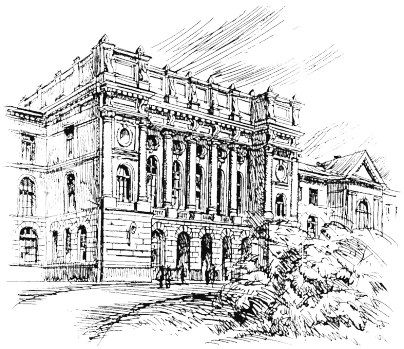
2(97)/2010



Научно-технические ведомости СПбГПУ

ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Федеральное агентство по образованию

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;
Терещенко Г.Ф., академик 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 четырех сериях:
Наука и образование;
Физико-математические науки;
Экономические науки;
Информатика, телекоммуникации, управление.

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

Жгун А.А., Жгун Т.В., Осадчий А.И. *Исследование синхронизации приёма и передачи информации в стеганографической системе.* 7

Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

Сороцкий В.А., Уткин М.А. *Влияние обратного тока восстановления тиристорных ключей на энергетические характеристики многоячейковых генераторов.* 11

Ахметов Д.Б., Коротков А.С. *Приёмо-передающее устройство считывания информации радиочастотных меток для интегрального узла беспроводной сенсорной сети* 17

Пономарев О.П., Смирнов Н.Н., Клишин С.М. *Гибридные зеркальные антенны на основе зеркал с круговым профилем для многофункциональных радиолокационных станций* 23

Системный анализ и управление

Веремчук А.С., Волков В.Ф. *Оптимизация управления катастрофоустойчивостью информационно-управляющих систем* 31

Карпухин А.И., Осипов Е.В. *О системном подходе к мониторингу информационных комплексов федеральных органов исполнительной власти* 35

Заикина Н.В., Плешивцева Ю.Э. *Оптимальное управление процессом индукционного нагрева металла с учётом ограничений* 39

Русинов И.А., Барышникова Н.Ю. *Формализация процессов переработки контейнерных грузов* 48

Руденко Н.А., Комаров М.П. *Ключевые сквозные процессы в организации и методика их выявления* 53

Крошилин А.В., Бабкин А.В., Крошилина С.В. *Особенности построения систем поддержки принятия решений на основе нечёткой логики* 58

Арпабеков М.И. *Адаптивно-программное управление роботизированного комплекса* 63

Кузьменко В.А., Ванина Е.А. *Применение теории клеточных автоматов к фазовым переходам в условиях реакторного облучения* 70

Вычислительные машины и программное обеспечение

Шилов М.М., Воробьёва О.С., Кракау Т.К. *Применение систем технического зрения и средств нечётких вычислений в интеллектуальных устройствах автоматики и робототехники* 75

Шульмин А.С. *Формализованное описание процесса в операционной системе и его применение при обнаружении скрытых процессов* 79

Бубнов В.П., Тырва А.В., Хомоненко А.Д. *Обоснование стратегии отладки программ на основе нестационарной модели надёжности* 85

Спорягин К.В. *Программный комплекс настройки типовых регуляторов для многосвязных объектов управления произвольной размерности* 92

Садаков Д.С., Сараджишвили С.Э. *Рекомендательный протокол децентрализованной файлообменной сети* 100

Ивановский Р.И. *Обработка экспериментальных данных энергетических объектов как начальный этап их моделирования* 106

Новоселов Ю.В. *Разработка и реализация программной среды создания динамических когнитивных образов* 112

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Припадчев А.Д. *Математическое моделирование структуры парка воздушных судов на основе симплекс-метода* 117

Корнейчук Б.В., Максимова Т.Г. *Стохастические модели переходных процессов марковского типа* 120

Носова О.В. *Определение размера страхового тарифа для предприятия АПК с помощью имитационной модели* 126

Пашковский А.В. *Метод стандартных элементов в расчёте магнитного поля линейного двигателя с постоянными магнитами* 130

Садаков Д.С., Сараджишвили С.Э. *Метод сбора информации о ресурсах для системы информационного поиска, ориентированной на ЛВС* 136

Тарасов С.Д. *Метод тематического связанного ранжирования для задач реферирования сообщений* 140

Шоланов К.С., Арпабеков М.И. *Моделирование горного автоматического манипулятора* 145

Кулешов И.А., Дуплинский М.А., Малахов Ю.А. *Анализ методов моделирования сетей связи* 148

Игнатова Е.И. *Задачи математического моделирования и исследования робототехнических систем* 152

Игнатова Е.И., Ростов Н.В. *Кинематические задачи в математическом моделировании роботов* 159

Червяков Н.И., Бабенко М.Г. *Линейные рекуррентные последовательности на эллиптической кривой* 164

Приборы, информационно-измерительные системы

Черников А.В., Пенский О.Г. *Разработка системы обеспечения влажности в жилом здании* 167

Полянский А.В., Львов А.С., Ларичев А.В. *Многопараметрический контроль качества доменного кокса на базе приборов с нейросетевой организацией* 172

Электроника, технологии производства материалов электронной техники

Чеканов В.С., Рахманина Ю.А. *Математическое моделирование образования слоя частиц на электродах при электроочистке* 177

Нагорный В.С., Машков И.А. *Численное моделирование турбулизации струи при ЭГД управлении струями в автоматических системах* 182

Сведения об авторах 187

Аннотации 191

Contents

Problems of transfer and information processing

Zhgun A.A., Zhgun T.V., Osadchy A.I. *Research of synchronisation of reception and information transfer in steganographic system* 7

Radio engineering, aerials, SHF devices

Sorotsky V.A., Utkin M.A. *An influence of reverce recovery thyristors current on multicell generators power characteristics* 11

Akhmetov D.B., Korotkov A.S. *Transceiver node of wireless sensor network with integrated RFID reader* 17

Ponomarev O.P., Smirnov N.N., Klishin S.M. *Hibrid antennas based on circular reflectors for the multifunction radars* 23

The system analysis and management

Veremchuk A.S., Volkov V.F. *Optimization of disaster tolerance information systems* 31

Karpuhin A. I., Osipov E. V. *About the system approach to monitoring of information complexes of federal enforcement authorities.* 35

Zaikina N.V., Pleshivtseva Yu.E. *Optimal control of induction heating process with consideration of technological constraints* 39

Rusinov I.A., Baryshnikova N.Y. *Formalization of the processing of container cargo* 48

Rudenko N.A., Komarov M.P. *Key cross-cutting processes in organization and methods of their detection* 53

Kroshilin A.V., Babkin A.V., Kroshilina S.V. *The particularities of the building decision support system on base of the fuzzy logic* 58

Arpabekov M.I. *Adaptive- program control of the robotorised complex* 63

Kuzmenko V.A., Vanina E.A. *Application of the theory of cellular automata to the phase transition under reactor irradiation* 70

Computers and the software

Shilov M.M., Vorobyova O.S., Krakau T.K. *The machine vision systems and fuzzy logic approach for intellectual systems of automation and robotics* 75

Shulmin A.S. *Formalizes description of process in the operating system and its usage while revealing hidden processes* 79

Bubnov V.P., Tyrva A.V., Khomonenko A.D. *The reasoning of testing strategy on basis of nonstationary software quality model* 85

Sporyagin K.V. *Software for typical controller adjustment for arbitrary dimension multivariable objects* 92

Sadakov D.S., Saradgishvili S.E. *Decentralized recommendation protocol for peer-to-peer networks* 100

Ivanovsky R.I. *Processing of experimental data power objects as the initial stage of their modeling* 106

Novoselov Y. V. *Developing and application of computer program studio for dynamic cognitive images creation* 112

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

Pripadchev A.D. *Mathematical modeling of flying stock structure on the basis of simplex–method* 117

Korneychuk B.V., Maximova T.G. *The stochastic Markov models of transition processes* 120

Nosova O.V. *Definition of the size of the insurance tariff for the enterprise of agriculture by means of imitating model* 126

Pashkovsky A.V. *Standard elements method in computing of the magnetic field of the linear engine with constant magnets* 130

Sadakov D.S., Saradgishvili S.E. *An effective method of crawling in local area networks for information retrieval* 136

Tarasov S.D. *Multitopic relations based ranking method for multidocument summarization of news reports* 140

Cholanov K.S., Arpabekov M.I. *Dinamic of the mining of the excavational manipulator* 145

Kuleshov I.A., Duplinskii M.A., Malaxov U.A. *Choice of a method of modelling communication networks*..... 148

Ignatova E.I. *Problems of modeling and computer-aided investigation for robotic systems*..... 152

Ignatova E.I., Rostov N.V. *Kinematic problems of robot simulation*..... 159

Chervaykov N.I., Babenko M.G. *Linear recurrent sequences on elliptic curve*..... 164

Devices, information-measuring systems

Chernikov A.V., Pensky O.G. *System engineering of maintenance of humidity in a residential building* . 167

Polyanskiy A.V., Lvov A.S., Larichev A.V. *The multiparameter control of blast-furnace coke quality using instruments with neuronet organization*..... 172

Electronics, technologies of producing the materials of electronic technics

Chekanov V.S., Rahmanina J.A. *Mathematical modelling of formation of particle layer on electrodes in electrocleaning process*..... 177

Nagorniy V.S., Mashkov I.A. *Numerical simulation of jet turbulization in electrogasdynamic (EGD) jet control in automatic systems* 182

About the authors..... 187

Abstracts..... 191

УДК 681.322, 681.51

А.А. Жгун, Т.В. Жгун, А.И. Осадчий

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИЁМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Современные методы стеганографии являются перспективным направлением защиты информации. Особенность стеганографического подхода заключается в том, что он не предусматривает оглашение факта существования защищаемой информации. В настоящее время активно развиваются методы *компьютерной стеганографии*, в основе которых лежит выделение малозначимых фрагментов информационной среды и замена существующей в них информации на информацию, которую предполагается защитить.

Кроме использования стеганографических систем для решения проблем обеспечения конфиденциальности и ограничения доступа, скрытая передача сообщений в стеганографии является одним из самых перспективных направлений для аутентификации авторской продукции с целью защиты авторских прав на цифровые объекты. Для этого применяются стеганографические вставки: встраивание цифровых водяных знаков (*watermarking*), идентификационных номеров (*fingerprinting*), заголовков (captioning). Объём встраиваемого сообщения в этих случаях невелик, и после его внедрения в контейнере будут присутствовать две области с различными статистическими свойствами: область, в которой незначащие биты были изменены, и область, в которой они не менялись. Это может быть легко обнаружено с помощью статистических тестов. Для создания эквивалентного изменения вероятности всего контейнера биты секретного сообщения случайно распределяются по контейнеру, в результате чего расстояние между двумя встроенными битами определяется псевдослучайно. Эта методика наиболее эффективна при использовании потоковых контейнеров.

По способу доступа к скрываемой информации различают методы для потоковых контейнеров и методы для контейнеров фиксированного объёма. Методы, использующие потоковые контейнеры, работают с потоками непрерывных данных (например, интернет-телефония, видео). В этом случае скрываемые биты необходимо включать в информационный поток в режиме реального времени. Корреспондентам при использовании потоковых контейнеров необходимо преодолеть целый ряд трудностей. Наибольшую проблему при этом составляет синхронизация (определение начала) скрытого сообщения. Существующие оценки синхронизации датчиков ПСП на каналах с помехами используют специфику радиосвязи и не могут быть применены, например, при использовании в качестве контейнеров файлов графических форматов.

Предложим модель определения начала скрытого сообщения, гарантирующего наступление синхронизации с заданной вероятностью, которая может быть применена как к фиксированному, так и к потоковому контейнеру в стегосистеме, сохраняющей статистику контейнера.

Идея спрятать двоичные символы полезной информации между передаваемыми случайными двоичными символами для бинарного канала связи предлагалась в [2, 3]. Для реализации предлагаемой модели используются генераторы псевдослучайных последовательностей, которые выполняют три функции – кроме выработки псевдослучайной последовательности (ПСП) с большим периодом они служат также для обеспечения синхронизации работы передающих и принимающих устройств (или, другими словами, для определения начала скрытой информации), а также определяют место в контейнере – потоковом или фиксированном, где будут размещены очередные биты скрываемой информации. Генератор ПСП будет криптографически сильным, если текущее значение формируется из предыдущего с помощью односторонней функции с секретом [1]. Роль

нелинейной функции такого генератора псевдослучайных кодов (ГПК) может выполнять функция зашифрования одноключевой (классической) или двухключевой криптосистемы, при этом использование предположительно криптостойких функций автоматически придаёт аналогичное свойство и генератору ПСП, и рассматриваемой схеме. Стойкость функций современных криптосистем основывается на недоказуемом предположении о том, что у противника не хватит ресурсов (вычислительных, материальных, временных и т. п.) для того чтобы инвертировать эту функцию при неизвестном секретном параметре. Пример построения такого генератора приведён в [4].

Однако заметим, что схема допускает использование и некриптостойких ГПК, т. к. в общем случае стеганографические протоколы не предполагают криптостойкости. Она, например, совершенно отсутствует при внедрении информации в контейнер по методу наименее значащего бита. При необходимости криптостойкость обеспечивается шифрованием скрываемого сообщения.

Модель начинает работу с поступления в канал символов стегоконтейнера. На некотором шаге включается ГПК передающей стороны и вырабатывает инициализирующую последовательность, которая записывается в определённые места в блоках контейнера.

После передачи синхронизирующей последовательности генератор ПСП передающей стороны, продолжая работу, отключается от передатчика, и в канал поступают случайные символы из стегоконтейнера. На каждом шаге работы генератора ПСП при несовпадении фиксированных разрядов вектора $X(t)$ с ключевой комбинацией осуществляется переход в контейнере к следующему блоку, оставляя его неизменным, а при совпадении в этом блоке записывается скрываемая информация. То есть генератор ПСП определяет место, куда при помощи ключа будет записана новая порция информации; мы имеем стегосистему с секретным ключом. В случае фиксированного контейнера информация может записываться повторно в тот же файл.

ГПК принимающей стороны, используя поступающие коды стегоконтейнера, на каждом шаге своей работы проверяет условия синхронизации и после её наступления извлекает информацию по тому же правилу.

В [3] показано, что при выборе параметров генераторов псевдослучайных кодов (ГПК), учитывающем особенности используемой сети, синхронизация работы системы наступит достаточно быстро при реальных характеристиках системы. При этом вероятность ложного синхронизма на несколько порядков меньше вероятности вхождения систем в режим правильного синхронизма.

Если положение начальной комбинации в контейнере заранее неизвестно, а также в случае наличия помех, синхропосылка из единственного вектора не обеспечит надёжную синхронизацию системы. В этом случае синхропосылкой может служить последовательность векторов $X(0), X(1), \ldots, X(k)$, которая и обеспечит синхронизацию работы системы с заданной надёжностью при выполнении на принимающей стороне k раз условия совпадения принятого и выработанного генератором принимающей стороны векторов:

$$X(t) = F\big(X(t-1)\big), \qquad (1)$$

где F – функции ГПК.

Биты настраивающей последовательности могут быть скрыты среди наименее значащих бит последовательных блоков контейнера, начиная с некоторого места, или следовать в порядке, определяемом ключом. Местоположение этих бит никак не маркировано, они ищутся вслепую, проверяя выполнение условия (1). Чтобы уменьшить количество возможных ошибок при передаче, к инициирующей битовой последовательности можно применить помехоустойчивое кодирование или в качестве генератора ПСК использовать генераторы псевдослучайных последовательностей на основе регистров сдвига.

Поскольку в поступающей информации в общем случае могут быть ошибки, то будем считать, что вместо $X(t)$ может поступить код $X^*(t)$, который может отличаться от $X(t)$. Переключение в режим синхронизма предлагалось в [2, 3] производить при выполнении условия (1), проверяемого в приёмниках информации на каждом шаге t. В случае выполнения условия $X^*(t) = F(X^*(t-1))$ произойдёт ошибочное переключение соответствующего генератора ПСП в режим синхронизма, которое может произойти как при ошибке в обоих принятых векторах, сформированных генератором ГПК, так и при случайном совпадении.

Определим вероятность $W(t)$ синхронизации принимающей и передающей станций до момента не позднее t, опираясь не на два предыдущих шага, как это было сделано ранее в [3], а на три или более шагов k. Вероятность входа в синхро-

низм до момента не позднее t для одной принимающей станции:

$$W(t) = W(t–1) + \left[1 – W(t–1)\right]p_t, \qquad (2)$$

где $W(t–1)$ – вероятность того, что включение в синхронизм произошло ранее шага $t–1$; $1 – W(t–1)$ – вероятность того, что до момента $t – 1$ включение в синхронизм не произошло; p_t – апостериорная вероятность реализации настраивающей последовательности векторов из $k+1$ вектора, реализующая условие (1) k раз на шаге t, т. е. вероятность реализации настраивающей последовательности векторов $X^*(t–k)$, $X(t–k+1)$, $X(t– k+2)$, …, $X(t–1)$ и состояния $X(t)$.

Вероятность реализации настраивающей последовательности векторов $X^*(t–k)$, $X(t–k+1)$, $X(t–k+2)$, ..., $X(t–1)$ определяется по формуле Байеса, при условии, что *не произошло входа в правильный синхронизм на шаге t–1*. Рассматривая все возможные варианты ошибочных и правильно принятых векторов и учитывая, что при реализации любой последовательности векторов кроме безошибочной, обязательно не случится правильной синхронизации, находим полную вероятность события, что в момент $t–1$ не произошло синхронизации – $1–p^k$, где p – вероятность безошибочного приема n-разрядного вектора. Тогда апостериорная вероятность реализации последовательности $X^*(t–k)$, $X(t–k+1)$, $X(t–k+2)$, …, $X(t–1)$ и безошибочного приёма вектора $X(t)$.

$p_t = \dfrac{p(1-p)^{k-1}}{1-p^k}p = \dfrac{p^2(1-p)^{k-1}}{1-p^k}$ и формула (2) для вероятности входа в синхронизм одной станции до момента t ($t \geq k$) примет вид:

$$W(t) = W(t–1) + \left[1 – W(t–1)\right]\frac{p^2(1-p)^{k-1}}{1-p^k}.$$

Доопределим начальные условия. Пусть $W(0) = W(1) = \ = W(k–1) = 0$, $W(k) = p^k$.

Рассматривая получившееся разностное уравнение, получим:

$$W(t) = 1 – \left(1–p^k\right)\left(1–p_t\right)^{t–k}, \text{ где } t \geq k, p_t = \frac{p^2(1-p)^{k-1}}{1-p^k}.$$

Итак, выражение для нахождения вероятности входа в правильный синхронизм за время не более t имеет вид:

$$W(t) = 1 – \left(1–p^k\right)\left(1– \frac{p^2(1-p)^{k-1}}{1-p^k}\right)^{t–k}, \ t \geq k,$$
$$W(0) = W(1) = \ldots = W(k–1) = 0, \ W(k) = p^k, \qquad (3)$$

где p – вероятность безошибочного приёма n-разрядного вектора

На рис. 1, *а*, *б* приведены графики вероятности наступления синхронизации при различном уровне помех в сети, здесь p – вероятность безошибочного приёма n-разрядного вектора. На рис. 1, *а* представлены графики $W(t)$ для малого числа шагов – $t=10^2$, а на рис. 1, *б* – для практически бесконечного числа шагов – $t=10^{20}$. Такое число шагов ($t=10^{20}$) будем считать оценкой сверху возможного числа шагов для нахождения

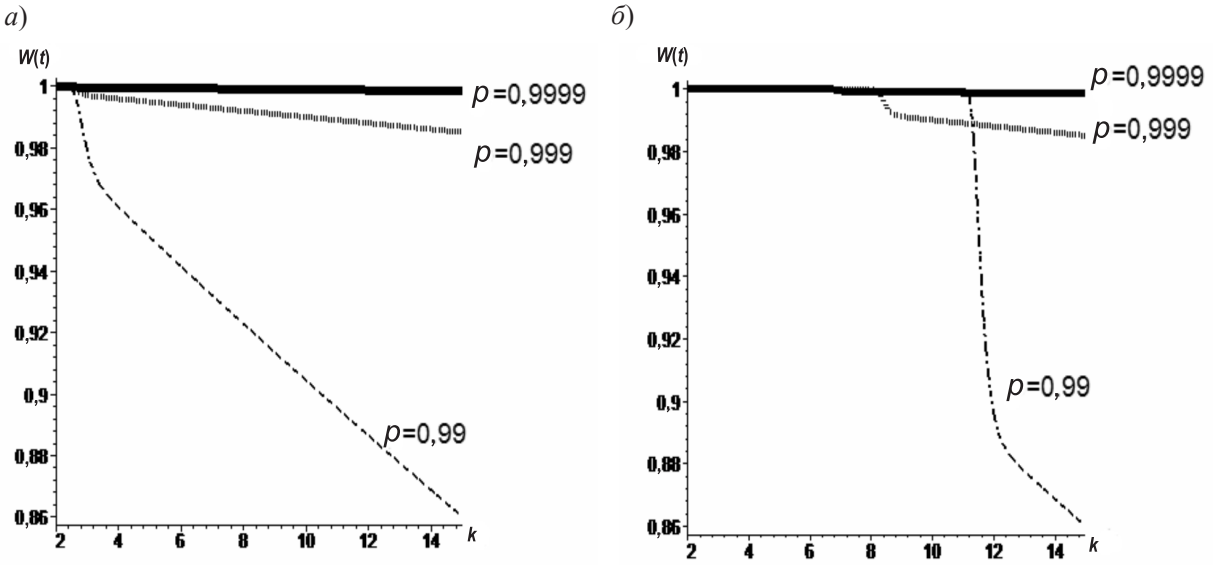


Рис. 1. Вероятность синхронизации в зависимости от длины настраивающей последовательности при фиксированном уровне помех в сети:
а – $t = 10^2$; *б* – $t = 10^{20}$

скрытой информации, хотя в потоковом контейнере начало скрываемой информации может находиться сколь угодно далеко от момента начала наблюдения.

