ADDITIVE AND VECTOR CRITERIA. SOUNDING. PARETO-SOLUTIONS.

Salangin A.A. ABOUT SOME APPROACH TO THE PROBLEM SOLUTION DEVELOPMENT AND REALIZATION OF PROJECTS OF CREATION NEW TECHNOLOGY.

The class of directive distribution for the investigation projects in order to create new equipment in the limited and unlimited time of realization in conditions nonrealizability or inefficiency of variational approach has been offered.

SYSTEM ANALYSIS. SYSTEM ENGINEERING. DIRECTIVE DISTRIBUTION.

Tokarev Y.P., Makeyev, M.I., Yumaev K.R. CONSTRUCTION SECTOR MANAGEMENT UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH USE OF STANDARD COMPONENTS.

The article proposes a method for constructing the ground control of unmanned aerial vehicles using standard components that make up modern ATC. Consider the structure of NPC drones. Demonstrates the possibility and feasibility of using components ATC in the NPC drones.

MANAGEMENT. RADIO LINES. THE UNMANNED AERIAL VEHICLES. THE DATA TRANSMISSION LINE.

Tarasov S.D. MODERN METHODS OF AUTOMATIC TEXT SUMMARIZATION.

An in-depth analysis of existing approaches to the problem of automatic summarization of text is described. Discussed in detail various methods of monographs and summary (review) abstracting, shows the historical development of this area of research in the context of natural language processing by computers are considered. Made a detailed classification of existing approaches, formulated their main advantages and disadvantages is described. We analyzed, compared and identified the most important and promising areas of modern research in the field of automatic summarization. Conclusions about the current state of research in this area are drawn.

TEXT SUMMARIZATION. MULTIDOCUMENT SUMMARIZATION. AUTOMATIC CREATION OF ABSTRACTS. SUMMARY. METHODS OF TEXT SUMMARIZATION.

Firsov A.N. MOMENTS METHOD IN GENERALIZED FUNCTIONS THEORY AND ITS APPLICATIONS TO SYSTEM ANALYSIS AND CONTROL. FOUNDATION OF THE THEORY.

«Moments» representations of some classes of generalized functions are given. Theorems, which are producing evidence of main properties of such classes, are presented. The results of the analysis may be taken as a principle of some new techniques of solutions of certain classes of problems of mathematical physics.

DIFFERENTIAL OPERATORS. LINEAR FUNCTIONALS. METHOD OF MOMENTS. GENERALIZED FUNCTIONS. SYSTEM ANALYSIS.

Biskub K.N., Pisarev A.I. MATHEMATICAL MODEL OF COOLING OF TECHNOLOGICAL GASES OF MELTING ELECTRIC FURNACES.

This article deals with the new electric furnace's gas cooling mathematical model for example Nadezhidinskiy Metallurgical Plant in Meltshop № 1. The model adequacy is proved by experimental data. The given model use allows to decrease unfiltered gas release into atmosphere.

SMELTING FURNACE. EXHAUST GAS. SCRUBBER-COOLER. MATHEMATICAL MODEL.

Soloviev V.I., Iliina N.A. STACKELBERG EQUILIBRIUM IN A MODEL OF HARDWARE AND SOFTWARE MANUFACTURERS' INTERACTION.

The paper considers the use of price leadership strategies by hardware vendors, Intel and AMD, Windows for-profit software, and Linux non-for-profit software developers as the participants of mixed oligopoly. The obtained results differ from their analogs for the traditional goods markets. This is explained by the peculiarities of software as a commodity.

MIXED OLIGOPOLY. COURNOT EQUILIBRIUM. STACKELBERG EQUILIBRIUM. SOFTWARE. HARDWARE. FREE SOFTWARE.

Matveev A.V, Ivanov M.V, Shevchenko A.B. ANALYTICAL MODEL OF A CONTROL SYSTEM OF FIRE SAFETY ON THE ATOMIC POWER STATIONS.

The analytical model of a control system by fire safety on objects of nuclear power is developed in this article. The carried out researches are directed on the fires prevention on the atomic power station. The estimation method of efficiency for administrative decisions under the fire prevention is developed.

FIRE SAFETY. ATOMIC POWER STATION. ANALYTICAL MODEL. CONTROL. FIRE PREVENTION.

Atroshchenko V.A, Shevtsov J.D., Djachenko R.A., Bragin N.A. TO THE QUESTION OF DIAGNOSTICS OF ENGINE DES ON PARAMETERS OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF THE OIL CLEANER.