Значения вероятности безошибочного приёма n-мерного вектора $p = 0{,}999$ и $p = 0{,}9999$ являются реальными величинами для современных сетей: вероятность ошибки при приёме единичного символа в волоконно-оптических линиях связи составляет 10^{-11}, в цифровых каналах 10^{-6}, в аналоговых каналах – 10^{-4} [5].

При любом количестве шагов работы генератора более жесткие условия, выраженные увеличением числа выполняемых проверок (т. е. увеличением длины настраивающей последовательности), определяют уменьшение вероятности ожидаемого события; при этом число шагов, необходимое для надежной синхронизации системы, будет увеличиваться. На рис. 2 приведён график вероятности наступления синхронизации $W(t)$ до момента времени t для уровня помех в сети, которая характеризуется наихудшей вероятностью безошибочного приема n-разрядного вектора $p = 0{,}99$. Для небольшого количества шагов t вероятности надёжной синхронизации достаточно сильно отличаются. При этом число шагов работы генератора, обеспечивающих надёжную синхронизацию, отличается на порядки для различных, хотя и достаточно близких длин настраивающей последовательности k.

Тем не менее, с течением времени процесс достигает нужной надёжности синхронизации при небольшой длине настраивающей последовательности. При уменьшении уровня помех в канале число шагов, необходимое для этого, значительно уменьшается, а значение вероятности синхронизации приближается к единице. Однако необходимое значение вероятности синхронизации может быть не достигнуто, если скрываемые данные расположены близко от начала момента наблюдения. Например, при уровне помех $p = 0{,}99$ заданная вероятность надёжной синхронизации не может быть достигнута при длине настраивающей последовательности $k = 8$, при числе шагов $t = 10^8$.

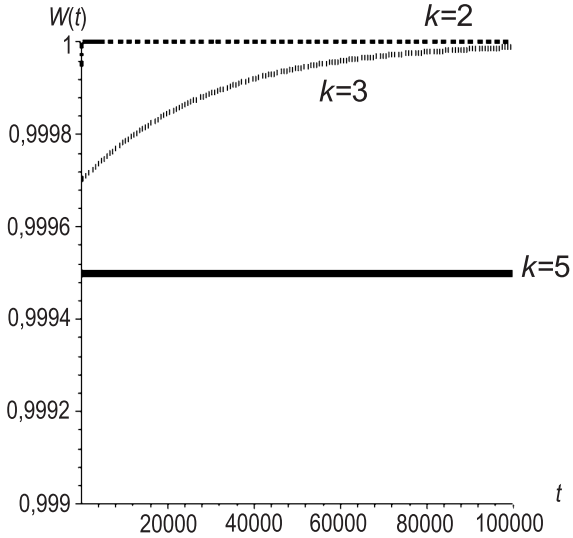


Рис. 2. Вероятность синхронизации в зависимости от длины настраивающей последовательности и числа шагов генератора работы при уровне помех в сети $p = 0{,}99$

Более жесткие условия достижения желательной надёжности процесса синхронизации, выраженные увеличением длины настраивающей последовательности, определяют уменьшение вероятности синхронизма; при этом число шагов, необходимое для надёжной синхронизации системы, значительно увеличивается при длине настраивающей последовательности более пяти векторов. Необходимое значение вероятности синхронизации может быть достигнуто, если использовать инициализирующую последовательность из трёх ($k = 2$) или четырёх ($k = 3$) векторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Брассар Ж.** Современная криптология. М.: ПОЛИМЕД, 1999. 176 с.

2. **Жгун Т.В., Кирьянов Б.Ф.** Модель скрытой передачи информации // Вестник НовГУ. Техн. науки. 2002. № 22. С. 50–53.

3. **Жгун Т.В., Кирьянов Б.Ф.** Распознавание двоичной информации, перемешанной со случайными символами // Тр. VI Междунар. конф. «Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии». В. Новгород, 2002. Т. 1. С. 231–232.

4. **Жуков И.Ю., Иванов М.А., Осмоловский С.А.** Принципы построения криптостойких генераторов псевдослучайных кодов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2001. № 1. С. 55–65.

5. **Щелованов Л.Н., Антонова Г.С., Доронин Е.М. и др.** Основы теории тактовой сетевой синхронизации. СПб., 2000. 106 с.

УДК 621.37

В.А. Сороцкий, М.А. Уткин

ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОГО ТОКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫХ КЛЮЧЕЙ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЯЧЕЙКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Генерирование колебаний в сравнительно высокочастотных для тиристорных ключей диапазонах ОНЧ НЧ возможно лишь с помощью многоячейковых тиристорных генераторов (МТГ), в которых повышение рабочей частоты достигается поочередной работой нескольких ячеек схемы [1, 2]. При этом время, предоставляемое тиристорам для восстановления электрической прочности, может составлять ($N_я$ –1) полупериодов частоты выходного колебания, где $N_я$ – количество ячеек в генераторе. Принимая во внимание, что даже для сравнительно быстродействующих тиристоров серий ТБЧ и ТБИ длительность интервала протекания тока обратного восстановления тиристора составляет несколько мкс и на повышенных частотах может оказаться соизмеримой с длительностью импульса прямого тока, становится очевидным, что в этом случае пренебрежение инерционностью выключения тиристоров при расчёте МТГ не только необоснованно, но и может привести к заметной погрешности [3]. Однако при анализе процессов в [3] был рассмотрен частный случай, когда МТГ работает на резистивную нагрузку, а заряд обратного восстановления Q_{rr} полагался известным из справочных данных. Но такой подход не всегда обеспечивает требуемую точность, поскольку накопленный к моменту окончания импульса прямого тока $t_и$ в структуре тиристора заряд зависит от большого числа параметров режима работы генератора.

Целью настоящей статьи является количественная оценка влияния обратного тока восстановления тиристоров на характеристики МТГ с комплексной нагрузкой путём вычисления Q_{rr} на основе параметров режима работы генератора.

Ток, протекающий через тиристоры МТГ при работе на комплексную нагрузку, описывается соотношением [1, 2]:

$$i_т(t)=\frac{U_M}{\omega L}\left\{\frac{\sin\nu\omega t}{\xi K_C\nu}+\frac{\sin[0{,}5(\nu+1)\omega t+\varphi]}{(\nu+1)}\times\right.$$
$$\left.\times\frac{\sin[0{,}5(\nu-1)\omega t]}{0{,}5(\nu-1)}+\frac{\sin\varphi\sin\nu\omega t}{\nu+1}\right\}=\frac{U_M}{\omega L}\,\tilde{i}_т(t), \quad (1)$$

где U_M и φ – соответственно амплитуда и начальная фаза напряжения на нагрузке, K_C – коэффициент перезаряда ёмкости коммутирующего контура; $\xi=U_M\Big/\left|u_C\right|_{t=t_и}$; $\nu=\omega_0/\omega$; $\omega_0=1/\sqrt{LC}$ – частота настройки коммутирующего контура; через $\tilde{i}_т(t)$ обозначено выражение, стоящее в фигурных скобках.

Зная $i_Т(t)$, для нахождения Q_{rr} воспользуемся методом заряда [4]. В общем виде применение метода заряда к анализу процесса выключения тиристора подразумевает нахождение заряда неосновных носителей как в *p*-, так и в *n*-базе прибора. Однако, исходя из анализа известных работ, в [5] сделано заключение о том, что переходный процесс выключения тиристора определяется, в основном, рассасыванием заряда неосновных носителей в *n*-базе тиристора. Это обусловлено в т. ч. и тем, что время жизни дырок τ_p в *n*-базе тиристора, как правило, существенно больше времени жизни электронов в *p*-базе. Исходя из предположения, что инерционность тиристора практически не влияет на форму импульса тока, определяемую функцией $\tilde{i}_т(t)$ в (1), основанием для которого является сохранение на этапе протекания обратного

тока такой же высокой степени проводимости, как и при протекании прямого тока, запишем уравнение для нахождения накопленного в тиристоре заряда:

$$\frac{dQ_T(t)}{dt} + \frac{Q_T(t)}{\tau_p} = i_T(t). \qquad (2)$$

Подставив (1) в (2) и решив уравнение при начальном условии $Q_T(0) = 0$, получим:

$$Q_T(t) = \frac{U_M}{\omega^2 L}\left\{A\cos\omega t - B\cos\left[(v+1)\omega t\right] + \right. \qquad (3)$$
$$\left. + D\sin\left[(v+1)\omega t\right] + E\sin\omega t + Ce^{-t/\tau_p}\right\} = \frac{U_M}{\omega^2 L} q_T(t),$$

где $A = \left(M_1/\lambda + M_2\right)\lambda^2/\left(1+\lambda^2\right)$, $B = \left(M_1/\lambda + Kv\right)\lambda^2/\left(1+\lambda^2 v^2\right)$, $\lambda = \omega\tau_p$, $D = \left(K/\lambda + M_1 v\right)\lambda^2/\left(1+\lambda^2 v^2\right)$, $E = \left(M_1 - M_2/\lambda\right)\times$ $\times\lambda^2/\left(1+\lambda^2\right)$, $C = B - A$, $M_1 = \cos\varphi/\left(v^2-1\right)$, $M_2 = \sin\varphi/\left(v^2-1\right)$, $K = M_2 + \sin\varphi/\left(v+1\right) + 1/vK_C\xi$.

Длительность интервала $t_и$ протекания прямого тока через тиристор определим из решения уравнения $i_т(t_и) = 0$. Подставив найденное значение $t_и$ в (3), найдем заряд $Q_т(t_и)$, накопленный в приборе к моменту окончания импульса прямого тока. Этот заряд должен быть выведен на интервале протекания обратного тока, т. е. является зарядом обратного восстановления $Q_{rr} = Q_т(t_и)$.

Снижение мощности в нагрузке генератора, обусловленное разрядом коммутирующих ёмкостей обратным током восстановления тиристоров, можно вычислить по изменению заряда на ёмкости коммутирующего контура вследствие протекания указанного тока. Действительно, мощность, которую могла бы отдать в нагрузку коммутирующая ёмкость в отсутствие обратного тока связанных с ней тиристоров [1]:

$$P_{н0} = \left[Cu_C^2(0)/2 - Cu_C^2(t_и)/2\right] 2f = \qquad (4)$$
$$= \frac{CE^2}{2}\,\frac{1+K_C}{1-K_C}\,2f = \Delta Q_0 Ef,$$

где $u_C(0)$ и $u_C(t_и)$ – соответственно напряжение на коммутирующей ёмкости в начале и конце импульса прямого тока через тиристор, $\Delta Q_0 = CE\left(1+K_C\right)/\left(1-K_C\right)$ – изменение заряда на коммутирующей ёмкости при протекании указанного импульса тока; f – частота генерируемых колебаний; E – напряжение питания генератора.

При протекании обратного тока восстановления тиристоров в коммутирующую ёмкость и, в конечном счёте, в источник питания генератора, возвращается заряд $\Delta Q_в = 2Q_{rr}$. Коэффициент, стоящий перед Q_{rr}, учитывает, что возврат заряда происходит дважды: при протекании обратного тока восстановления тиристора верхнего и нижнего плеч. Таким образом, относительное снижение мощности в нагрузке:

$$\Delta P_н/P_{н0} = 2Q_{rr}/\Delta Q_0. \qquad (5)$$

Преобразовав последнее выражение с учётом (3), (4) и приняв во внимание, что $U_M = \xi K_C E/\left(1-K_C\right)$ [1], получим:

$$\Delta P_н/P_{н0} = \frac{2K_C\xi v^2}{\left(1+K_C\right)}\, q_т(t_и) = K_q q_т(t_и). \qquad (6)$$

Использованное в (5) и (6) значение Q_{rr} соответствует току (1), который был получен в предположении о том, что $\tau_p = 0$ и тиристорные ключи являются безынерционными (в дальнейшем такой режим будем именовать эталонным). В реальных условиях, когда $\tau_p \neq 0$, как уже было отмечено выше, мощность в нагрузке снижается по отношению к мощности эталонного режима и, соответственно, уменьшается и амплитуда тока тиристора по сравнению со значением, задаваемым (1). Уменьшение амплитуды тока по отношению к току эталонного режима, которое в первом приближении можно считать пропорциональным по величине относительному снижению мощности в нагрузке, приводит к снижению величины заряда, накопленного в тиристоре к началу процесса его выключения. Учёт этого обстоятельства применительно к возвращаемому в источник питания заряду можно выразить соотношением:

$$\Delta Q_{в1} = \Delta Q_в\left(1 - \Delta Q_{в1}/Q_0\right), \qquad (7)$$

где $\Delta Q_{в1}$ – скорректированное значение возвращаемого заряда.

Из (7) нетрудно выразить отношение зарядов:

$$\Delta Q_{в1}/Q_0 = \frac{\Delta Q_в}{\Delta Q_0}\,\frac{1}{1+\Delta Q_в/\Delta Q_0}. \qquad (8)$$

С учётом (5), (6) и (8) запишем окончательное выражение для относительного снижения мощности в нагрузке генератора:

$$\Delta\tilde{p}_н = \left(\Delta P_н/P_{н0}\right)_1 = K_q q_т(t_и)/\left[1 + K_q q_т(t_и)\right]. \qquad (9)$$

Негативное влияние обратного тока восстановления тиристоров может проявиться не только в снижении мощности в нагрузке в соответствии

с (9), но и в возрастании мощности, рассеиваемой в демпфирующих цепях МТГ. С целью уменьшения последней в [1, 2] был рассмотрен так называемый «гладкий» режим работы МТГ, характеризуемый тем, что в момент окончания импульса тока тиристора, определяемый из условия $i_{т}(t_{и}) = 0$, скачок напряжения на аноде прибора отсутствует, т. е. $\left[di_{т}(t)/dt\right]_{t=t_{и}} = 0$, что обусловливает отсутствие коммутационных потерь при выключении тиристоров. Наличие интервала протекания обратного тока приводит к увеличению общей длительности импульса тока и увеличению коммутационных потерь. Выключение тиристоров происходит с задержкой в момент времени t_q, определяемый с учётом (3) из условия $q_{т}(t_q) = 0$, при этом $t_q > t_{и}$. К моменту времени t_q, когда заканчивается рассасывание избыточного заряда в тиристоре, обратный ток восстановления достигает значения:

$$i_{т}(t_q) = \frac{U_M}{\omega L}\tilde{i}_{т}(t_q)\Delta\tilde{p}_{н} = \frac{E}{\omega L}\frac{\xi K_C}{(1-K_C)}\tilde{i}_{т}(t_q)\Delta\tilde{p}_{н}. \quad (10)$$

В этот момент времени в индуктивности коммутирующего контура накоплена энергия $W_L = Li_{т}^2(t_q)/2$. Эта энергия рассеивается в виде паразитных колебаний на аноде тиристора, а соответствующая ей мощность $P_L = Li_{т}^2(t_q)f$ выделяется в виде дополнительных потерь в тиристоре и демпфирующих цепях, специально включаемых для гашения паразитных колебаний. Так же, как и в случае снижения мощности $\Delta P_{н}$, эту мощность удобно представить в нормированном виде:

$$\tilde{p}_L = \frac{P_L}{P_{н0}} = \frac{\left[\xi K_C v\Delta\tilde{p}_{н}\tilde{i}_{т}(t_q)\right]^2}{1-K_C^2}. \quad (11)$$

Используя (9)–(11), оценим влияние обратного тока восстановления тиристоров на изменение энергетических характеристик МТГ на примере трёх, характерных для тиристорных генераторов, режимов: «гладкого» (v = 0,865), режима разрывного тока в нагрузке (v = 1,15) и с перекрытием в нагрузке токов (v = 0,7) соседних ячеек МТГ (рис. 1–3).

Из рис. 1 видно, что наибольшее снижение мощности в нагрузке МТГ имеет место в режиме разрывного тока (v = 0,7), а менее всего этот эффект проявляется в «гладком» режиме. Данный результат можно объяснить тем, что величина накопленного в тиристоре заряда зависит не только от абсолютной величины прямого тока, но и от длительности и скорости его изменения в моменты времени, предшествующие выключению прибора. В этом смысле «гладкий» режим оказывается

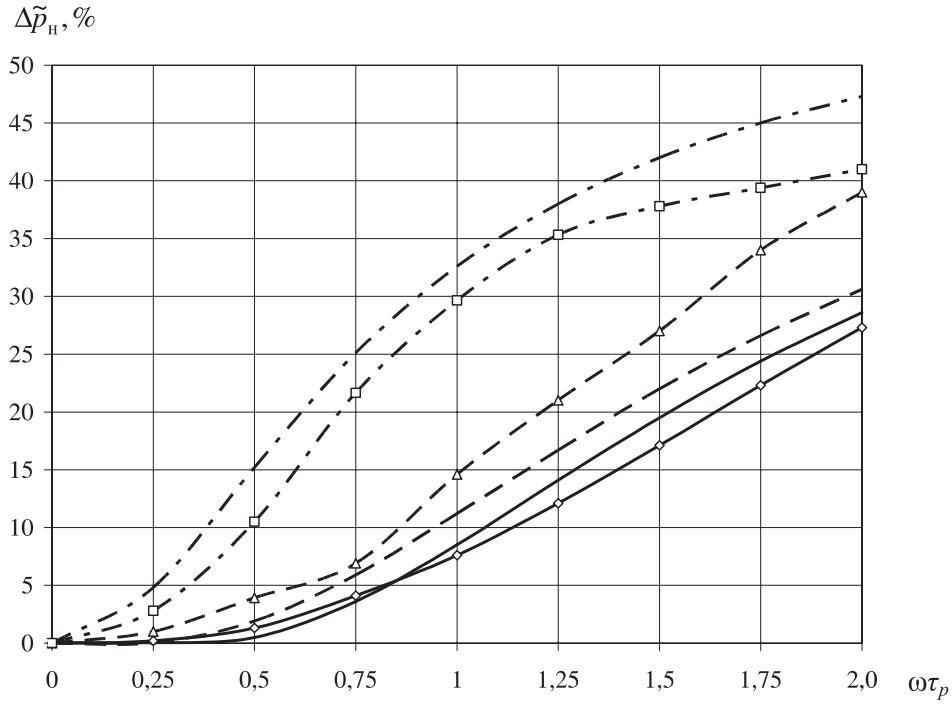


Рис. 1. Зависимости $\Delta\tilde{p}_{н}$ от параметра $\omega\tau_p$
(———) v = 0,865; (— —) v = 1,15; (— – —) v = 0,7

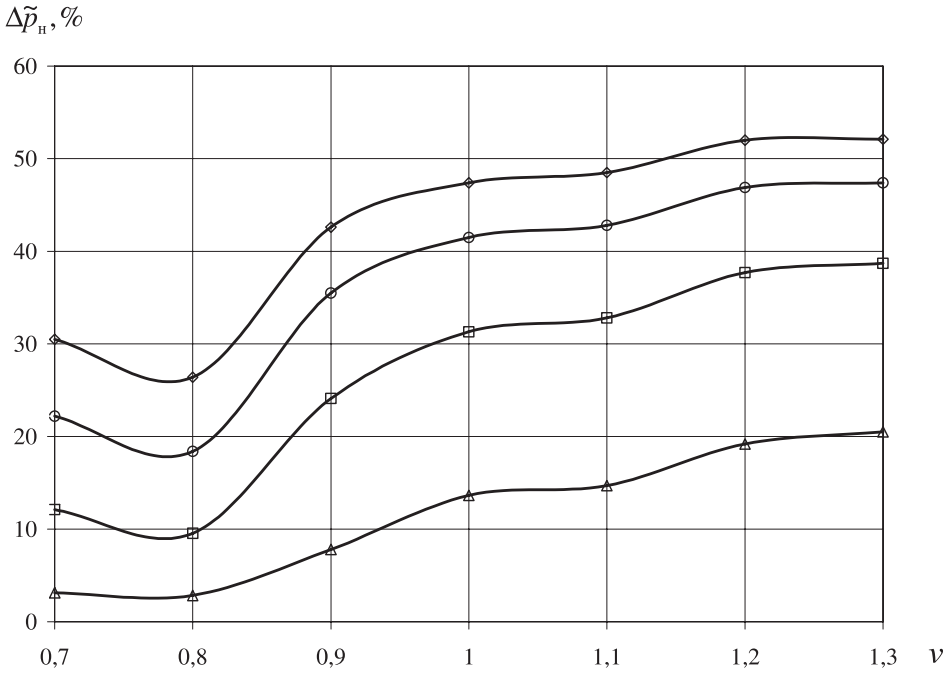


Рис. 2. Зависимости $\Delta\tilde{p}_{\text{н}}$ от расстройки разрядного контура ν
(—◇—) $\omega\tau_p$ = 2,0; (—○—) $\omega\tau_p$ = 1,5; (—□—) $\omega\tau_p$ = 1,0; (—△—) $\omega\tau_p$ = 0,5

более предпочтительным, ведь к моменту окончания импульса прямого тока через тиристор в этом режиме $\left[di_{\text{т}}(t)/dt\right]_{t=t_{\text{и}}} = 0$, а его длительность составляет три четверти периода.

Наряду с теоретическими результатами на рис. 1 для сравнения приведены результаты численного эксперимента, обозначенные маркерами. Сравнив результаты численного и аналитического расчётов, нетрудно убедиться, что отличие между ними не превышает 10 %. По существу это можно рассматривать как подтверждение достоверности предложенного метода учёта влияния обратного тока восстановления тиристоров на основные характеристики МТГ.

Поведение $\Delta\tilde{p}_{\text{н}}$ и $\tilde{p}_L$ при изменении расстройки разрядного контура ν можно проследить, воспользовавшись графиками рис. 2, 3.

При анализе зависимостей, представленных на рис. 2, возникает вопрос, можно ли реализовать режим работы МТГ с минимально возможным относительным снижением мощности в нагрузке? Основанием для этого является, в частности, и то, что на рис. 2 при $\nu \approx 0{,}8$ можно наблюдать точки, подозрительные на экстремум.