In article questions of diagnostics of the engine on parameters of frequency characteristics of a centrifuge are considered. Are stated the basic technique of reception of mathematical model of a cleaner and the basic dependences of change of parameters of its frequency characteristics depending on change of a technical condition of engine DES are defined.

MODEL. TRANSFER FUNCTION THE FREQUENCY CHARACTERISTICS. FILTER. ELECTRICAL CHAIN.

Blokhin Y.V. MODEL of SYSTEM of TECHNICAL SIGHT REMOTE CONTROL MOBILE OBJECTS.

In article the model of system of technical sight for remote control object is considered. The generalized structure of processing of video information with the minimum delay is offered.

TECHNICAL SIGHT. VIDEO. REMOTE CONTROL OBJECTS.

Bukka E.S., Kochkarov R.A. PARALLEL ALGORITHM OF SEARCHING PREFRACTAL GRAPH'S INTERNAL CENTRE.

This article is devoted parallel algorithm of search of the internal centre prefractal graph, adjacency of old edges which is remained. This algorithm is construction for Parallel Random Access Machine.

SEEDING AGENT. PREFRACTAL GRAPH. INTERNAL CENTRE GRAPH. PARALLEL ALGORITHM.

Rubegnaya I.N., Kochkarov R.A. THE PARALLEL ALGORITHM OF COLORING TOPS OF PREFRACTAL GRAPH, WHICH WAS CREATION OF MANY FORMS.

This article is devoted to the parallel algorithm of coloring tops of prefractal graph. Old edges of prefractal graph are adjoining.

PREFRACTAL GRAPH, PARALLEL ALGORITHM, FORM, COLORING OF GRAPH, ADJOINING EDGES.

Anikin I.V. TECHNOLOGY OF INTELLIGENT DATA ANALYSIS FOR DETECTING INSIDERS IN COMPUTER SYSTEMS.

In this paper we realize experiments and comparative analysis of some data mining methods for intrusion detection in computer networks based on anomaly detection. Suggested data mining technology for events detection when insider obtain access to system with another account.

COMPUTER NETWORK. INTRUSION DETECTION. DATA MINING. ANOMALY DETECTION.

Gabdrakhmanov A.A., Gabdrakhmanova N.T. A MODELLING OF INTENSITY OF SELF-SIMILARY TRAFFIC OF TELECOMMUNICATION NETWORK WITH PACKET TRANSMISSION OF DATA.

In this paper the intensity of self-similar traffic of Gigabit Ethernet was researched. For this we use the measurement of real network. The research proves the self- similar nature of real traffic. Opportunity to use neural network to indicate the traffic of Gigabit Ethernet was shown. Our findings are, that our mathematical model is able to predict the intensity of traffic for some steps to forth.

NONLINEAR DYNAMICS. TAKENS THEOREM. NEURAL NETWORKS. MULTI-LAYER PERCEPTRON. TIME ROWS. SELF-SIMILAR TRAFFIC OF GIGABIT ETHERNET.

Zhukov K.G., Butusov D.N. CORRECTION OF THE ERROR OF THE DECISION OF THE DIFFERENTIAL EQUATIONS OF THE SECOND ORDER.

In article the technique of correction of the decision of the differential equations describing linear links of the second order is considered. The technique is based on transition from transfer function to a normal form of Koshi on a method of joint integration with the subsequent application of expressions of the correction describing an error of the opened integrator. The corrected computer models of the equations realized in tool system MATLAB/Simulink are resulted.

DYNAMIC SYSTEM. TRANSFER FUNCTION. JOINT INTEGRATION. NUMERICAL METHOD OF INTEGRATION. THE METHODICAL ERROR. MATHEMATICAL MODEL. COMPUTER MODEL. TOOL PACKAGES.

Prokopenko A.S., Tormasov A.G. VERIFICATION METHOD BASED ON DECOMPOSITION OF STATES IN RELY-GUARANTEE/SEP LOGIC.

We propose new method in this paper for local RGSep reasoning. Our method support a hiding rule for hiding the local sharing of resources from the outside world. These rules allow us to write local rely/guarantee conditions and improve the reusability of verified program modules.

MULTIPROCESSOR PROGRAMMING. VERIFICATION. HOARE LOGIC. RELY/GUARANTEE. RGSEP.