Для того чтобы дать ответ на поставленный вопрос, необходимо, используя (3), решить задачу параметрической оптимизации $Q_{\text{т}}\left(K_C, \varphi, \xi\right)\big|_{t=t_{\text{и}}} \rightarrow \min$ при ограничениях, вытекающих из условия работоспособности генератора: $0 < K_C < 1$; $0 \le \varphi \le 2\pi$; $0 < \xi \le 1$. При этом ν следует рассматривать в качестве независимой переменной. Решение указанной задачи осуществлялось методом последовательного квадратичного программирования, реализованного в функции *fmincon*, входящей в состав библиотеки *Optimization Toolbox* программной среды MATLAB. В качестве точки начального приближения был выбран набор параметров K_{C0} = 0,422; φ_0 = 3,037 рад; ξ_0 = 1,0, соответствующий «гладкому» режиму. Семейство зависимостей относительного снижения мощности $\left(\Delta\tilde{p}_{\text{н}}\right)_{\min}$ в оптимальном по критерию минимума заряда $Q_{\text{т}}(t_{\text{и}})$ режиме как функция параметра ν представлено на рис. 4 прерывистыми линиями. Здесь же сплошными линиями приведены результаты численного эксперимента. Как видно из рис. 4, максимальное расхождение аналитических и численных результатов не превышает 4 %.

Для того чтобы оценить выигрыш по величине $\Delta\tilde{p}_{\text{н}}$, который может быть получен в оптимальном режиме, сопоставим между собой зависимости, приведённые на рис. 2 и 4 и соответствующие одинаковым значениям параметра $\omega\tau_p$. Так, в упоминавшейся выше характерной точке с ν = 0,8 реализация оптимального режима при $\omega\tau_p$ = 2,0

позволяет уменьшить $\Delta\widetilde{p}_{н}$ на 5 %. Ещё более существенный выигрыш при этом же значении $\omega\tau_p$ можно получить при v = 1,2: относительное снижение мощности $\Delta\widetilde{p}_{н}$ в этом случае уменьшается с 52,1 % до 26,3 %, т. е. почти в два раза.

Следует обратить внимание на то, что реализация оптимального режима работы МТГ, позволяющая снизить, в определённой степени, негативное влияние инерционности тиристорных ключей, достигается за счёт увеличения длительности интервала $\omega t_{и}$. Так, если для «гладкого» режима, реализуемого при v = 0,865 в предположении о безынерционности тиристорных ключей, длительность интервала $\omega t_{и}$ = 297° [1, 2], то в оптимальном по критерию минимума заряда $Q_{т}(t_{и})$ режиме при том же значении относительной расстройки v и $\omega\tau_p$ = 2,0 длительность этого интервала возрастает на 21 % и достигает значения $\omega t_{и}$ = 324°. С уменьшением v увеличение длительности интервала $\omega t_{и}$ становится ещё более заметным как в относительном выражении, так и по абсолютному значению. В частности, при v = 0,7 для безынерционных ключей было получено $\omega t_{и}$ = 318°. В оптимальном режиме при том же значении относительной расстройки v и $\omega\tau_p$ = 2,0 длительность этого интервала возрастает на 26 % и по абсолютной величине достигает значения $\omega t_{и}$ = 400°. Поскольку с ростом $\omega t_{и}$ сокращается интервал времени, отводимый для восстановления блокирующих свойств тиристоров, то реализация оптимального режима в генераторе может привести к ограничению верхней границы его рабочего диапазона частот и преодолеть указанное ограничение можно лишь путём увеличения количества ячеек.

Анализируя поведение $\widetilde{p}_{L}$ при изменении расстройки разрядного контура v (рис. 3), следует обратить внимание на следующие закономерности. Преимущество «гладкого» режима, который, собственно говоря, и был рассчитан в [1, 2] исходя из условия отсутствия потерь мощности в демпфирующих цепях генератора, реализуется лишь при сравнительно небольшой степени инерционности тиристорных ключей, определяемой условием $\omega\tau_p \le 1{,}0$. При выполнении данного условия относительный уровень коммутационных потерь не превышает $\widetilde{p}_{L} \le 1{,}5$ %. С ростом степени инерционности тиристоров ($\omega\tau_p > 1{,}0$) рассеиваемая в «гладком» режиме в демпфирующих цепях генератора мощность может достичь значений 4…7 % от мощности, выделяемой в нагрузке. Данный результат полезен не только с точки зрения установления причины дополнительного снижения КПД генератора, ни и правильного расчёта элементов демпфирующих цепей. Говоря о наиболее благоприятных с точки зрения снижения $\widetilde{p}_{L}$ значениях относительной расстройки v, можно было бы

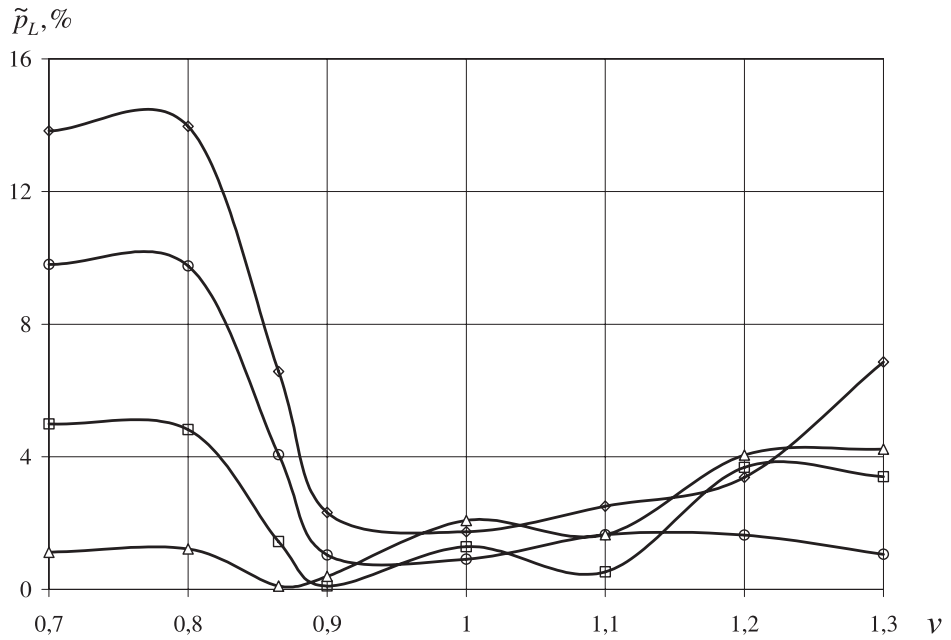


Рис. 3. Зависимости $\widetilde{p}_{L}$ от расстройки разрядного контура v
(—◇—) $\omega\tau_p$ = 2,0; (—○—) $\omega\tau_p$ = 1,5; (—□—) $\omega\tau_p$ = 1,0; (—△—) $\omega\tau_p$ = 0,5

рекомендовать соблюдать условие $v > 0{,}9$ (рис. 3). Однако, сопоставив зависимости на рис. 2 и 3, нетрудно видеть, что при $v > 0{,}9$ заметно возрастает $\Delta\widetilde{p}_{\text{н}}$ и, следовательно, работа генератора при указанных значениях расстройки нецелесообразна. Необходимость уменьшения $\Delta\widetilde{p}_{\text{н}}$ накладывает ограничение на допустимый диапазон изменения относительной расстройки, выражаемое неравенством $v < 0{,}9$. По существу это означает, что за устранение возможного сравнительно большого проигрыша по величине $\Delta\widetilde{p}_{\text{н}}$, который может составить 10–25 %, предпочтительнее заплатить увеличением, в худшем случае, на 10–12 % мощности $\widetilde{p}_L$.

Подводя итоги, следует отметить, что основное достоинство предложенного способа оценки влияния обратного тока восстановления тиристоров на характеристики МТГ заключается в том, что он позволяет определить заряд Q_{rr}, основываясь на знании параметров режима работы генератора (v, K_C, φ и ξ) и параметра $\omega\tau_p$, характеризующего инерционные свойства тиристорных ключей. Это значительно повышает точность определения энергетических характеристик генератора по сравнению со случаем, рассмотренным в [3], где расчёт указанных характеристик был построен на использовании заведомо известной величины Q_{rr}, которую предполагалось заимствовать из справочной литературы или определять экспериментально, что на практике можно сделать для очень ограниченного набора режимов работы генератора и значений токов тиристоров.

Сравнение результатов аналитического расчёта с результатами численного эксперимента, выполненного на компьютерной модели, показало, что их максимальное расхождение не превышает 10 %, что является подтверждением адекватности предложенного способа.

Расчёты показали, что если исходить из допустимой величины снижения мощности в нагрузке 10 %, то для этого требуется чтобы выполнялось

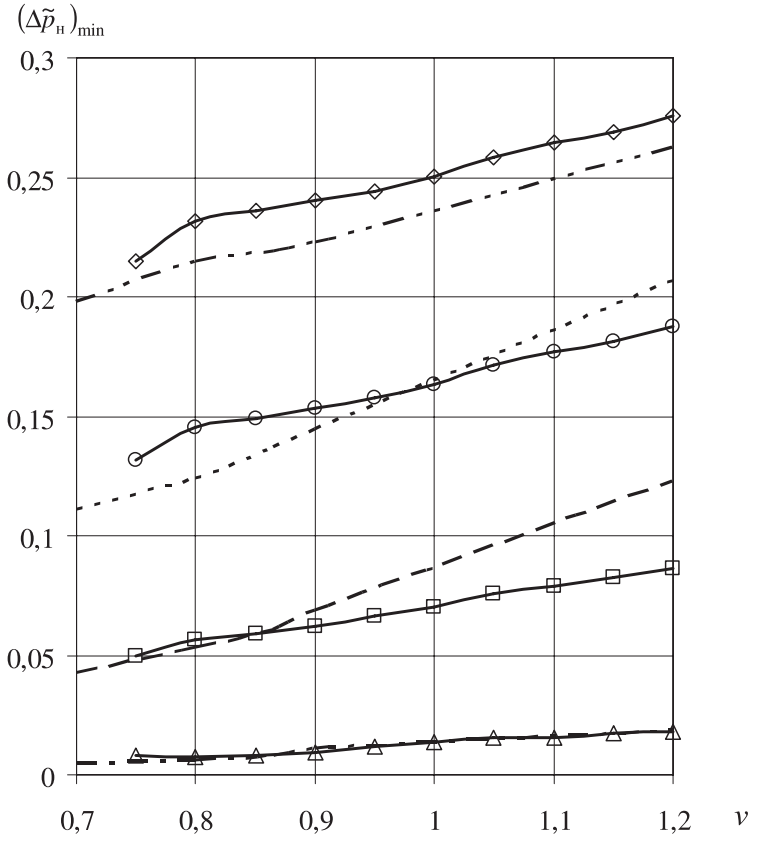


Рис. 4. Зависимости $\Delta\widetilde{p}_{\text{н}}$ от расстройки разрядного контура v
(— – —) $\omega\tau_p = 0{,}5$; (— — —) $\omega\tau_p = 1{,}0$; (– – – –) $\omega\tau_p = 1{,}5$; (— – — —) $\omega\tau_p = 2{,}0$;
(—△—)$\omega\tau_p = 0{,}5$; (—□—) $\omega\tau_p = 1{,}0$; (—○—) $\omega\tau_p = 1{,}5$; (—◇—) $\omega\tau_p = 2{,}0$

условие $\omega\tau_p \le 0{,}5...1$. При возрастании $\omega\tau_p$ до 2 снижение мощности в нагрузке генератора может достичь 30–50 %, причём сильнее всего влияние инерционности тиристоров проявляется при работе генератора в режиме разрывного тока.

Помимо снижения мощности в нагрузке инерционность тиристоров приводит к тому, что их выключение происходит при конечном значении обратного тока через тиристор, в основном при максимальном его значении. При резком характере восстановления обратной проводимости тиристора скачок тока в разрядной индуктивности сопровождается паразитными колебаниями значительной амплитуды на аноде прибора, приводящими к рассеянию в нём и демпфирующих цепях, включаемых для гашения этих колебаний, энергии запасённой в разрядной индуктивности. Дополнительные потери мощности в генераторе, обусловленные этим эффектом, могут достигать 10–14 %, причём наибольшие значения этой мощности характерны для режимов с перекрытием токов, когда относительная расстройка разрядного контура $\nu < 0{,}9$.

Для того чтобы скомпенсировать нежелательное снижение мощности в нагрузке с ростом параметра $\omega\tau_p$, при расчёте генератора можно рекомендовать введение запаса по величине выходной мощности. Однако при этом следует иметь в виду, что это не повлияет на повышение коэффициента использования по мощности активных приборов и другого электротехнического оборудования генератора. С этой целью можно рекомендовать режим, оптимальный по критерию минимума заряда Q_{rr}, хотя и он не лишен недостатков, в числе которых следует отметить трудность поддержания этого режима при диапазонной работе генератора и уменьшение схемного времени выключения тиристоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Артым А.Д.** Ключевые генераторы гармонических колебаний. Л.: Энергия, 1972. 170 с.

2. **Бальян Р.Х., Сиверс М.А.** Тиристорные генераторы и инверторы. Л.: Энергоиздат, 1982. 223 с.

3. **Сороцкий В.А.** Влияние инерционности тиристорных ключей на энергетические характеристики многоячейкового генератора // Радиотехника. 2003. № 4. С. 68–70.

4. **Герлах В.** Тиристоры // Пер. с нем. М.: Энергоатомиздат, 1985. 328 с.

5. **Дерменжи П.Г., Кузьмин В.А., Крюкова Н.Н. и др.** Расчет силовых полупроводниковых приборов / Под ред. В.А. Кузьмина. М.: Энергия, 1980. 184 с.

6. **Сороцкий В.А., Уткин М.А.** Исследование характеристик многоячейковых тиристорных генераторов на цифровой модели // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. Вып. 5 (86). С. 93–99.

УДК 621.396

Д.Б. Ахметов, А.С. Коротков

ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ РАДИОЧАСТОТНЫХ МЕТОК ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УЗЛА БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Объединение сенсорной сети на базе стандарта IEEE 802.15.4 и системы радиочастотной идентификации (RFID) позволяет осуществлять сбор и передачу информации на основе беспроводных технологий [1, 2]. Система RFID состоит из двух основных частей: устройства считывания и радиочастотных меток. Устройство считывания включает антенну, приёмопередатчик и блок управления. Предназначено для считывания, а также, в ряде случаев, для записи информации на радиочастотные метки. Радиочастотная метка состоит из антенны и блоков, обеспечивающих приём, передачу, хранение и обработку исходных данных. Системы RFID отличаются широкой об-

ластью рабочих частот: от диапазона длинных волн (ДВ) до диапазона ультравысоких частот (УВЧ), что требует разработки антенны устройства считывания при решении конкретной задачи. Чем больше рабочая частота, тем больше радиус считывания. Системы RFID диапазона УВЧ с большим радиусом считывания используются в логистике, в автомобильной промышленности. В ряде областей применения, например, в медицине, радиус считывания информации ограничивается несколькими десятками сантиметров и менее. Как следствие, используются системы RFID диапазона ДВ [2, 3]. Стандарт IEEE 802.15.4 предполагает использование устройств с несущей частотой до единиц ГГц. В публикации предлагается разработка устройства считывания системы RFID диапазона ДВ с рабочей частотой 13,56 МГц, интегрированного с узлом сенсорной беспроводной сети с несущей частотой 2,45 ГГц.

Интерфейсная часть приёмопередатчика сенсорной беспроводной сети

Стандарт IEEE 802.15.4, принятый в 2003 г. для реализации беспроводных сенсорных сетей, разработан как альтернативный вариант стандарта IEEE 802.15.1 (Bluetooth) для передачи данных на малые расстояния (обычно до 10 м) при малой потребляемой мощности. Стандарт IEEE 802.15.4 предусматривает три диапазона несущих частот, не подлежащих обязательной регистрации, два из которых приняты в Европе и США – 868 МГц и 915 МГц соответственно, третий диапазон – 2450 МГц используется во всём мире. В диапазоне 868/915 МГц используется двоичная фазовая манипуляция (BPSK), а также, в ряде случаев, амплитудная манипуляция (ASK) и квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом (O-QPSK). В диапазоне 2,45 ГГц используется только модуляция O-QPSK. Приёмник сенсорной сети строится по схеме с переносом на низкую промежуточную частоту [4–6] или по гомодинной схеме [6, 7]. Перенос несущей на низкую или нулевую частоту позволяет решать проблему построения полностью интегрального приёмника, структурная схема которого не содержит внешних компонент в виде высокоизбирательного полосового фильтра на промежуточную частоту. Передатчик сенсорной сети строится по схеме с непосредственной модуляцией выходного сигнала синтезатора частот [5, 7] или по схеме с прямым переносом модулирующего сигнала на несущую частоту [4]. В первом случае учитывается, что сигналы O-QPSK близки по своим характеристикам к сигналам с постоянной огибающей. Сигнал с выхода модулятора поступает в блок синтезатора частот, где производится непосредственная модуляция высокочастотного сигнала генератора, управляемого напряжением (ГУН) (рис. 1, *а*), а не на входы смесителей (СМ), как во втором случае (рис. 1, *б*). Далее модулированный сигнал усиливается усилителем мощности (УМ) и излучается. Синтезатор частот реализуется на основе дельта-сигма модулятора в составе системы фазовой автоподстройки частоты и делителя частоты с дробным коэффициентом деления. Приёмник сенсорной сети при токе потребления от 4 до 6 мА обеспечивает значение параметра «характеристическая точка мощности интермодуляционных искажений» на выходе преселектора в среднем минус 15 дБм, чувствительность при значении вероятности появления ошибочных битов (BER) 1 % в среднем минус 92 дБм и подавление помехи по зеркальному каналу более 30 дБ для гомодинных приёмников. Передатчик сенсорной сети при токе потребления от 7,5 до 15 мА обеспечивает выходную мощность УМ от минус 2 до 3 дБм, уровень третьей гармоники порядка минус 46 дБ для УМ классов AB и C, уровень просачивания сигнала формирователя опорной частоты порядка минус 35 дБ, причём для уменьшения эффекта просачивания сигнала используется ГУН с частотой колебаний 4,8 ГГц с последующим делением частоты

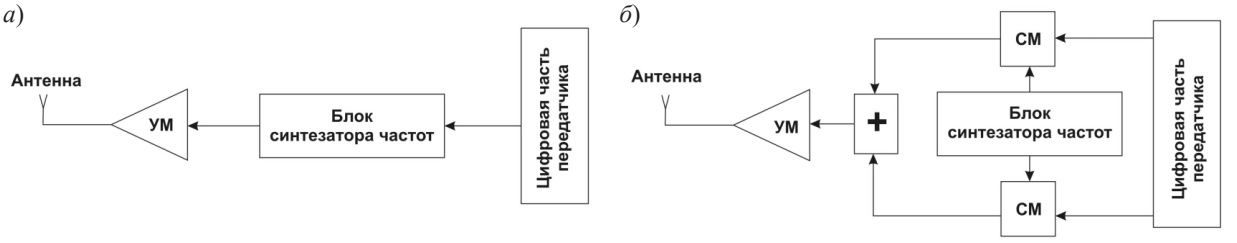


Рис. 1. Обобщённая схема передатчика сенсорной беспроводной сети:
а – с непосредственной модуляцией сигнала ГУН; *б* – с переносом на несущую частоту

на два; полоса пропускания сглаживающего ФНЧ первого–второго порядков по уровню минус 3 дБ составляет до 3 МГц; динамический диапазон тракта соответствует 4–6 разрядам. Приведённые характеристики измерены при питающем напряжении приёмопередатчиков 1,8 В. Микросхемы изготовлены по КМОП-технологии с минимальными размерами 180 нм [4, 5, 7].

Интерфейсная часть приёмопередатчика системы радиочастотной идентификации

Системы RFID, предназначенные для работы в диапазоне 13,56 МГц, основываются на использовании индуктивной связи, которая обусловлена взаимной индукцией между антеннами устройства считывания и метки. При передаче данных от метки к устройству считывания (или в обратном направлении) параметры антенной цепи метки, представляющей колебательный контур, изменяются в соответствии с передаваемыми данными. За счёт взаимного влияния контуров ток в антенной цепи устройства считывания также изменяется в соответствии с передаваемыми данными, что позволяет выделить полезный сигнал. Максимальный радиус считывания z ограничивается величиной ближней зоны электромагнитного поля: $z < \lambda/2\pi$, где λ – длина волны электромагнитного поля, излучаемого устройством считывания. На рис. 2 представлена обобщенная схема устройства считывания [8, 9]. Передающая часть устройства построена следующим образом. В блоке модуляции низкочастотный сигнал переносится на несущую частоту посредством амплитудной манипуляции. Высокочастотное модулированное колебание поступает в выходной каскад – обычно усилитель мощности с переменным коэффициентом усиления, – и излучается. В общем случае приёмная часть устройства считывания состоит из детектора или смесителя, активного ФНЧ и компаратора.

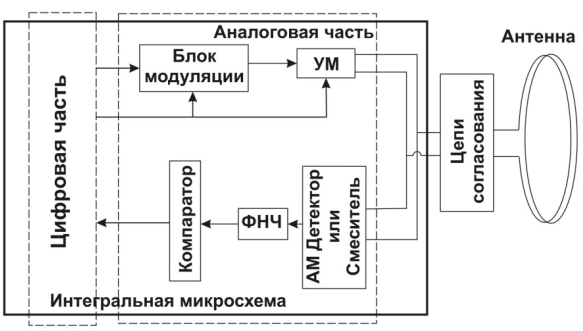


Рис. 2. Обобщенная схема устройства считывания

На рис. 3 представлена обобщенная схема радиочастотной метки. Часть принятого меткой высокочастотного колебания выпрямляется и используется для питания схемы метки. При передаче сообщения устройству считывания данные кодируются и модулируют поднесущее колебание. Параметры антенной цепи метки изменяются в соответствии с законом изменения поднесущего колебания. Таким образом, спектр сигнала оказывается смещённым относительно несущей частоты на величину поднесущей. В режиме приёма принятое колебание детектируется и обрабатывается цифровой частью микросхемы. Частоты, необходимые для работы аналоговой и цифровой части метки, формируются путём деления частоты несущей в блоке формирователя тактовых сигналов.

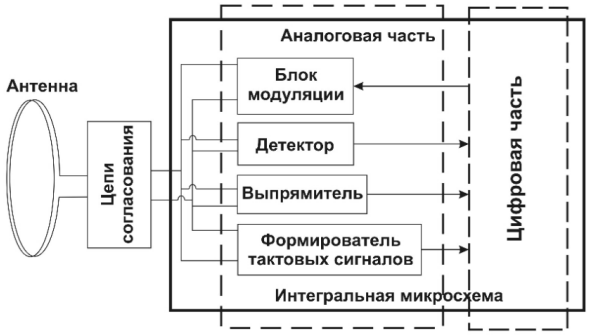


Рис. 3. Обобщенная схема радиочастотной метки

При питании 3,3 В устройства считывания обеспечивают мощность сигнала на выходе УМ от 15 до 23 дБм, сквозной коэффициент усиления «смеситель-компаратор» до 23 дБ; частота среза ФНЧ определяется поднесущей частотой и составляет порядка 850 кГц. В табл. 1 приведены основные характеристики стандартов радиочастотных систем RFID, работающих в диапазоне 13,56 МГц [8].

Выбор электронных компонентов

Построение интегрального узла считывания информации радиочастотных меток беспроводной сенсорной сети предполагает наличие приёмопередатчика, поддерживающего стандарт IEEE 802.15.4 с частотой 2,45 ГГц, приёмопередатчика, поддерживающего один или несколько стандартов системы RFID с частотой 13,56 МГц, приведённых в табл. 1, и блока управления. Обзор рынка электронных компонентов позволил выделить следующие микросхемы стандарта IEEE 802.15.4: CC2430 (Texas Instruments), EM250

Таблица 1

Стандарт	ISO 14443A	ISO 14443B	ISO 15693	ISO 1800-3
Несущая частота	13,56 МГц ± 7 кГц			
Тип модуляции, кодирование данных (считыватель–метка)	ASK 100 %, Модифицированный код Миллера	ASK 10 %, NRZ	Позиционно-импульсная модуляция (Pulse Position Modulation)	
Тип модуляции, кодирование данных (метка–считыватель)	OOK, Манчестерский код	BPSK, NRZ-L	Одна/две поднесущих частоты, Манчестерский код	
Скорость передачи данных	106 кбит/с		6,62/6,67 кбит/с 26,48/26,69 кбит/с	
Поднесущая частота	847,5 кГц		423,75/484,28 кГц	
Радиус считывания	До 10 см		До 1 м	
Полоса сигнала	1,7 МГц		1 МГц	

(Ember), MC13213 (Freescale Semiconductor), в состав которых входят приёмопередатчик и микроконтроллер как блок управления. Основные характеристики микросхем при напряжении питания 3,3 В представлены в табл. 2. Среди приёмопередатчиков системы RFID выделяются микросхемы TRF7960 (Texas Instruments), CLRC632 (NXP Semiconductor), поддерживающие стандарты ISO 14443A/B, ISO 15693. Отметим, что MC13212 не предусматривает аппаратной поддержки уровня доступа к среде, а токи потребления MC13212 и EM250 выше, чем у CC2430. Микросхема CLRC632 может работать только при напряжении питания 5 В. Таким образом, для практических разработок целесообразно рекомендовать микросхемы серий CC2430 и TRF7960 фирмы Texas Instruments.

Методика расчёта антены устройства считывания

Как отмечалось во введении, расчёт антенны является необходимым этапом разработки устройства считывания. Для уменьшения стоимости и размеров устройства целесообразно использовать рамочную антенну на основе печатной платы. В работах [10, 11] рассматривается расчёт рамочных антенн для систем радиочастотной идентификации, работающих в диапазоне 10–30 МГц. В процедуре расчёта, представленной в [10], определяются размеры антенны из условия формирования максимальной напряжённости магнитного поля H на заданном расстоянии z. Далее рассчитывается требуемая мощность передатчика. Однако на практике мощность передатчика ограничена, поэтому при заданных оптимальных размерах антенны значение H может не превышать минимального даже на малом расстоянии. Процедура расчёта, изложенная в [11], ориентирована на построение антенны для передачи максимальной мощности от считывателя к метке при известных параметрах антенной цепи метки, что не всегда возможно. Предлагаемая ниже методика позволяет рассчитать параметры прямоугольной рамочной антенны на основе печатной платы, при заданной мощности передатчика и рекомендуемом количестве витков рамки N не более четырёх. Для этого:

1. Задаётся минимально требуемое значение напряжённости магнитного поля H_{min}, требуемый радиус считывания z, исходные размеры прямоугольной рамки из соотношения $S = 2\pi z^2 = ab$. На первой итерации расчёта целесообразно положить $a = b$.

Таблица 2

Микросхема	Ток потребления, мА	Чувствительность (при BER 1 %), дБм	Избирательность	
			По соседним каналам приёма, дБ	По дополнительным каналам приёма, дБ
CC2430	≤ 27	– 92	≥ 30	≥ 53
EM250	≤ 36	– 98	≥ 35	≥ 43
MC13212	≤ 44	– 92	≥ 29	≥ 44

2. Рассчитывается индуктивность рамки согласно [12]. Проводнику каждой стороны рамки приписывается порядковый номер. Тогда взаимная индуктивность между двумя параллельными проводниками с порядковыми номерами j, m определяется как

$$M_{j,m} = 0{,}5\left[(M_{m+p} + M_{m+q}) - (M_p + M_q)\right], \quad (1)$$

где p, q – сегменты, на которые проводник с меньшей длиной, обозначенный через m, отличается от проводника с большей длиной с одной и с другой стороны. Слагаемые в правой части (1) рассчитываются как

$$M_g = 2l_g Q_g \quad [\text{нГн}], \quad (2)$$

где индекс g соответствует $m + p$, $m + q$, p, q; l_g – суммарная длина сегментов, соответствующих индексу g, причём параметр l_g указывается в см; $M_g = 0$, если g обращается в ноль;

$$Q_g = \ln\left[(l_g/d_{j,m}) + \left(1 + (l_g/d_{j,m})^2\right)^{1/2}\right] - \\ - \left[1 + (d_{j,m}/l_g)^2\right]^{1/2} + d_{j,m}/l_g, \quad (3)$$

где $d_{j,m}$ – среднегеометрическое расстояние между проводниками j и m, которое определено в [12], и в первом приближении равно расстоянию между серединами проводников. Если направление токов в элементах j, m совпадает, то $M_{j,m}$ берётся со знаком плюс. Сумма всех положительных $M_{j,m}$ обозначается через M_+. В противном случае, $M_{j,m}$ берётся со знаком минус, а сумма обозначается через M_-. Собственная индуктивность проводника j определяется выражением:

$$L_j = 0{,}002 l_j\left[\ln\left(2l_j/(w+t)\right) + 0{,}50049 + \right. \\ \left. + \left((w+t)/3l_j\right)\right] \quad [\text{мкГн}], \quad (4)$$

где l_j, w, t – длина, ширина и высота сегмента. Параметры l_j, w, t указываются в см. Все собственные индуктивности проводников L_j суммируются и сумма обозначается через L_o. Индуктивность рамки рассчитывается как

$$L_{tot} = L_o + 2M_+ + 2M_-. \quad (5)$$

Множитель 2 в (5) учитывает взаимное влияние параллельных проводников друг на друга.

3. Рассчитывается величина активной части входного сопротивления антенны в пренебрежении величиной сопротивления излучения как

$$R = 1/\left(\sigma(w+t)\delta\right), \quad (6)$$

где σ – удельная проводимость материала [См/м]; $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$ – глубина проникновения в материал [м]; μ – абсолютная магнитная проницаемость среды [Ф/м]. На практике значение L_{tot} обычно составляет 0,8–2,0 мкГн, а R – от 0,5 до 5,0 Ом.

4. Рассчитывается ток I, протекающий в витках рамки, при заданной мощности передатчика P_{out} и условии согласования антенны с питающей линией [11].

5. Рассчитывается напряжённость магнитного поля, создаваемая прямоугольной рамочной антенной считывающего устройства, на основании следующего выражения:

$$H(z) = \frac{IkabN}{\pi\sqrt{z^2 + a^2 + b^2}}\left(\frac{1}{z^2 + a^2} + \frac{1}{z^2 + b^2}\right). \quad (7)$$

6. Если напряжённость поля при заданной выходной мощности сигнала P_{out} не превосходит $H_{\min}$ на заданном расстоянии, то уменьшаются размеры рамки либо значения параметров L_{tot} и R согласно пунктам 1–3. Далее повторно выполняются пункты 4 и 5. В противном случае уменьшается значение z и повторяются пункты 1–6.

Результаты эксперимента и моделирования

На основе предложенной методики разработано приёмо-передающее устройство интегрального узла считывания для решения задачи мониторинга технологического процесса. Были выбраны метки стандарта ISO 15693 и задан радиус считывания $z = 7$ см. Для данных меток среднеквадратичное значение $H_{\min} = 0{,}15$ А/м. В результате расчёта внешние размеры рамки составили $a = 58$ мм и $b = 64$ мм при количестве витков рамки $N = 3$. Ширина и расстояние между проводниками составили $w = 0{,}4$ мм и $s = 0{,}4$ мм. Антенна выполнена на двухслойной печатной плате с следующими параметрами: тип диэлектрика FR-4, толщина диэлектрика – 1 мм, тип металлизации – медь, толщина металлизации – 35 мкм. Значения индуктивности и сопротивления рамки, полученные в результате расчёта, моделирования и эксперимента, приведены в табл. 3. Входное сопротивление антенной цепи после согласования с питающей линией (волновое сопротивление 50 Ом, частота несущей $f_0 = 15{,}56$ МГц) составило $Z_{in} = 49{,}8 - 0{,}77i$ Ом. Полоса пропускания контура составила 2,14 МГц.

Экспериментальное измерение параметров устройства считывания проводилось согласно [13]. Измеренное значение радиуса считывания составило $z = 5$ см. Отклонение 2 см по сравнению с заданным значением объясняется следую-

Таблица 3

Параметр	Расчёт	Моделирование	Эксперимент
Индуктивность, мкГн	1,75	1,73	1,63
Сопротивление, Ом	1,57	1,56	1,43

щим. Выражение (7) определяет напряжённость магнитного поля в точке, расположенной на оси рамки. Однако среднее значение H в плоскости антенны метки будет меньше из-за направленности излучения рамки. Внешний вид приёмо-передающего интегрального узла сенсорной сети приведён на рис. 4. Модуль Nanorouter N600

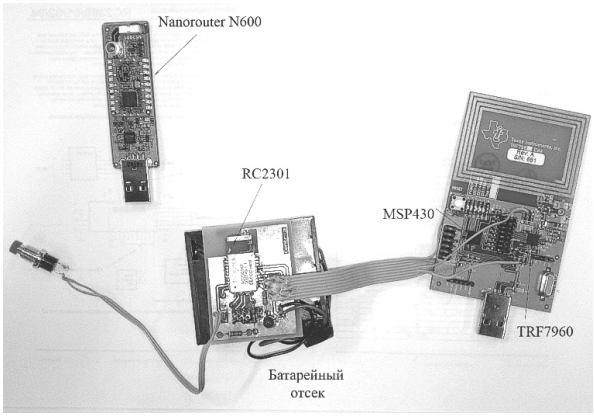


Рис. 4. Беспроводный сенсорный узл, включающий устройство считывания, и сенсорный узел (разработанная антенна к макету не подключена)

фирмы Sensinode, использовался для приёма и передачи данных сенсорного узла на персональный компьютер посредством USB интерфейса. Сенсорный узел реализован на основе модуля RC2301 фирмы Radiocrafts, включающий микросхему CC2430 и антенну, с рабочей частотой 2,45 ГГц. Устройство считывания реализовано на основе модуля TRF7960EVM, включающего микросхему TRF7960 и микроконтроллер MSP430. Для управления микросхемой TRF7960 использовался внутренний микроконтроллер микросхемы CC2430.

Разработанная антенна подключалась посредством коаксиального кабеля к модулю TRF7960EVM. Данные метки, а именно идентификационный номер, были успешно считаны и переданы посредством беспроводной сенсорной сети на персональный компьютер.

В статье представлены результаты разработки приёмо-передающего устройства считывания информации радиочастотных меток RFID для интегрального узла беспроводной сенсорной сети. Предложена методика расчёта антенны устройства считывания меток в диапазоне частот до 30 МГц. В отличие от известных методик, требующих привлечения дорогостоящих аппаратных и программных средств [11], и, как правило, предназначенных для расчётов систем с большим радиусом считывания [10], представленная методика позволяет использовать стандартные вычислительные средства. Экспериментальные исследования подтвердили достоверность данной методики.

Исследования выполнены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. по направлению «Радиофизика, акустика и электроника».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chong C.-Y., Kumar S.P.** Sensor networks: evolution, opportunities and challenges // Proc. Aug. 2003. Vol. 91. № 8. P. 1247–1256.

2. **Dehaene W., Gielen G. et al.** RFID, Where are they? // Proc. IEEE SSDRC. Sept. 2009. P. 56–63.

3. **Stuart C. et al.** Securing RPID Applications: Issues, Methods, and Controls // Information Security Journal: A Global Perspective. Sept. 2006. Vol. 15. № 4. P. 43–50.

4. **Nam I. et al.** A 2,4-GHz Low-Power Low-IF Receiver and Direct-Conversion Transmitter in 0,18-um CMOS for IEEE 802.15.4 WPAN Applications // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. April 2007. Vol. 55. № 4. P. 682–689.

5. **Kluge W. et al.** A Fully Integrated 2,4-GHz IEEE 802.15.4-Compliant Transceiver for ZigBee™ Applications // IEEE Journal of Solid-State Circuits. Dec 2006. Vol. 41. № 12. P. 2767–2775.

6. **Коротков А.С.** Интегральные (микроэлектронные) радиоприемные устройства систем связи: Обзор // Микроэлектроника, 2006. Т. 35. № 4. С. 321–341.

7. **Retz G. et al.** Radio transceivers for wireless personal area networks using IEEE 802.15.4 // IEEE Communications Magazine. Sept. 2009. Vol. 47. № 9. P. 150–158.

8. **Choi Y.-C. et al.** A Multi-standart 13,56 MHz RFID Reader System // Proc. ITC-CSCC. July 2008. P. 1073–1076.

9. **Min K.-W. et al.** An Analog Front-End Circuit for ISO/IEC 14443-Compatible RFID Interrogators // ETRI Journal. Dec. 2004. Vol. 26. № 6. P. 560–564.

10. **Aerts W. et al.** Dependence of RFID Reader Antenna Design on Read Out Distance // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Dec. 2008. Vol. 56. № 12. P. 3829–3827.

11. **Scholz P. et al.** Analysis of Energy Transmission for Inductive Coupled RFID Tags // Proc. IEEE International Conf. on RFID. March 2007. P. 183–190.

12. **Greenhouse H.M.** Design of planar rectangular microelectronic inductors // IEEE Transactions on Parts, Hybrid, and Packaging. June 1974. Vol. PHP-10. № 2. P. 101–109.

13. ISO/IEC FCD 10373-7: Identification cards – Test Methods – Part 7: Vicinity Cards. Feb. 2007.

УДК 621.396.677

О.П. Пономарев, Н.Н. Смирнов, С.М. Клишин

ГИБРИДНЫЕ ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛ С КРУГОВЫМ ПРОФИЛЕМ ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Эффективность радиолокационных станций (РЛС) во многом определяется электрическими и массо-габаритными характеристиками антенных систем (АС), к которым предъявляются высокие требования по помехозащищённости, коэффициенту усиления (КУ), полосе частот. Важными параметрами АС являются: комбинирование методов пеленгации, поляризационная избирательность, возможность гибкого управления амплитудно-фазовым распределением (АФР) поля на раскрыве. Данным качествам удовлетворяют гибридные зеркальные антенны (ГЗА), имеющие достоинства фазированных антенных решеток (ФАР) и зеркальных антенн.

Преимущества ГЗА перед другими типами апертурных антенн заключается в высоком КУ и возможности точного электронного управления лучом в секторе углов до нескольких десятков градусов диаграммы направленности (ДН) [1–5]. Дополнительные преимущества ГЗА получают при использовании в качестве отражателя зеркал с круговым профилем, например, в форме полусферы.

Известные методы коррекции сферической аберрации (использование одиночного источника, кластерного облучателя, линейного фазированного источника, контррефлектора специальной формы) рассматривают центральную область раскрыва сферического зеркала $1{,}41 \cdot a$ (a – радиус полусферы), в пределах которой лучи претерпевают однократные отражения [6–10]. Дифракция на вогнутых телах вращения даёт ряд эффектов, до настоящего времени не нашедших широкого применения для улучшения электрических характеристик сферических зеркальных антенн. Такими эффектами являются многократные отражения и эффект «шепчущей галереи», которые ярко проявляются при расположении источника поля вблизи вогнутой стенки зеркала [11].

При решении задачи дифракции плоских электромагнитных волн на идеально проводящем полусферическом зеркале методом собственных функций с использованием сферических поворотов в системе координат (r, θ, φ) получены аналитические выражения, описывающие компоненты электрического поля на раскрыве и во внутренней области полусферического отражателя с электрическим радиусом $k \cdot a$ ($k = 2\pi/\lambda$ – волновое число) [12]:

$$E_r = \sqrt{\Re(E_r)^2 + \Im(E_r)^2}\ ;\ E_\varphi = \sqrt{\Re(E_\varphi)^2 + \Im(E_\varphi)^2}\ , \quad (1)$$

где $\Re(E_r) = \dfrac{1}{(kr)^{3/2}} \sum_m A'_{\gamma_m} J_{\gamma_m}(kr) \cos\left(\gamma_m \left(\theta - \pi/2\right)\right)$;

$$\Im(E_r) = \frac{1}{(kr)^{3/2}} \sum_m A'_{\gamma_m} J_{\gamma_m}(kr) \sin\left(\gamma_m \left(\theta - \pi/2\right)\right);$$

$$\Re(E_\varphi) = \frac{1}{(kr)^{1/2}} \sum_n A'_{\gamma_n} \left(\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4\gamma_n} \right) J_{\gamma_n+1}(kr) - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4\gamma_n} \right) J_{\gamma_n-1}(kr) \right) \cos\left(\gamma_n \left(\theta - \pi/2\right)\right);$$

A'_γ – постоянные коэффициенты; γ – постоянные

распространения собственных волн полусферического отражателя; $J_\nu(kr)$ – функции Бесселя. Расчёт электрического поля вдоль оси полусферы радиусом 22,5 см демонстрирует устойчивый максимум фокусировки вблизи отражающей поверхности наряду с максимумом в окрестности параксиального фокуса $f = a/2$ как при различных амплитудных распределениях поля на раскрыве зеркала $F(kr)$ (рис.1), так и на разных частотах *X*-диапазона.

Усовершенствованный метод коррекции сферической аберрации заключается в том, что вблизи отражающей поверхности размещают дополнительные источники поверхностных электромагнитных волн (ПЭМВ) с направлением излучения вдоль отражающей поверхности [12]. За счёт фазировки дополнительных источников и основного излучателя в области параксиального фокуса, а также выбора амплитудных соотношений между ними, можно управлять уровнем бокового излучения и увеличить КУ сферической антенны. Установка амплитудно-фазовых соотношений между дискретными источниками линейного фазированного облучателя (например, секционной конструкции) и дополнительными источниками вблизи отражающей поверхности зеркала, осуществляется расчётным путём по формулам (1) для заданного АФР поля на раскрыве.