Zhukov K.G., Butusov D.N. THE METHOD OF CORRECTION OF THE CLASSICAL SOLUTIONS OF THE DIFFERENTIAL EQUATION OF HARMONIC OSCILLATOR.

The technique is based on of the application of analytical expressions describing the error in the calculation of the integral method of successive integration.

Shown corrected pulse and digital models of the equation, implemented in the instrumental system MATLAB / Simulink with the initial conditions and given an input action in the form of a step function.

DYNAMICAL SYSTEMS. IMPULSE SYSTEM. DIGITAL SYSTEM. NUMERICAL METHODS OF INTEGRATION. MODELING ERRORS. TRANSFER FUNCTION. INSTRUMENTAL ERROR. MATHEMATICAL MODELS. COMPUTER MODEL. TOOLKIT.

Kuptsov V.D., Kjandzhetsian R.A., Katelevski V.J., Valjuchov V.P. GAS ANALYZERS BASED ON MOLECULAR CONDENSATION NUCLEI EFFECT.

The fundamentals of molecular condensation nuclei method, the advantages comparison with other gas analyzers types, structure chart and design of the developed gas analyzer are described. Unique sensitivity to detect substances is achieved on the developed gas analyzer, what gives possibilities of using in special applications.

MOLECULAR CONDENSATION NUCLEI. CONDENSATION DEVICE. LIGHT SCATTERING OF AEROSOL. METAL-ORGANIC COMPOUNDS. NEPHELOMETRIC METHOD. PHOTOCURRENT INTEGRATOR.

Chernyshev A.B., Antonov V.F., Schurakov D.L. SYSTEM OF STABILISATION OF TEMPERATURE FIELD IN THE HEAT WHEN THE CONTACT WELDING.

Considered in nonlinear system with distributed management object. Technique of determination of parameters of the regulator directly. Provides implementation methodology for case study.

TEMPERATURE FIELD. MATHEMATICAL MODEL. NON-LINEAR SYSTEM. REGULATOR. STABILITY.

Konstantinov J.A., Kryukov I.I., Poskrebyshev M.M., Harlamova N.A. TELEVISIONSYSTEM OF MEASUREMENT OF THE SIZES OF PREPARATION OF FIBER OPTICAL PATHS DURING PROCESS OF CHEMICAL VAPOR-PHASE SEDIMENTATION.

The TV system and software for measuring of dimensions of the heated optical fiber preform has been developed. The system has been applied to modified chemical vapor deposition (MCVD) preform fabrication process.

OPTICAL FIBER. MCVD PROCESS, TV MEASURING SYSTEM.

Sorotsky V.A. INTENSIFICATION OF LEARNERS COGNITIVE FUNCTION USING FACILITIES OF UNIVERSITY INFORMATIONAL AND EDUCATIONAL ENVIRONMENT.

The paper covers the features of transferring cognitive function activization forms and methods, created in the classical pedagogy, in e-learning

E-LEARNING. TRAINING. INTENSIFICATION. LEARNER. INFORMATIONAL AND EDUCATIONAL ENVIRONMENT.

Vetrinsky Y.A. USE OF E-LEARNING MEANS AT HIGH SCHOOL .

In article the experience of use of a learning management system Moodle in practice of teaching in the senior classes of the high school is generalized. The concept of remote testing of pupils during out-of-class time is offered, ways to provide the independent performance of the test tasks by them are considered. Efficiency of the offered approach to e-learning is shown.

E-LEARNING. PERSONAL COMPUTER. LEARNING MANAGEMENT SYSTEM. TESTING.

Moiseev V.B., Zubkov A.F., Derkachenko V.N. FORECASTING OF PROGRESS OF STUDENTS ON THE GENERAL PROFESSIONAL AND SPECIAL DISCIPLINES ON A BASIS REGRESS MODELS.

The Training of students may be increased by using the mathematical models and by receping on their base forecasting judging's of progresses over discipline of the profession.

Method of the forecasting to progresses of student's over common and special discipline is offered.

Models for forecasting the progresses of students over discipline for the reason taking the management decisions in the course of scholastic process are built.

SYSTEM AND QUALITY OF FORMATION. ESTIMATION OF EDUCATIONAL ACHIEVEMENTS. REGRESS THE ANALYSIS. MODEL CONSTRUCTION. FORECASTING.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 6 (113) 2010

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
М.О. Давыденко – 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 27.12.2010. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,85. Уч.-изд. л. 21,85. 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.