Разработана функциональная схема моноимпульсного облучателя (МИО) ГЗА на основе полусферического отражателя (рис. 2). Моноимпульсный облучатель имеет три канала. Суммарный канал сформирован излучателем (3), возбуждающим центральную область зеркала, и двумя парами (1, 2) излучателей, возбуждающих краевые области раскрыва зеркала. Центральный излучатель (3) расположен в окрестности параксиального фокуса в пределах основного максимума фокусировки поля и предназначен для возбуждения раскрыва АС, ограниченного диаметром $1{,}41 \cdot a$, где лучи претерпевают однократные отражения от зеркала. Пара излучателей (2) размеща-

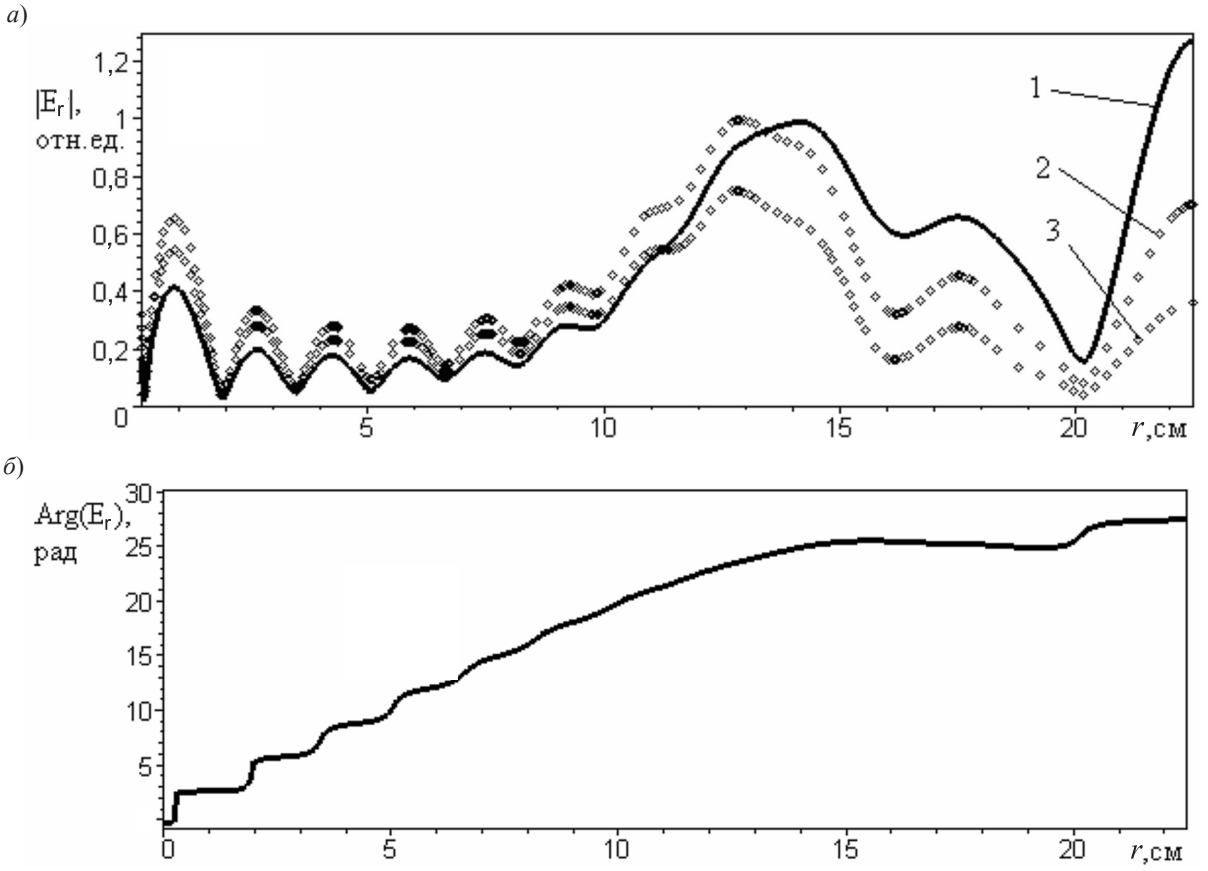


Рис.1. Амплитудное (*а*) и фазовое (*б*) распределение компоненты E_r вдоль оси полусферического зеркала на длине волны $\lambda = 3{,}14$ для:
$1 - F(kr) = 1$; $2 - F(kr) = 0{,}5 + \left(1 - (kr/(ka))^2\right)^3$; $3 - F(kr) = 0{,}25 + \left(1 - (kr/(ka))^2\right)^3$

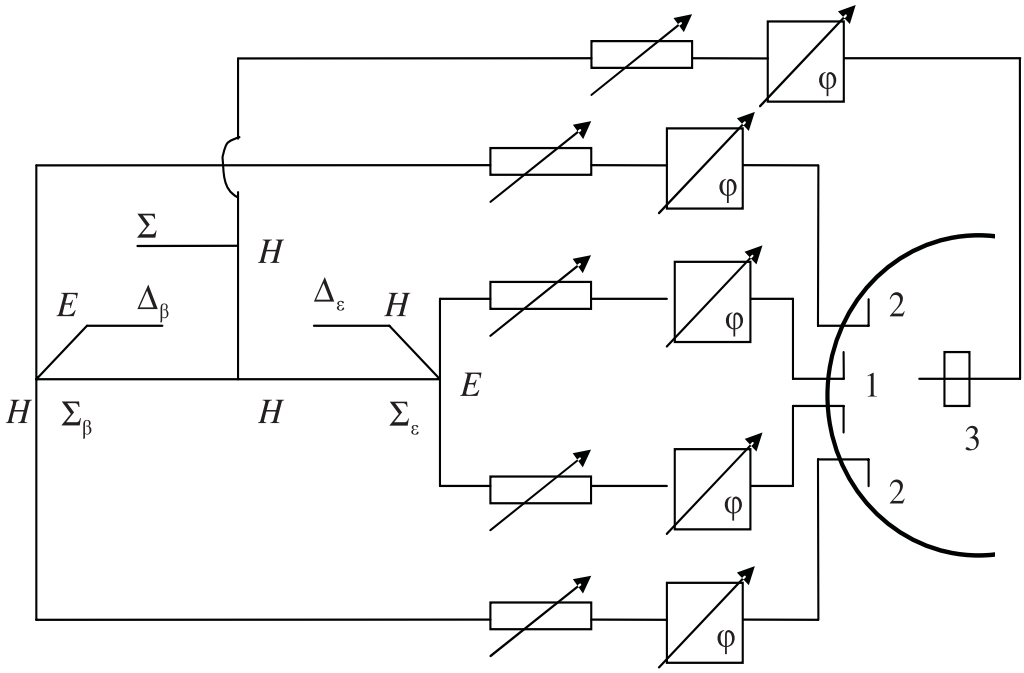


Рис. 2. Структурная схема МИО сферической зеркальной антенны

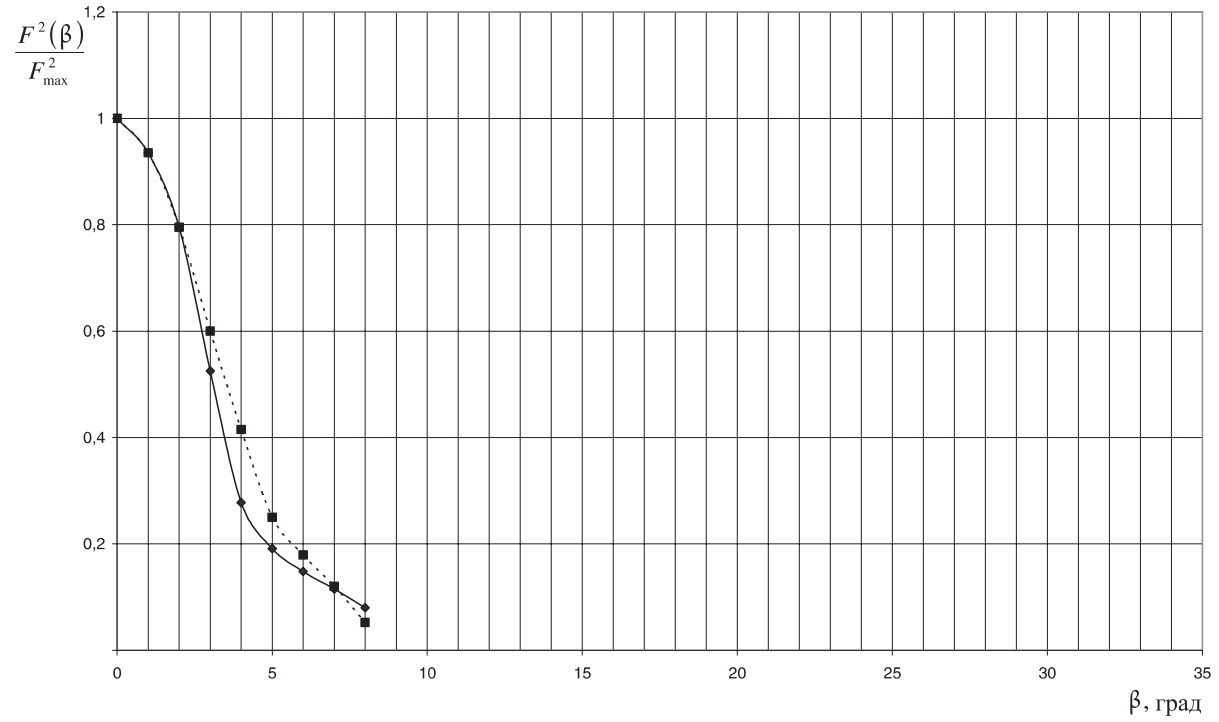
ется в вертикальной плоскости непосредственно вблизи отражающей поверхности и возбуждает краевые области раскрыва ПЭМВ в вертикальной плоскости. В качестве облучателей (1) может использоваться пара микрополосковых антенн с направлением излучения в противоположные стороны. Аналогичные излучатели (2) располагаются в горизонтальной плоскости с направлением излучения в противоположные стороны компонентой E_φ. Пара излучателей (1, 2) образует суммарный $\Sigma_{\varepsilon(\beta)}$ и разностный $\Delta_{\varepsilon(\beta)}$ каналы МИО, где сигналы угловой информации и частные суммарные сигналы выделяются на двойных волноводных тройниках (кольцевых мостах). Фазировка каналов производится с помощью аттенюаторов и фазовращателей с плавной регулировкой амплитуды и фазы в каналах. За счёт регулирования амплитудных и фазовых соотношений между основным и дополнительным облучателями волноводного типа экспериментально получена диаграмма направленности (ДН) сферической ГЗА диаметром 30 см на длине волны 3 см с уровнем первого бокового лепестка не выше –36 дБ (рис. 3). Пунктир соответствует облучению зеркала открытым концом прямоугольного волновода МЭК-100, расположенного в основном максимуме фокусировки поля в окрестности параксиального фокуса. Сплошная линия – ДН антенны при сфазированном возбуждении раскрыва основным и дополнительным облучателями ПЭМВ.

Дополнительный облучатель состоит из двух волноводов, изогнутых в плоскости вектора и излучающих энергию в противоположные стороны симметрично продольной оси зеркала. Наличие дополнительных источников увеличивает КУ сферической АС на 10–12 % при значительном уровне подавления первого бокового лепестка суммарной ДН.

Рассмотрим проблему уменьшения размеров облучающего устройства моноимпульсной сферической двухчастотной антенны с поляризационной селекцией сигналов многофункциональной РЛС. Для решения данной проблемы сферическая антенна с полусферическим зеркалом (34) (рис. 4) имеет облучающее устройство (35), работающее на рабочих частотах f_1, f_2 (в общем случае частоты могут совпадать), устройство суммарно-разностной обработки сигналов вертикальной (36) и горизонтальной (37) поляризации, фазовращатели (ФВ) (38–40), устройства управления поляризацией (41–43).

Облучающее устройство (35) состоит из основного МИО (44), работающего на частоте f_1, фазовый центр которого расположен в окрестности параксиального фокуса, и дополнительного МИО, работающего на частоте f_2 и состоящего

а)



б)

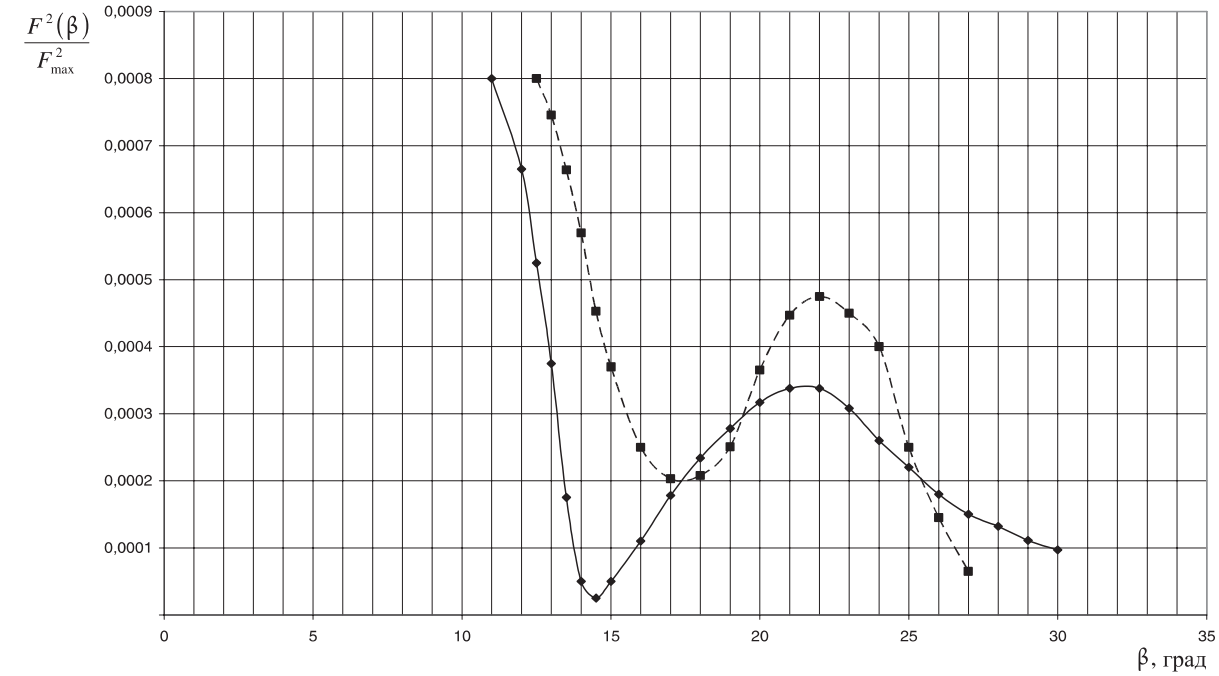


Рис. 3. Нормированная диаграмма направленности сферической антенны:
а – основной лепесток; *б* – первый боковой лепесток

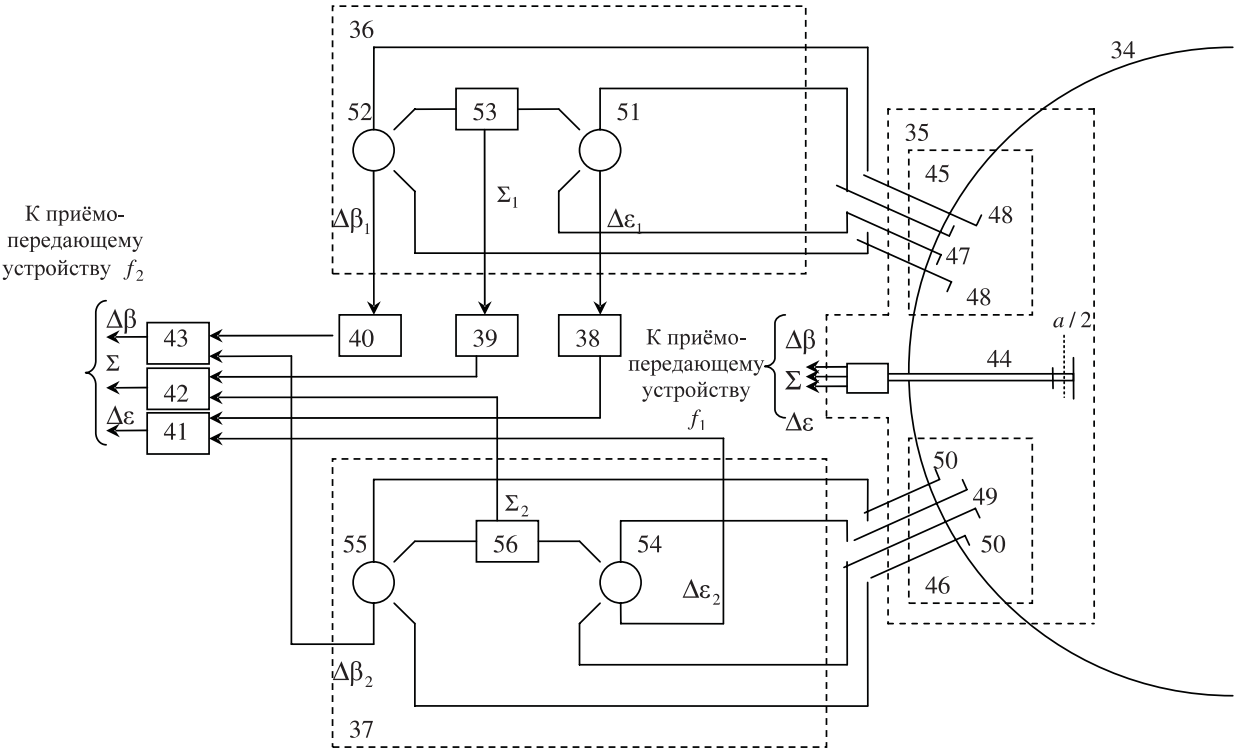


Рис. 4. Моноимпульсная двухчастотная сферическая ГЗА с поляризационной селекцией сигналов

из двух групп одиночных излучателей (45, 46). С выхода основного МИО (44) суммарный сигнал и разностные сигналы по углу места и азимуту $\Delta\varepsilon$, $\Delta\beta$ поступают в приёмо-передающее устройство частоты f_1. Первая группа излучателей (45) дополнительного МИО работает на вертикальной поляризации поля и состоит из четырёх одиночных излучателей, попарно расположенных в вертикальной и горизонтальной плоскостях вблизи оси симметрии зеркала с направлением излучения вдоль вогнутой отражающей поверхности полусферического зеркала в противоположные стороны. Первая пара излучателей (47) расположена перед зеркалом, а вторая пара (48) – в плоскости, перпендикулярной той, в которой расположены излучатели первой пары, и их апертуры удалены от зеркала на расстояние $0{,}5 \cdot C/f_2$ (C – скорость света в свободном пространстве). Вторая группа излучателей (46) работает на горизонтальной поляризации поля и состоит из четырёх одиночных излучателей, аналогичных группе излучателей (45) и отличающихся тем, что апертуры первой пары излучателей (49) удалены от зеркала на расстояние $0{,}5 \cdot C/f_2$ и излучают ПЭМВ в том же направлении, что и первая пара одиночных излучателей (47) первой группы излучателей (45), а вторая пара излучателей (50) расположена перед зеркалом и излучает ПЭМВ в том же направлении, что и вторая пара одиночных излучателей (48) первой группы излучателей (45). Выходы одиночных излучателей (47, 48) первой группы (45) соединены со входами кольцевых мостов (51, 52), на разностных выходах которых образуются сигналы ошибки по углу места и азимуту $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\beta_1$, а суммарные выходы кольцевых мостов соединены на сумматоре (53), на выходе которого образуется суммарный сигнал Σ_1. Выходы одиночных излучателей (49, 50) второй группы (46) соединены со входами кольцевых мостов (54, 55), на разностных выходах которых образуются сигналы ошибки по углу места и азимуту $\Delta\varepsilon_2$, $\Delta\beta_2$, а суммарные выходы кольцевых мостов соединены на сумматоре (56), на выходе которого образуется суммарный сигнал Σ_2. Суммарно-разностные сигналы вертикальной поляризации Σ_1, $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\beta_1$ с разностных выходов кольцевых мостов (51, 52) и выхода сумматора (53) через ФВ с плавной регулировкой фазы (38–40) соединены с первыми входами устройств управления поляризацией (41–43). Суммарно-разностные сигналы горизонтальной поляризации Σ_2, $\Delta\varepsilon_2$, $\Delta\beta_2$ с разностных выходов кольцевых мостов (54, 55) и выхода

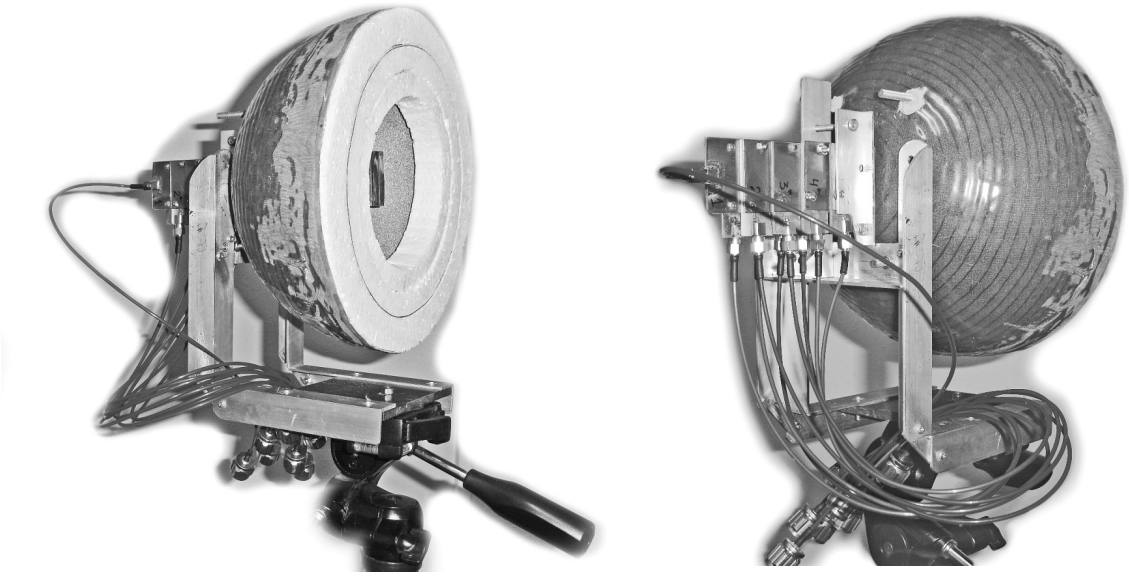


Рис. 5. Макет СДАР с пакетированным облучателем на 10 ГГц

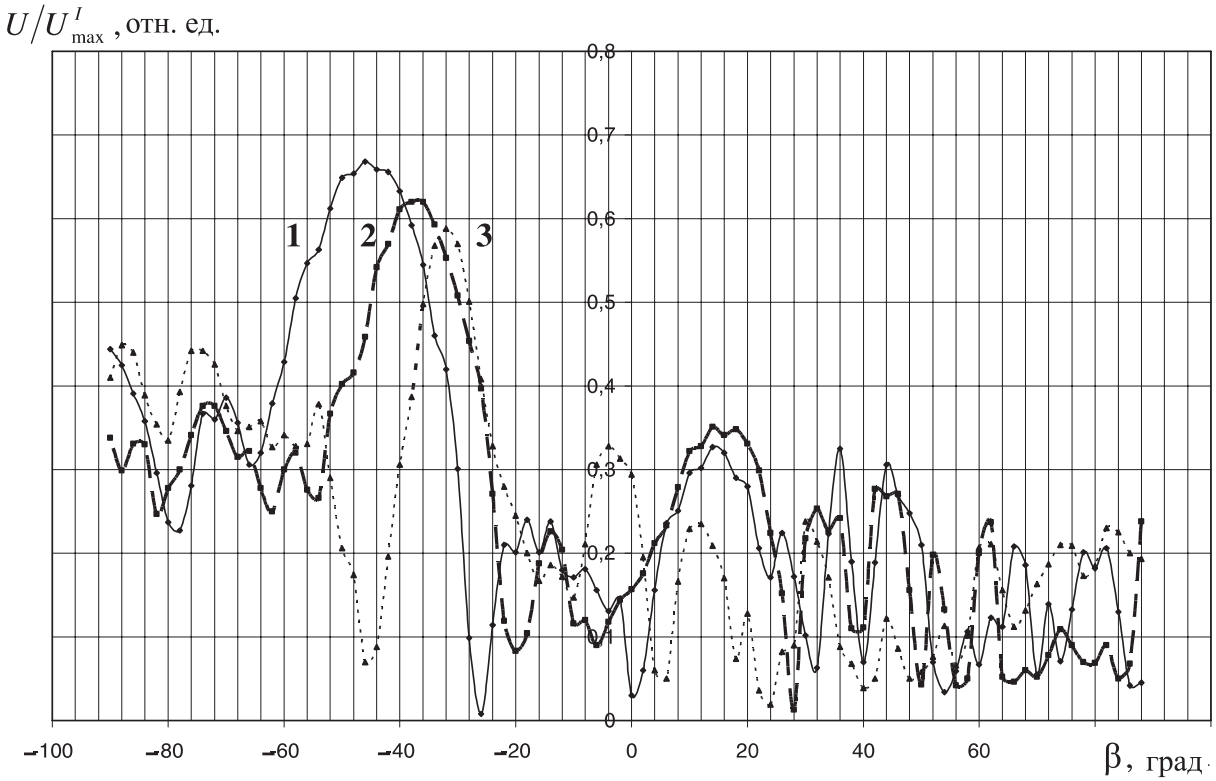


Рис. 6. Парциальные диаграммы направленности СДАР

сумматора (56) соединены со вторыми входами устройств управления поляризацией (41–43). С выходов устройств управления поляризацией (41–43) суммарный сигнал Σ и сигналы ошибки по углу места и азимуту Δε, Δβ поступают в приёмо-передающее устройство частоты f_2. Так как излучатели дополнительного МИО расположены вблизи вогнутой отражающей поверхности зеркала с направлением излучения вдоль неё, облучатель не создаёт области тени на раскрыве антенны.

За счёт излучения ПЭМВ на раскрыв в диаметрально противоположные точки, сферическая антенна на частоте f_2 представляет собой угловой датчик фазового суммарно-разностного координатора цели с точностью пеленгации выше, чем при амплитудной суммарно-разностной обработке информации с помощью основного моноимпульсного облучателя, работающего на частоте f_1. Таким образом, дополнительным преимуществом данной сферической антенны является комбинирование методов пеленгации: амплитудного и фазового. При равенстве частот $f_1 = f_2$ коэффициент усиления моноимпульсной сферической антенны повышается на 10–12 %. Облучающее устройство моноимпульсной двухчастотной сферической антенны с поляризационной селекцией сигналов конструируется с учётом дифракционных свойств полусферического отражателя.

Принципиально новое решение при конструировании ГЗА представляет сферическая дифракционная антенная решётка (СДАР), состоящая из набора соосно расположенных полусферических отражателей с общей плоскостью раскрыва, и составного облучателя в виде источников (приёмников) волн волноводного типа в дифракционных элементах. Сферическая дифракционная антенная решётка состоит из n соосных полусферических зеркал с общим раскрывом, $4 \cdot n$ дискретных излучателей, размещённых вблизи оси антенной решётки, и представляет неэквидистантную антенную решетку «вытекающих» волн. С точки зрения электродинамических свойств СДАР состоит из дифракционных элементов (ДЭ), образованных двумя соседними полусферическими отражателями, возбуждаемыми четырьмя изолированными излучателями. Каждый ДЭ имеет парциальную ДН и обеспечивает реализацию фазового метода пеленгации целей [14].

Проведены измерения ДН СДАР, состоящей из четырех зеркал с радиусами $a_1 = 12{,}6$ см, $a_2 = 9{,}79$ см, $a_3 = 7{,}89$ см, $a_4 = 6{,}28$ см на длине волны 3 см. Для данной СДАР разработан пакетированный полосковый облучатель диапазона 10 ГГц (рис. 5). Парциальные ДН каждого ДЭ измерялись при горизонтальной поляризации падающей на раскрыв волны из дальней зоны на частоте 10 ГГц. Форма и положение максимумов парциальных ДН СДАР для правого набора излучателей вытекающих волн пакетированного облучателя представлены на рис. 6. Угловой разнос парциальных ДН относительно нуля (фазового центра антенны): для первого (наибольшего) ДЭ составляет 46° (кривая 1), для второго ДЭ – 38° (кривая 2), для третьего ДЭ – 32° (кривая 3).

В результате исследований проведён электродинамический анализ сферических зеркальных антенн и дифракционных антенных решёток сферического типа. Доказано преимущество сферических ГЗА и дифракционных решёток перед ГЗА с параболическим зеркалом и плоскими ФАР по КУ. Дифракционные антенные решётки позволяют: управлять АФР поля на всем раскрыве; обеспечивать высокий коэффициент использования поверхности за счёт того, что активные элементы, излучая энергию в направлении раскрыва антенны, не затеняют основное и корректирующие зеркала; реализовывать простую систему возбуждения облучателей, сравнимую с системой возбуждения обычной линейной ФАР; использовать фазовый метод пеленгации целей на основе многобазовой системы.

Экспериментально исследованы электрические характеристики СДАР сантиметрового диапазона. Измерено амплитудное распределение поля в ДЭ. Разработаны пакетированные конструкции облучателей СДАР, проведено их численное моделирование и экспериментальное исследование. Изучены ДН поля в дальней зоне, соответствующие дифракционным элементам СДАР. Форма ДН свидетельствует о возможности их использования в составе угловых координаторов с амплитудной и фазовой пеленгацией целей. Экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о перспективе использования СДАР в качестве многофункциональных многолучевых ГЗА для РЛС сантиметрового диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алимова Л.И., Кинбер Б.Е., Классен В.И. и др.** Возможность широкоугольного сканирования в гибридных зеркальных антеннах // Радиотехника и электроника. 1981. № 1. С. 2500–2510.

2. **Кинбер Б.Е., Классен В.И., Тоболев А.К. и др.** Экспериментальная проверка отклонения луча гибридной зеркальной антенны в широком секторе углов // Радиотехника и электроника. 1984. № 8. С. 1462–1471.

3. **Арестов В.В., Балаганский В.С., Гусевский В.И. и др.** Проблема фазового синтеза ДН ГЗА / Сб. науч. тр. «Век радио: Перспективные пути развития антенных систем космической связи, теории управления и распознавания образов». Екатеринбург: УрО РАН, 1996. С. 29–55.

4. **Классен В.И., Тоболев А.К., Шишлов А.В.** Характеристики излучения гибридной зеркальной антенны в полосе частот // Радиотехника. 1985. № 9. С.69–72.

5. **Архипов Н.С., Гряник М.В., Ломан В.И. и др.** Гибридные зеркальные антенны // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 12. С. 62–77.

6. **Tingye Li.** A Study of Spherical Reflectors as Wide-Angle Scanning Antennas // IRE Trans. on Antennas and Propagation. July 1959. P. 223–226.

7. **Spencer R.C., Sletten C.J., Walsh J.E.** Correction of Spherical Aberration by a Phased Line Source // Proc. N.E.C. 1949. Vol. 5. P. 320–333.

8. **Schell A.C.** The Diffraction Theory of Large-Aperture Spherical Reflector Antennas // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. July 1963. P. 428–432.

9. **Геруни И.М.** Вопросы расчета сферических двухзеркальных антенн // Радиотехника и электроника. 1964. № 1. С. 3–12.

10. **Бахрах Л.Д., Вавилова Н.В.** Сферические двухзеркальные антенны // Радиотехника и электроника. 1961. № 7. С. 1146–1156.

11. **Краснушкин П.Е., Мустель Е.Р.** О прилипании электромагнитных волн к вогнутой металлической поверхности // ДАН СССР. 1946. Т. LIV. № 3.

12. **Пономарев О.П.** Решение уравнений Максвелла в сферической системе координат с использованием группы вращений. Приложение для сферических зеркальных антенн // Радиотехника. 2006. № 4. С. 77–78.

13. **Пономарев О.П., Брюханов В.В.** Зеркальная антенна. Патент РФ на изобретение № 2359375, МПК 19/17 (2006.01), опубл. 20.06.2009. Бюлл. № 17.

14. **Пономарев О.П.** Дифракция электромагнитных волн на вогнутых поверхностях кругового профиля. Приложение для гибридных зеркальных антенн // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2008. Т. 72. № 12. С. 1762–1766.

УДК 519.8

А.С. Веремчук, В.Ф. Волков

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАТАСТРОФОУСТОЙЧИВОСТЬЮ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Практика последних лет показывает, что информационно-управляющие системы (ИУС) многих организационно-технических систем оказались не готовы к случайному одновременному воздействию нескольких неблагоприятных факторов даже в мирное время. Известными примерами являются энергетические катастрофы в Северной Америке и Англии, сбои энергоснабжения в мае 2005-го в Москве и в январе 2009-го в Санкт-Петербурге. В связи с этим специалистами по ИУС стали прорабатываться вопросы обеспечения катастрофоустойчивости. Под катастрофоустойчивостью ИУС понимается способность системы сохранять критически важные данные и продолжать выполнение своих функций после уничтожения ключевых компонентов в результате воздействия техногенных, природных, диверсионных факторов [1, 2, 4].

Подробный анализ показывает [2, 3], что функционирование ИУС можно представить как марковский процесс перехода с одного уровня катастрофоустойчивости (УКУ) на другой. Следует отметить, что термин «катастрофоустойчивость» используется авторами для усиления значимости цепочки событий: «незначительный» отказ → сбой в функционировании ИУС → срыв информационного обеспечения целевого процесса (бизнес-процесса, функционирования потенциально опасной системы, производственного процесса и т. д.) → невыполнение основной организационно-технической системой плановой задачи.

Введём в рассмотрение пять уровней катастрофоустойчивости (возможны и другие варианты). *Первый уровень* катастрофоустойчивости ИУС обладает следующими характеристиками: разработан план восстановления после катастрофы; выполняется ежесуточное резервное копирование на отдельный носитель, который вручную доставляется во внешнее хранилище, находящееся вне зоны действия возможной катастрофы. *Первый этап* (переход на второй уровень УКУ) характеризуется наименьшими затратами, но уровень катастрофоустойчивости остаётся низким. *Второй уровень*: на резервном центре существует вычислительный комплекс, запас производительности, которого достаточен для обработки передаваемых данных; имеющиеся средства долговременного хранения информации обеспечивают принятую организацию периодического копирования данных в обычных условиях; на ВЦ организовано только хранение съёмных машинных носителей. *Для второго этапа* характерны затраты, необходимые для достижения третьего уровня катастрофоустойчивости. *Третий уровень:* определён резервный ВЦ, на котором будет восстанавливаться система; выполняется ежесуточное резервное копирование части критических и некритических данных на локально находящийся носитель; носитель с резервной копией хранится во внешнем хранилище, находящемся вне зоны действия возможной катастрофы; доставка носителя с резервной копией осуществляется «вручную». *Третий этап* является наиболее затратным, т. к. происходит максимальное укомплектование системы техническими и программными средствами, определяется и доукомплектовывается штатная структура. *Четвёртый уровень*: на запасном ВЦ, на который планируют осуществить передачу обработки данных, постоянно функционирует хранилище данных и организована работа с ними; регулярно осуществляется оперативная актуали-

зация данных временного хранения по изменениям баз данных (с использованием системных журналов СУБД) и файлов; обслуживающий персонал, осуществляющий первоначальный запуск системы и возобновление обработки данных, постоянно находится на ВЦ; как на основном, так и на резервном ВЦ имеются в наличии вычислительные комплексы с кластерной организацией, образующие территориально распределённую структуру. *Четвёртый этап* предполагает незначительные затраты для перехода на следующий уровень катастрофоустойчивости. *Пятый уровень*: система обладает максимальной степенью катастрофоустойчивости; обслуживающий персонал проводит незначительные корректировки в системе, которые обеспечивают общую устойчивость в случае возникновения внештатных ситуаций.

Традиционным показателем, используемым в теории живучести и надёжности, является коэффициент готовности $К_Г$. Он рассчитывается путём составления и решения уравнений Колмогорова. Однако детальный анализ показал, что величина $К_Г$ в нашей задаче зависит от момента $t_к$ наступления «катастрофы». Этот момент целесообразно рассматривать как случайный, подчинённый тому или иному закону распределения. Поэтому $К_Г$, как функция случайного аргумента, также является случайной величиной $К_Г = f(t_К)$. В качестве показателя катастрофоустойчивости ИУС целесообразно принять величину $P = P(К_Г \geq К^{тр})$, т. е. гарантированную вероятность обеспечения непрерывности управления. Для получения значения этой вероятности можно использовать аналитическое или численное выражение зависимости величины $К_Г(t)$ от времени на интервале планирования выполнения целевой задачи (на сутки вперёд, на квартал вперёд, на год вперёд и т. д.). Первым шагом для получения этой зависимости является имитационное моделирование, вторым – сбор, систематизация и обработка фактической (экспериментальной) информации.

Из вышеизложенного следуют две постановки задачи управления катастрофоустойчивостью ИУС АСУ. В качестве первой целесообразно рассматривать вариационную задачу отыскания функции $\tilde{\tilde{E}}_{\tilde{A}}(t)$, оптимизирующей процесс приведения ИУС к заданному УКУ. Показателями оптимизации могут выступать либо время восстановления работоспособности при заданных затратах, либо затраты на восстановление работоспособности при ограничении на срок восстановления. В качестве второй задачи целесообразно исследовать управление расходами на корректировку процесса приведения ИУС к заданному УКУ. Рассмотрим один из подходов к решению второй задачи. Так как исход каждого из этапов приведения ИУС к заданному УКУ определяется действием многих организационно-технических факторов, в т. ч. случайных, то цикл приведения представляет собой случайную последовательность, которая может быть реализована за заданное время $z^{пл}$ только с некоторой вероятностью $\gamma \to 1$, а продолжительность $\hat{t}_v$ каждого из этапов представляет собой непрерывную случайную величину (СВ). Параметры распределения $A_{\langle K_v \rangle}$ этой СВ жестко связаны с плановыми характеристиками этапов. Например, при экспоненциальном распределении продолжительности v-го этапа:

$$\lambda_v = \bar{t}_v^{-1} = (t_v^{пл})^{-1}. \qquad (1)$$

Пусть реализовано $v - 1$ этапов процесса приведения ИУС к заданному УКУ, т. е.:

$$\hat{z}/T^*_{\langle v-1 \rangle} = \hat{z}_{v-1} = \sum_{i=1}^{v=1} t_i^* + \hat{t}_v + ... + \hat{t}_N . \qquad (2)$$

Индикатором возможности выполнения комплекса работ по приведению ИУС в заданное время $z^{пл}$ является вероятность выполнения плана приведения ИУС, которая с учётом исхода $(v - 1)$ этапов (т. е. с учётом наметившегося опоздания), вычисляется по формуле:

$$\gamma^*_{v-1} = \int_0^{z^{пл}} \gamma_{\hat{z}/T^*_{\langle v-1 \rangle}}(t)dt ,$$

где $\varphi_{\hat{z}/t_1^*}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ju(\hat{t}-t_1^*)} du \prod_{i=2}^{N} \int_{-\infty}^{\infty} e^{jux} \varphi_{\hat{t}_i}(x, A_{\langle K_i \rangle})dx$.

При $\gamma^*_{v-1} = \gamma$ корректируется либо программа работ на всех оставшихся $(v - i, (v + 1) - i, ..., N - i)$ этапах, либо программа работ только на $v - i$ этапе. В данной статье будем говорить о корректировке только на $v - i$ этапе (корректировка первого типа).

В этом случае:

$$A'_{\langle Kv \rangle} = A_{\langle K_v \rangle} + Y_{\langle K_v \rangle}; \qquad (3)$$

$$\Delta s^{(v)} = \Delta s^{(v)}(Y_{\langle K_v \rangle}). \qquad (4)$$

Таким образом, возникает задача по определению таких значений $\widetilde{Y}_{\langle K_v \rangle}$ вектора корректировки на каждом этапе процесса, при которых дополнительные затраты, обеспечивающие выполнение всех работ в заданное время $z^{пл}$ с вероятностью γ, минимальны:

$$\Delta s(\tilde{Y}_{\langle K_2\rangle},...,\tilde{Y}_{\langle K_N\rangle}) =$$
$$= \sum_{\nu=2}^{N} \Delta s^{(\nu)}(\tilde{Y}_{\langle K_N\rangle}) \Rightarrow \min_{\{Y\}} \Delta s(Y_{\langle K_2\rangle},...,Y_{\langle K_N\rangle}), \quad (5)$$

и выполняются ограничения:

$$\gamma_1^*(t_1^*, \tilde{Y}_{\langle K_1\rangle}) = \gamma; \quad \gamma_2^*(t_1^*, t_2^*, \tilde{Y}_{\langle K_2\rangle}) = \gamma;$$

при $$\varphi_{\hat{t}_2}(t) = \varphi_{\hat{t}_2}\left(t, A_{\langle K_2\rangle} + \tilde{Y}_{\langle K_1\rangle}\right); \quad (6)$$

$$\gamma_{N-1}^*(t_1^*, t_2^*, ..., t_{N-1}^*, \tilde{Y}_{\langle K_{N-1}\rangle}) = \gamma;$$

при $$\varphi_{\hat{t}_{N-1}}(t) = \varphi_{\hat{t}_{N-1}}\left(t, A_{\langle K_{N-1}\rangle} + \tilde{Y}_{\langle K_{N-2}\rangle}\right).$$

Поясним постановку и решение задачи на примере и разработаем алгоритм оптимального управления катастрофоустойчивостью для случая четырёхэтапного процесса и экспоненциального распределения продолжительности t_i. Такая ситуация может возникнуть, например, при проведении операции по последовательному восстановлению работоспособности ИУС по схеме, указанной на рисунке.

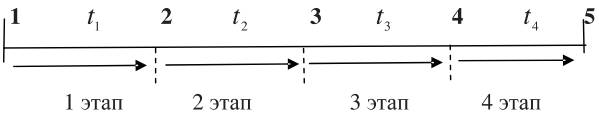


Схема проведения операции

Функция распределения продолжительности этапа имеет вид: $F_{\hat{t}_\nu}(x) = 1 - e^{-\wedge_\nu x}$ $[\nu = 1(1)4]$, т. е. $\hat{z} = \hat{t}_1 + \hat{t}_2 + \hat{t}_3 + \hat{t}_4$. Будем исходить из того, что затраты на корректировку плана на первом этапе пропорциональны величине «опоздания»:

$$\Delta s^{(\nu)} \sim t_1^* - t_1^{\Pi\wedge} + ... + \hat{t}_{\nu-1} - t_{\nu-1}^{\Pi\wedge} \quad [\nu = 2(1)N], \quad (7)$$

$$\text{но } t_1^{\text{пл}} = 1/\Lambda_1;\ M_{\hat{t}_2} = 1/(\Lambda_2 + y_1);\ t_2^{\text{пл}} = 1/\Lambda_2;$$
$$M_{\hat{t}_3} = 1/(\Lambda_3 + y_2);\ t_3^{\text{пл}} = 1/\Lambda_3. \quad (8)$$

Применим к левой и правой частям (7) операцию математического ожидания и обозначим $M[\Lambda\hat{s}^{(\nu)}] = \Delta s^{(\nu)}$, тогда $\Delta s^{(\nu)} \sim t_1^* - t_1^{\Pi\wedge} + ... + 1/(\Lambda_3 + y_2) - 1/\Lambda_3$.

В качестве параметра состояния управляемого процесса выберем математическое ожидание $M[\hat{x}] = x$ случайной величины $\hat{x}$ – «сдвига» («опоздания») времени проведения работ; в соответствии с (8) значения параметра состояния равны:

$$x_1 = t_1^* - 1/\Lambda_1$$
$$x_2 = x_1 - y_1/(\Lambda_2(\Lambda_2 + y_1))$$
$$x_3 = x_2 - y_2/(\Lambda_3(\Lambda_3 + y_2)). \quad (9)$$

Технико-экономический анализ показывает, что

$$\Delta s^{(\nu)}(x_{\nu-1}, y_{\nu 1}) \sim x_{\nu=1}$$
$$\Delta s^{(\nu)}(x_{\nu-1}, y_{\nu 1}) \sim f_1^{(\nu)}(\Delta M[\hat{t}_\nu])$$
$$\Delta l^{\nu}(x_{\nu-1}, y_{\nu 1}) \sim f_2^{(\nu)}(\Delta\sigma[\hat{t}_\nu]), \quad (10)$$

но $M[\hat{t}_\nu] = M'[\hat{t}_\nu] - M[\hat{t}_\nu] = 1/(\Lambda_\nu + y_{\nu 1}) - 1/\Lambda_\nu = (-y_{\nu 1})/(\Lambda_\nu(\Lambda_\nu + y_{\nu 1}))$,

$\sigma[\hat{t}_\nu] = \sigma'[\hat{t}_\nu] - \sigma[\hat{t}_\nu] = 1/(\Lambda_\nu + y_{\nu 1}) - 1/\Lambda_\nu = (-y_{\nu 1})/(\Lambda_\nu(\Lambda_\nu + y_{\nu 1}))$,

тогда:

$$\Delta s^{(\nu)} \sim x_{\nu-1},$$
$$\Delta s^{(\nu)} \sim f_1^{(\nu)}((-y_{\nu-1})/(\Lambda_\nu(\Lambda_\nu + y_{\nu 1}))),$$
$$\Delta s^{(\nu)} \sim f_2^{(\nu)}((-y_{\nu-1})/(\Lambda_\nu(\Lambda_\nu + y_{\nu 1}))).$$

В конечном итоге функция затрат примет вид:

$$\Delta s^{(\nu)} = C_{\nu-1}^{x} x_{\nu-1} + C_{\nu-1}^{\Delta m} \frac{y_{\nu-1}^2}{\Lambda_\nu^2(\Lambda_\nu + y_{\nu-1})^2} -$$
$$- C_{\nu-1}^{\Delta\sigma} \frac{y_{\nu-1}^2}{\Lambda_\nu^2(\Lambda_\nu + y_{\nu-1})^2}. \quad (11)$$

Пусть $t_1 = t_1^*$. Вероятность выполнения работ по приведению к заданному УКУ цикла в заданный срок $z^{\text{пл}}$ с учётом исхода t_1^* первого этапа равна:

$$\gamma_1^* = -\frac{\Lambda_3\Lambda_4}{(\Lambda_2 - \Lambda_4)(\Lambda_2 - \Lambda_3)} e^{-\Lambda_2(z^{\text{пл}} - t_1^*)} + \frac{\Lambda_3\Lambda_4}{(\Lambda_2 - \Lambda_4)(\Lambda_2 - \Lambda_3)} -$$
$$- \frac{\Lambda_2\Lambda_4}{(\Lambda_2 - \Lambda_3)(\Lambda_4 - \Lambda_3)} e^{-\Lambda_3(z^{\text{пл}} - t_1^*)} + \frac{\Lambda_2\Lambda_4}{(\Lambda_2 - \Lambda_3)(\Lambda_4 - \Lambda_3)} +$$
$$+ \frac{\Lambda_2\Lambda_3}{(\Lambda_4 - \Lambda_3)(\Lambda_2 - \Lambda_4)} e^{-\Lambda_4(z^{\text{пл}} - t_1^*)} - \frac{\Lambda_2\Lambda_3}{(\Lambda_4 - \Lambda_3)(\Lambda_2 - \Lambda_4)} = \quad (12)$$
$$= \theta_1(\Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_4, t_1^*, z^{\text{пл}}).$$

При $\gamma_1^* < \gamma$ (возникла угроза невыполнения задачи) проводим новую корректировку: $\Lambda'_2 = \Lambda_2 + y_1$, где y_1 – значение параметра корректировки. Средние затраты на корректировку равны: $\Delta s^{(2)} = \Delta s^{(2)}(x_1, y_1)$, а параметр корректировки должен удовлетворять ограничение: $\theta_1(\Lambda_2 + y_1, \Lambda_3, \Lambda_4, z^{\text{пл}}, t_1^*) = \gamma$.

Пусть $t_2 = t_2^{**} = t_2^*(y_1)$. Вероятность γ_2^{**} равна:

$$\gamma_2^{**} = \theta_2(\Lambda_3, \Lambda_4, t_1^{**}, t_2^{**}, z^{\text{пл}}). \quad (13)$$

При $\gamma_2^{**} < \gamma$: $\Lambda'_3 = \Lambda_3 + y_2$ – новая корректировка параметра распределения продолжительности 3-го этапа; $\Delta s^{(3)} = \Delta s^{(3)}(x_2, y_2)$ – средние затраты на корректировку на 3-м этапе, где $x_2 = x_1 - \frac{y_1}{\Lambda_2(\Lambda_2 + y_1)}$; $\eta_{2,3}(x_1, y_1, y_2) = \Delta s^{(2)}(x_1, y_1) + \Delta s^{(3)}(x_2, y_2)$ – среднее значение суммарного показателя эффективности корректировки; $\theta_2(\Lambda_3 + y_2, \Lambda_4, t_1^*, t_2^{**}, z^{\text{пл}})$ – ограниче-

ние на параметр корректировки.

Пусть $t_3 = t_3^{**} = t_3^*(y_2)$. Вероятность γ_3^{**} равна:

$$\gamma_3^{**} = 1 - e^{-\Lambda_4 (z^{\text{пл}} - t_1^{**} - t_2^{**} - t_3^{**})} = \theta(\Lambda_4, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{**}, z^{\text{пл}}). \quad (14)$$

При $\gamma_3^{**} < \gamma$: $\Lambda'_4 = \Lambda_4 + y_3$ – корректировка параметра распределения продолжительности 4-го этапа; $\Delta s^{(4)} = \Delta s^{(4)}(x_3, y_4)$ – средние затраты на корректировку на 4-м этапе;

где $x_3 = x_2 - \dfrac{y_2}{\Lambda_3(\Lambda_3 + y_2)}$; $\eta_{2,3,4}(x_1, y_1, y_2, y_3) = \sum\limits_{v=2}^{4} \Delta s^{(v)}(x_{v1}, y_{v1})$ – математическое ожидание суммарного показателя эффективности; $\theta_3(\Lambda_4 + y_3, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{**}, z^{\text{пл}}) = \gamma$ – ограничение на параметр корректировки.

Задача оптимизации для четырёхэтапного процесса формулируется следующим образом: требуется определить такие значения $\tilde{y}_1$, $\tilde{y}_2$, $\tilde{y}_3$, параметра корректировки y, при которых средний суммарный показатель эффективности корректировки – стоимость дополнительно используемых ресурсов – принимает наименьшее значение:

$$\eta_{2,3,4}(x_1, \tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \tilde{y}_3) = \min_{\{y\}} \eta_{2,3,4}(x_1, y_1, y_2, y_3) = \mu,$$

и выполняются ограничения:

$$\begin{cases} \theta_1(\Lambda_2 + y_1, \Lambda_3, \Lambda_4, z^{\text{пл}}, t_1^*) = \gamma, \\ \theta_2(\Lambda_3 + y_2, \Lambda_4, t_1^*, t_2^{**}) = \gamma, \\ \text{где } \theta_3 = (\Lambda_4 + y_3, z^{\text{пл}}, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{**}) = \gamma, \end{cases} \quad (15)$$

где $\varphi_{i_2}(t) = (\Lambda_2 + y_1) e^{-(\Lambda_4 + y_1)t}$; $\varphi_{i_2}(t) = (\Lambda_2 + y_1) e^{-(\Lambda_4 + y_1)t}$; $\Delta s^{(v)} = \Delta s^{(v)}(y_{v-1}, \psi_{v-1}(y_{v1}))$.

Таким образом, задача оптимизации становится задачей отыскания экстремума функции одной переменной без ограничений. Предварительные исследования показали, что все уравнения системы (10), кроме последнего, имеют несколько корней. В этом случае для решения задачи оптимизации корректировки программы испытаний целесообразна разработка методики, в основе которой лежат алгоритмы стохастического динамического программирования [5, 6].

Для составления рекуррентных соотношений Беллмана будем использовать величину $\mu_n(x)$ – минимума средних затрат на корректировку плана $(n-1)$ этапного цикла (первый этап не корректируется) n-шаговой операции, начинающейся в состоянии x.

Обозначим $Y_v^{\text{огр}}$ – множество, составленное из корней ограничения:

$$\theta_v(\Lambda_{v+1} + y_v, \ldots, t_v^{**}) = \gamma.$$

Тогда $\mu_1(x_v) = \min\limits_{y \in Y_v^{\text{огр}}} \Delta s^{(v+1)}(x_v, y).$ (16)

Решение уравнений (16) может быть найдено одним из общеизвестных методов НЛП. При небольшом числе корней ограничение $\theta_v(\Lambda_{v+1} + y_v, \ldots, t_v^{**}) = \gamma$ можно просто их перебрать (как и соответствующие им значения функции $\Delta s^{(v+1)}(y_{ve}^{\text{огр}})$). Обозначим через y_{21}, y_{22} вспомогательные переменные, используемые для определения условно-оптимальных значений параметра корректировки, и получим рекуррентные соотношения:

$$\mu_1(x_3) = \min_{y_{22} \in Y_3^{\text{ОГР}}} \Delta s^{(4)}(x_3, y_{22}); \quad (17)$$

$$\mu_2(x_2) = \min_{y_{21} \in Y_2^{\text{ОГР}}} [\Delta s^{(3)}(x_2, y_{21}) + \mu_1(x_3)]; \quad (18)$$

$$\mu_3(x) = \min_{y_{3y} \in Y_1^{\text{ОГР}}} [\Delta s^{(3)}(x, y_{3y}) + \mu_2(x_2)]. \quad (19)$$

При этом: $x_2 = x - \dfrac{\tilde{y}_{3y}}{\Lambda_2(\Lambda_2 + \tilde{y}_{3y})}$;

$$x_3 = x_2 - \frac{\tilde{y}_{2y}}{\Lambda_3(\Lambda_3 + \tilde{y}_{2y})}, \quad (20)$$

где $\tilde{y}_{1y}$, $\tilde{y}_{2y}$, $\tilde{y}_{3y}$ – решения функциональных уравнений (17–20) называют ретроспективной развёрткой (обратным ходом).

Далее можно записать последовательность прямой развёртки (прямого хода) в следующем виде:

$$x := x_1; \quad (21)$$

$$\mu = \mu_3(x); \quad (22)$$

$$\tilde{y}_1 = \tilde{y}_{3y}(x_1); \quad (23)$$

$$x_2 = x_1 - \frac{\tilde{y}_1}{\Lambda_2(\Lambda_2 + \tilde{y}_1)}; \quad (24)$$

$$\tilde{y}_2 = \tilde{y}_{2y}(x_2); \quad (25)$$

$$x_3 = x_2 - \frac{\tilde{y}_2}{\Lambda_3(\Lambda_3 + \tilde{y}_2)}; \quad (26)$$

$$\tilde{y}_3 = \tilde{y}_{1y}(x_3). \quad (27)$$

Из вышеизложенной последовательности управления уровнем катастрофоустойчивости следует, что найденная оптимальная корректировка (21–27) является случайной (оперативной) и зависит от того, как развернётся случайный процесс приведения ИУС к заданному уровню катастрофоустойчивости. Мы не определили жесткую «программу корректировки», но указали для каждой

фазы процесса обеспечения работоспособности АСУ то «управление», которым следует отвечать на любой случайный исход предыдущей фазы.

В современных работах по инфокоммуникационным технологиям основное внимание уделяется катастрофоустойчивым решениям ИУС – разработке конфигурации программных и аппаратных средств и организационным мерам по обеспечению сохранности жизненно важных данных [1, 2]. В данной статье рассмотрена другая, не менее актуальная проблема – оптимизации процесса приведения ИУС к требуемому уровню катастрофоустойчивости в заданный срок. Предложенный алгоритм позволяет осуществлять гибкое (в зависимости от исхода очередного этапа) управление процессом поддержания работоспособности ИУС с минимальными затратами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анников А.В., Слободин М.Ю.** Программно-аппаратное обеспечение отказа- и катастрофоустойчивых систем управления и обработки информации: Монография. М.: Макс-пресс, 2006. 153 с.

2. **Беленков В.Г., Будзко В.И.** Задачи катастрофоустойчивости кластерных вычислительных систем // Новости искусственного интеллекта. 2002. № 3 (50). С. 22–30.

3. **Веремчук А.С.** Применение теории марковских процессов к задаче оценивания катастрофоустойчивости подсистем АСУВ // Сб. тр. ВКА им. А.Ф. Можайского, 2008. С. 55–58

4. **Павельев С.В., Павельев С.С.** Выбор варианта системы защиты центров обработки данных // Проблемы управления, 2008. № 5. С. 67–72.

5. **Соложенцев Е.Д.** Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. СПб.: Наука, 2004. 280 с.

6. **Юсупов Р.М., Пальчун Б.П.** Оценка надежности программного обеспечения. М.: Наука, 1993. 280 с.

УДК 004.415.538

А.И. Карпухин, Е.В. Осипов

О СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ К МОНИТОРИНГУ ИНФОРМАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ФЕДЕРАЛЬНЫХ ОРГАНОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВЛАСТИ

В последние годы существенно возросли требования к уровню информатизации государственного сектора в условиях снижения объёмов финансирования, обусловленном во многом глобальными изменениями в экономике России и всего мира.

В связи с этим особенно актуально выделить области информатизации в конкретных государственных организациях, требующие первоочередного финансирования, реализация проектов в которых принесёт наибольший эффект в производственном, технологическом, организационном и других аспектах.

Термин «информатизация» в статье используется в соответствии с ФЗ № 24 об информации, информатизации и защите информации, согласно которому «информатизация – организационный социально-экономический и научно-технический процесс создания оптимальных условий для удовлетворения информационных потребностей и реализации прав граждан, органов государственной власти, органов местного самоуправления, организаций, общественных объединений на основе формирования и использования информационных ресурсов».

Выделение приоритетных областей возможно только на основе достоверной оценки сложившейся ситуации в сфере информатизации госсектора по комплексу показателей. Оценка общего уровня информатизации, качества внедрения информационных систем, эффективности расходования бюджетных средств на информационные технологии и других важнейших качественных и количественных характеристик весьма затруднена в силу целого ряда причин, в т. ч.:

информационно-телекоммуникационные комплексы (ИТК) федеральных органов исполнительной власти (ФОИВ) развиваются в непрерывно изменяющихся условиях внешней среды

(под внешней средой понимается бюджетная политика государства, рынок информационных технологий, процессы административной реформы системы государственного управления, макроэкономическая ситуация в стране и в мире и пр.);

условия развития ИТК ФОИВ определяются множеством разнородных факторов, степень значимости которых непрерывно меняется;

различные оценки (в т. ч. экспертные), характеризующие развитие информационных технологий в госсекторе, являются разнородными по своей природе и базируются на количественных, качественных, стоимостных, долевых (процентных) и других показателях, в силу чего их сопоставление либо затруднено, либо представляется невозможным;

первичная информация по показателям для оценки уровня информатизации в конкретных ФОИВ в большинстве случаев недоступна в связи с ограничениями информационной безопасности.

При этом единой утверждённой методики оценок показателей информатизации в госсекторе не существует. Имеются отдельные попытки разработки соответствующих методик в отраслевых ведомствах, однако они носят частный, но не системный характер [1]. Методическая недостаточность сформировалась в этой области под воздействием целого ряда факторов, а именно:

отсутствие единой комплексной системы показателей для оценки ситуации в сфере информатизации;

трудности в унификации и сопоставлении разнородных показателей, характеризующих уровень информатизации различных ФОИВ, связанные со спецификой их деятельности;

недоступность и недостаточное качество информации о состоянии ИТК ФОИВ в связи с требованиями безопасности и другими ограничениями;

неравномерность уровня информатизации различных ФОИВ, что затрудняет их сопоставление и анализ;

отсутствие у многих ФОИВ функциональных задач, зафиксированных в Уставах Федеральных министерств, служб и агентств, связанных с информатизацией (как следствие, отсутствие оснований для проведения соответствующих мероприятий и реализации проектов).

По мнению авторов, решение задачи комплексного мониторинга уровня информатизации государственных организаций на федеральном уровне должно базироваться на основе системного подхода тензорной методологии систем, предложенной в начале XX в. Г. Кроном [2] и развитой в дальнейшем А. Петровым и другими советскими учёными [3, 4].

Задачи, связанные с оценкой ситуации, мониторингом, контролем и надзором в сфере информационных технологий на федеральном уровне в России курируют сразу несколько государственных организаций, в т. ч.:

Министерство связи и массовых коммуникаций России;

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору;

Федеральное агентство по печати и массовым коммуникациям.

Однако деятельность этих организаций применительно к другим ФОИВ носит преимущественно контрольный и надзорный характер, а такие важнейшие функции управления как планирование, организация, выработка стратегии и прогнозирование на федеральном уровне, реализуются недостаточно эффективно.

Планирование развития ИТК конкретного ФОИВ в большинстве случаев осуществляется внутри самого ФОИВ, вследствие чего в перспективе возникает дисбаланс в информационном развитии различных министерств, служб, агентств и ведомств.

Организация проектов в сфере информационных технологий происходит на уровне отдельных блоков министерств, служб и агентств, сформированных преимущественно по отраслевому принципу.

Выработка и реализация стратегии развития страны и её информационного общества осуществляется с недостаточной глубиной, т. к. программы и мероприятия в этой части нацелены на решение задач в краткосрочной (1–2 года) и среднесрочной (3–5 лет) перспективе, в то время как стратегии по определению должны носить долгосрочный характер (25–50 и более лет).

Прогнозирование развития сферы информатизации госсектора затруднено помимо уже упомянутых причин недостатком качественной первичной информации, отсутствием единых утверждённых методик прогнозирования развития сектора, недостатком компетенций ведомственных специалистов, вследствие отсутствия достаточного числа квалифицированных технических кадров в стране в целом.

Задача оценки ситуации в сфере информатизации госсектора на основе достоверной, полной и качественной первичной информации по все-

му спектру ФОИВ сегодня является крайне актуальной.

Для её решения требуется системная работа, прежде всего сбор и обработка информации по комплексу показателей, формирование научно-обоснованных предложений и рекомендаций к совершенствованию создания, внедрения, эксплуатации и развития информационных технологий в государственных организациях. Для этого необходимо проведение аудита накопленного информационно-технологического потенциала страны.

В связи с этим встаёт задача формирования комплексной системы показателей для проведения аудита ИТК ФОИВ. Он должен проводиться комплексно и затрагивать не только производственные и технологические аспекты, но и организационные, кадровые, финансовые, научные вопросы, проблемы стандартизации производства, контроля качества и безопасности.

Проведение комплексного аудита в госсекторе является одним из первых этапов на пути решения целого комплекса взаимосвязанных задач, таких как:

разработка комплексной системы показателей (КСП) для проведения аудита ИТК;

получение первичной информации по показателям состояния как всей информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, так и с разбиением по отдельным системам и подсистемам с целью выявления определяющих воздействующих факторов и зависимостей на основе КСП [4];

разработка системы хранения и обработки информации, собранной в процессе проведения комплексного аудита;

выявление дисбаланса информационных систем, диагностика критических точек (узлов), экспертиза технологических и управленческих решений, реализуемых в отношении ИТК;

формирование обоснованных рекомендаций по развитию ИТК ФОИВ;

повышение эффективности функционирования автоматизированных информационных систем для обеспечения требований стандартов качества;

повышение требований к созданию и развитию новых ИТ в госсекторе;

повышение эффективности управления производственными процессами;

обеспечение перехода государственной системы управления на качественно новый уровень;

контроль качества реализации сформированных рекомендаций;

планирование и прогнозирование развития ИТК и др.

Для повышения достоверности результатов аудита ИТК ФОИВ требуется проведение регулярных обследований. Для этого могут быть использованы как данные специализированных организаций, отвечающие за вопросы информатизации госсектора на федеральном уровне, так и ресурсы структурных подразделений в ФОИВ, отвечающих за внедрение, эксплуатацию и развитие ИТ-систем (например, отдел, департамент или управление информатизации).

К этой работе также могут быть привлечены подведомственные организации, на которые можно возложить решение следующих задач:

анализ состояния и динамики развития ИТК путём измерения и обработки первичных данных на базе комплексной системы показателей;

ежегодный анализ уровня информатизации в производственном, технологическом, организационном, экономическом и других срезах;

наращивание информационных ресурсов и информационное сопровождение базы данных о состоянии ИТК (база данных должна содержать информацию, полученную в результате проведения комплексного аудита);

улучшение методических и программных средств математического моделирования развития ИТК;

создание и совершенствование методики проведения комплексного аудита;

создание и информационно-аналитическое обеспечение базы знаний о новейших информационных технологиях, внедрение которых позволит существенно повысить уровень информатизации ФОИВ;

подготовка экспертно-аналитических материалов по вопросам информатизации ФОИВ и др.

Для получения достаточно полной (наиболее достоверной) картины состояния ИТК ФОИВ требуется обеспечить доступ к первичной информации, что во многих случаях, с учётом специфики конкретного ФОИВ, является препятствием для проведения комплексного аудита. При этом могут быть использованы как внутриведомственные данные, так и информация Федеральной службы государственной статистики, Федерального Казначейства, Министерства связи и массовых коммуникаций, МЧС и других государственных организаций. Анализ информации из указанных источников позволит значительно дополнить картину состояния и тенденций развития всего спек-

тра ИТК ФОИВ и устранить целый ряд пробелов в информационном обеспечении поддержки экономически, технологически и организационно обоснованных управленческих решений. Совокупность этой информации, данных и знаний должна синтезироваться в единый банк данных о состоянии совокупности ИТК ФОИВ России. Анализ такого банка данных позволит контролировать ситуацию в вопросах информатизации госсектора. Однако одного контроля недостаточно, необходимо формировать предложения по развитию ИТК и повышению уровня информатизации на основе анализа реальной ситуации. Это позволит выявлять дисбаланс в развитии отдельных элементов системы государственного управления, а также формировать технологически и экономически обоснованные рекомендации к устранению этих недостатков и перераспределению ресурсов, направляемых на информатизацию госсектора. В результате проведения регулярных аудитов ИТК ФОИВ должна сформироваться единая база данных, представляющая собой с точки зрения статистики генеральную совокупность. На основе такой базы возможно проведение детализированных исследований в различных срезах, в т. ч. по следующим атрибутам:

по отраслевой принадлежности систем (системы электронного документооборота, сбора и хранения данных, поисковые системы, системы учёта договоров, автоматизированные системы управления, навигационные комплексы, системы анализа и прогнозирования, учёта кадров и др.);

по территориальному признаку;

по производственно-экономическим характеристикам;

этапам жизненного цикла;

уровням развития и др.

При этом результаты оценки состояния информационных систем могут быть представлены как минимум в трёх срезах: в интегральных, осреднённых и дифференциальных показателях. Полученные таким образом результаты оценки могут быть использованы в дальнейшем как минимум на трёх уровнях управления:

микроуровень (отдельные информационные системы);

мезоуровень (ИТК отдельного ФОИВ);

макроуровень (комплексные системы межведомственного взаимодействия).

Развитие предложенного подхода также возможно в следующих направлениях:

учёт внешних факторов, воздействующих на развитие ИТК, в т. ч. разработка соответствующей системы показателей;

модернизация, глубокая автоматизация и оптимизация процессов проведения комплексного аудита ИТК;

расширение возможностей эффективного прогнозирования и многовариантного представления состояния ИТК ФОИВ с целью использования в составе ситуационной комнаты (например, тренажера главного инженера);

разработки рекомендаций по совершенствованию проведения комплексного аудита ИТК ФОИВ на федеральном, региональном и местном уровне.

Таким образом, для оценки ситуации в сфере информатизации госсектора требуется применение системного подхода, в т. ч. специальных методов и моделей диагностики и экспертизы текущего состояния информационно-телекоммуникационных комплексов (ИТК) федеральных органов исполнительной власти (ФОИВ) и их развития в перспективе. Для практической реализации системного подхода требуется разработка комплексной системы показателей, которая обеспечит методическую основу для проведения комплексного аудита уровня информатизации государственных организаций. Аудит на основе комплексной системы показателей позволит выявить слабые и сильные стороны в информатизации системы государственного управления, а также наиболее приоритетные отрасли, в которые целесообразно в первую очередь направлять ограниченные материальные, финансовые, технологические и кадровые ресурсы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мизинцева М.Ф., Кущев М.В.** Сравнительный анализ методов оценки эффективности информатизации региональных хозяйственных систем. М.: ВИНИТИ РАН, 2007. С. 15–21.

2. **Крон Г.** Тензорный анализ сетей / Пер. с англ. под ред. Л.Т. Кузина, П.Г. Кузнецова. М.: Сов. радио, 1978. 720 с.

3. **Петров А.Е.** Тензорная методология в теории систем. М.: Радио и связь, 1985.

4. **Механов В.Б., Игнатьев Н.Ю.** Применение тензорной методологии для синтеза и анализа современных компьютерных сетей // Сб. матер. науч. конф. 2005.

УДК 621.785, 669.2, 681.5

Н.В. Заикина, Ю.Э. Плешивцева

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА С УЧЁТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ

В промышленности применяют различные технологии горячей обработки цветных металлов давлением. Одним из таких методов обработки является прессование профилей. Нагрев перед прессованием способствует повышению пластичности металла, и, таким образом, облегчает процесс его обработки. Установки индукционного нагрева (ИНУ) получили широкое распространение в промышленности при нагреве изделий под штамповку и пластическую деформацию [1].

Нагрев алюминиевых заготовок до заданной температуры 400–500° С может производиться в ИНУ на частоте 50 Гц. Мощность индукционной установки, как правило, находится в пределах от 0,2 до 1 МВт. Однако электрический КПД подобных ИНУ для нагрева алюминия составляет всего 40–60 %.

Для улучшения энергетической эффективности нагрева алюминиевых заготовок перед прессованием в последние годы был разработан инновационный метод, который позволяет использовать сверхпроводники, способные генерировать высокоинтенсивные магнитные поля в больших объёмах [2]. Изменение магнитного потока, пронизывающего заготовку, вызвано вращением заготовки относительно поля возбуждения (рис. 1, *а*) [3]. Вращение в постоянном магнитном поле вызывает поток индуцированных токов, которые производят момент, препятствующий вращению. Практически вся энергия в заготовке преобразуется в тепловую, и, таким образом, механическая энергия асинхронного электродвигателя преобразуется в тепловую. Теоретически КПД индуктора в данном случае должен приближаться к КПД электрического двигателя, который составляет 90 %. Возможные конструктивные параметры соответствующей системы нагрева представлены в [9].

К настоящему времени достаточно глубоко изучены подходы к оптимизации работы традиционных ИНУ [4], в то время как исследования процесса индукционного нагрева с использованием постоянного магнитного поля суперпроводников находятся только на начальном этапе. В представленной статье изучаются оптимальные режимы функционирования инновационных установок индукционного нагрева вращающихся алюминиевых заготовок.

В целом ряде технологий термообработки оказывается необходимым учитывать дополнительные требования, к которым, прежде всего, относятся ограничения на максимальную температуру и максимум растягивающих термонапря-

а) *б*)

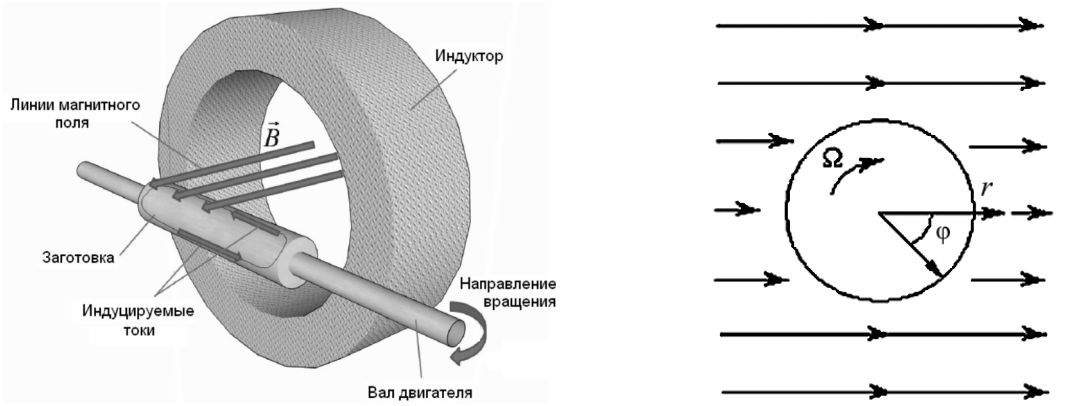


Рис. 1. Принцип индукционного нагрева заготовки, вращающейся в магнитном поле суперпроводника:
а – инновационная установка индукционного нагрева; *б* – двумерная математическая модель процесса нагрева

жений по объёму заготовки в процессе нагрева, т. к. при термообработке изделия возникают температурные напряжения и деформации, величины которых могут оказаться за пределами упругости и вести к нежелательным необратимым изменениям свойств металла.

В статье представлены результаты моделирования и оптимизации температурных полей и полей термонапряжений по сечению заготовки в ходе нагрева с использованием численной двумерной электромагнитно-тепловой модели процесса. Сформулированы и решены задачи оптимального по быстродействию управления индукционным нагревом с учётом ограничений на максимально допустимые температуру и термонапряжения. Проведена интеграция разработанной математической модели и алгоритмов оптимального управления для построения специальной процедуры оптимизации процесса инновационного индукционного нагрева.

Численная двумерная модель процесса нагрева

Математическая модель системы нагрева алюминиевых заготовок вращением включает взаимосвязанный расчёт электромагнитных и тепловых полей в поперечном сечении заготовки в предположении, что длина заготовки много больше её радиуса. При моделировании рассматриваемого процесса необходимо учитывать ряд усложняющих факторов, таких как зависимость теплофизических свойств материала заготовки от температуры и неравномерности магнитного поля, сложный характер теплообмена; необходимость решения сопряжённых задач, сложную геометрическую форму системы «индуктор-металл» и др.

Для моделирования исследуемого процесса был выбран метод конечных элементов, для построения сетки детали и индуктора использовались четырёхугольные элементы, а для сетки окружающего пространства – треугольные элементы. Численная двумерная модель была разработана в среде наукоёмкого расчётного программного комплекса ANSYS [5]. Алгоритм решения задачи моделирования представляет собой последовательную итерационную процедуру, включающую гармонический электромагнитный анализ и переходный тепловой анализ.

Моделирование температурных полей. В качестве базовой рассматривается двумерная модель температурного поля в поперечном сечении заготовки радиусом R (рис. 1, *б*), поскольку такая модель, с одной стороны, является достаточно представительной для исследований общего характера, а, с другой стороны, позволяет использовать её в оптимизационных процедурах за счёт относительно ограниченного времени расчётов.

Длина цилиндрической заготовки в направлении оси z считается бесконечной. В общем случае пространственно-временное распределение температуры по объёму заготовки в процессе индукционного нагрева описывается взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитного и температурного полей [1].

Уравнение Максвелла для электромагнитного поля внутри проводящего материала может быть записано как

$$\text{rot}\,\bar{H} = J + \frac{\partial \bar{D}}{\partial \tau};\ \text{rot}\,\bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial \tau};\ \text{div}\,\bar{B} = 0;\ \text{div}\,\bar{E} = 0, \quad (1)$$

где $\bar{E}$ – вектор напряжённости электрического поля; $\bar{D}$ – вектор электрической индукции; $\bar{B}$ – вектор магнитной индукции; $\bar{H}$ – вектор напряжённости магнитного поля; J – плотность электрического тока проводимости; τ – время.

Уравнение Фурье, описывающее в наиболее общем виде температурное поле в нагреваемой заготовке, имеет вид:

$$c(T)\,\gamma(\mathrm{T})\,\frac{\partial T}{\partial \tau} - \text{div}\,(\lambda(T)\,\text{grad}\,T) + c(T)\,\gamma(\mathrm{T})\,\bar{V}\,\text{grad}\,T = F, \quad (2)$$

где T – температурное поле в поперечном сечении заготовки; $c(T)$, $\gamma(\mathrm{T})$, $\lambda(T)$ – соответственно удельная теплоёмкость, плотность и коэффициент теплопроводности нагреваемого металла; $\bar{V}$ – вектор скорости перемещения заготовки; F – внутренние источники тепла, возбуждаемые индуцируемыми в заготовке вихревыми токами, за счёт которых происходит нагрев.

Удельная мощность тепловыделения на единицу объёма нагреваемого тела, зависящая от частоты вращения заготовки f, может быть найдена путем расчёта передаваемой энергии электромагнитного поля [1]:

$$F = -\text{div}\left[\bar{E} \cdot \bar{H}\right]. \quad (3)$$

Применительно к рассматриваемой технологии мощность тепловыделения $F(f)$ [Вт/м^3] может быть вычислена согласно соотношению [2]:

$$F = \sigma(B_{ri}\,\frac{2\pi R}{60}\,f \cdot \xi)2, \quad (4)$$

где B_{ri} – радиальная составляющая магнитного поля в цилиндрических координатах; $\xi = \frac{r}{R}$ [2].

Таким образом, для исследуемой инновационной технологии нагрева управление мощностью тепловыделения осуществляется за счёт изменения скорости вращения заготовки.

Теплофизические параметры $c(T)$, $\gamma(\mathrm{T})$, $\lambda(T)$ в (2) являются нелинейными функциями температуры. Совместно с соответствующими граничными и начальными условиями уравнение (2) описывает температурное распределение в любой момент времени для любой точки по сечению нагреваемой заготовки.

Моделирование полей термонапряжений. Горячая обработка алюминиевых заготовок перед прессованием представляет собой предварительный нагрев до 500° С. В процессе нагрева алюминиевых цилиндрических заготовок индукционным методом появляется перепад между температурами поверхности и центра, т. е. поверхностные слои заготовок оказываются более прогретыми по сравнению со слоями, прилежащими к центру. В результате из-за различия коэффициентов линейного расширения всех слоёв неравномерно прогретой заготовки возникают термические напряжения.

Рассматривая сечение цилиндрических заготовок, можно выделить две компоненты термонапряжений – радиальные и окружные. Максимум радиальных напряжений приходится на слои, лежащие непосредственно около центра заготовки, а минимум, соответственно, на поверхностные слои. Окружные напряжения направлены по касательной к сечению заготовки, в отличие от радиальных, которые действуют в направлении от центра к поверхности. Максимум окружных и радиальных напряжений располагается в центре.

Наиболее опасными из напряжений являются растягивающие, т. к. они разрывают металл изнутри, вследствие чего возникают необратимые дефекты металла. При этом сжимающие напряжения в некоторых случаях могут упрочнить заготовку.

При плоском температурном поле T (x, y, t) в длинном цилиндрическом теле с продольной осью Oz возникает плоская деформация [6], для которой характерны перемещения:

$$u_x = u_x(x, y),\ u_y = u_y(x, y),\ u_z = 0. \qquad (5)$$

Этим перемещениям соответствуют деформации:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0 \qquad (6)$$

и напряжения:

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) - \alpha_1 T,\ \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0. \qquad (7)$$

Зная σ_z, можно найти соотношения между деформациями ε_x, ε_y, ε_{xy}, и напряжениями σ_x, σ_y, σ_{xy} в следующем виде:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E_1}(\sigma_x - \nu_1\sigma_y) + \alpha_1 T, \qquad (8)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E_1}(\sigma_y - \nu_1\sigma_x) + \alpha_1 T, \qquad (9)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1+\nu_1}{E_1}\sigma_{xy}, \qquad (10)$$

где $\mathrm{E}_1 = \dfrac{E}{1-\nu^2}$, $\nu_1 = \dfrac{\nu}{1-\nu}$, $\alpha_1 = \alpha(1+\nu)$. (11)

Переходя к цилиндрической системе координат, рассмотрим плоское деформированное состояние заготовки, закреплённой с двух сторон для ограничения её осевого перемещения. В случае плоской деформации имеется три компонента напряжений σ_r, σ_θ, σ_z; все три деформации сдвига и касательные напряжения равны нулю в силу симметрии относительно оси и постоянства условий в осевом направлении. Для указанных выше напряжений из [6] имеем:

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\nu}\left(\frac{1}{b^2}\int_0^b Trdr - \frac{1}{r^2}\int_0^r Trdr\right), \qquad (12)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu}\left(\frac{1}{b^2}\int_0^b Trdr + \frac{1}{r^2}\int_0^r Trdr - T\right), \qquad (13)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E}{1-\nu}\left(\frac{2\nu}{b^2}\int_0^b Trdr - T\right). \qquad (14)$$

Где ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости или модуль Юнга; b – радиус цилиндра; T – функция распределения температуры. Таким образом, зная температурное поле в заготовке, можно определить компоненты термонапряжений в ней.

Для выбора заданного ограничения на величину термонапряжений в процессе нагрева было проведено исследование диаграммы растяжения алюминия [6], в ходе которого было установлено, что безопасные значения напряжения соответствуют участку, на котором при снятии нагрузки не возникают остаточные деформации. Здесь материал подчиняется закону Гука:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где σ – напряжение; E – модуль Юнга; ε – относительное растяжение. За допустимое значение термонапряжений будем считать предел упругости [6], который для технически чистого алюминия составляет 30 МПа.

Постановка и решение задачи оптимального по быстродействию управления

Для решения задачи управления нагревом заготовок, вращающихся в постоянном магнитном поле, процесс индукционного нагрева рассматривается в качестве объекта оптимизации с распределёнными параметрами [7], состояние которого однозначно определяется пространственно-временным распределением температуры нагреваемого тела $T(l, \tau)$ во времени τ и по радиальной координате $l \in [0, R]$, в пренебрежении температурной неравномерностью по её длине.

Холодные заготовки поступают в установку с начальным распределением температуры $T_0(l)$ и должны быть нагреты в процессе вращения до заданной температуры $T^*(l)$.

Как было описано выше, изменение частоты вращения заготовки во времени $f(\tau)$, позволяющее целенаправленно изменять температурное поле заготовки, можно рассматривать в качестве сосредоточенного управляющего воздействия, подобного управлению по мощности индукционного нагрева, осуществляемого по типовой технологии [4].

Ограничение на управляющее воздействие $f(\tau)$ вводится, исходя из максимально и минимально возможных величин частоты вращения заготовок, и записывается в виде:

$$0 \le f(\tau) \le f_{\max}. \qquad (15)$$

В качестве критерия оптимальности для обеспечения максимальной производительности установки рассматривается минимальное время нагрева $\tau^0_{\min}$.

Применительно к исследуемому в данной статье классу задач оптимизации индукционная установка в конечный момент времени $\tau_к$ должна обеспечивать нагрев металлической заготовки до заданной температуры $T^*(l) = T^* = \text{const}$ с допустимым температурным отклонением по сечению заготовки ε_0:

$$\max_{l \in [0,\,1]} \left| T(l, \tau_к) - T^* \right| \le \varepsilon_0. \qquad (16)$$

Таким образом, задача оптимального по быстродействию управления процессом нагрева заготовки, вращающейся в магнитном поле постоянного тока, может быть сформулирована следующим образом.

Необходимо найти такое переменное во времени управляющее воздействие $f(\tau) = f_{\text{опт}}(\tau)$, *стеснённое ограничением (15), которое обеспечивает перевод нагреваемого изделия с начальным распределением температуры* $T_0(l) = T_0 = \text{const}$ *в заданное целевое множество, согласно (16), за минимально возможное время* $\tau_к = \tau^0_{\min}$.

Подобно известным результатам для общей нелинейной задачи оптимального по быстродействию управления процессами нестационарной теплопроводности с внутренним тепловыделением [4], стандартные процедуры принципа максимума непосредственно определяют для математической модели ОРП вида (2)–(4) $\Delta^{(N)}$-параметризованное представление управляющего воздействия $f_{\text{опт}}(\tau)$ в форме кусочно-постоянной функции времени:

$$f_{\text{опт}}(\tau) = \frac{f_{\max}}{2}\left[1 + (-1)^{j+1}\right], \quad \sum_{i=1}^{j-1} \Delta_i < \tau < \sum_{i=1}^{j} \Delta_i,\ j = \overline{1, N}, \qquad (17)$$

однозначно задаваемой тем самым с точностью до числа N и длительностей Δ_i, $i = \overline{1, N}$ интервалов своего постоянства, выступающих в роли искомых параметров и зависящих только от требуемой точности нагрева ε_0 в (21), где N может быть найдено по заданной величине ε_0 по общей методологии альтернансного метода [6]. В итоге осуществляется процедура редукции исходной задачи к задаче полубесконечной оптимизации:

$$I(\Delta) = \sum_{i=1}^{S} \Delta_i \to \min_{\Delta};\ \boldsymbol{\Delta} = (\Delta_1, \Delta_2, ..., \Delta_S), \qquad (18)$$

$$\Phi(\Delta) = \max_{l \in [0, R]} \left| T(l, \Delta) - T^* \right| \le \varepsilon_0, \qquad (19)$$

где зависимости $T(l, \Delta)$ находятся по численной ANSYS-модели объекта при управлении вида (17).

Аналогии математических моделей и закономерностей температурного распределения в рассматриваемом и типовом процессах оптимального по быстродействию индукционного нагрева приводят к сохранению в сформулированной задаче (18)–(19) соответствующих этим процессам оптимальной формы кривой радиального распределения результирующих температур и его альтернансных свойств, что позволяет применять для решения данной задачи общую схему альтернансного метода [7], подобно тому, как это сделано в [8].

При использовании численной модели температурного поля расчётные системы уравнений альтернансного метода могут быть решены с обращением к модели на каждом шаге итерационной процедуры.

Постановка и решение задачи оптимального управления с учётом ограничения на максимально допустимую температуру. В реальных условиях индукционного нагрева максимальное значение $T_{\max}(\tau)$ температуры по всему объёму нагреваемых заготовок ограничивается на всём протяжении процесса нагрева некоторой заданной предельно допустимой величиной $T_{\text{доп}}$, превышение которой приводит к необратимым нежелательным изменениям структурных свойств материала обрабатываемых изделий и (или) к их оплавлению. Поэтому оказывается необходимым учитывать дополнительное ограничение, которое записывается в форме следующего неравенства:

$$T_{\max}(\tau) = \max_{l\in[0,\,1]} T\,(l,\,\tau) \le T_{\text{доп}},\ 0 < \tau \le \tau_{\kappa}. \qquad (20)$$

Таким образом, необходимо рассматривать сформулированную выше задачу нагрева заготовки до требуемой температуры с заданной точностью за минимально возможное время с учётом технологического ограничения (20) на максимально допустимую температуру в ходе нагрева.

В большинстве практических задач коррекция оптимальных режимов в связи с рассматриваемым технологическим ограничением оказывается необходимой только в пределах первого интервала процесса нагрева с максимальным значением управляющего воздействия $f \equiv f_{\max}$. Она сводится к подбору управляющего воздействия на соответствующих участках в пределах этого интервала, поддерживающих $T_{\max}$ на предельно допустимом уровне $T_{\text{доп}}$, т. е. к выполнению на этом участке условия (20) в форме соответствующего равенства. Ясно, что только в таком варианте сохраняется минимально возможное с учётом нового ограничения суммарное время процесса нагрева заготовки [7].

В соответствии с этим, типичный алгоритм оптимального по быстродействию управления принимает (согласно рис. 2, *а*) следующий вид:

$$f(\tau) = \begin{cases} f_{\max},\ \tau\in(0,\tau_T); \\ f^T(\tau),\ \tau\in(\tau_T,\Delta_1^0); \\ 0,\ \tau\in(\Delta_1^0,\Delta_2^0). \end{cases} \qquad (21)$$

Предельное значение $T_{\text{доп}}$ достигается при $\tau = \tau_T$ во внутренней точке температурного максимума, являющегося точкой экстремума $l_{\text{э}}$ температурной кривой $T(l,\ \tau_T)$ в соответствии с её известной формой при $f = f_{\max}$, $\tau\in(0,\ \tau_T)$ [7], и тогда значения τ_T и $l_{\text{э}}$ находятся как корни системы уравнений:

$$\begin{cases} T_{\max}(\tau_T) = T(l_{\text{э}},\tau_T) = T_{\text{доп}}; \\ \dfrac{\partial T(l_{\text{э}},\tau_T)}{\partial l} = 0 \end{cases}, \qquad (22)$$

которая может быть решена известными или специальными численными методами при заданной зависимости $T(l,\ \tau_T)$ от своих аргументов [7].

В первом приближении управление $f^T(\tau)$, стабилизирующее температуру на заданном уровне, представляется с достаточной точностью экспоненциальным законом изменения во времени [7]. Тогда базовый вариант алгоритма управления с учётом ограничения на максимально допустимую температуру представляется в виде:

$$f_{\text{опт}}(\tau) = \begin{cases} f_{\max},\ \tau\in(0,\ \tau_T); \\ f^T(\tau) \cong a + be^{-\beta(\tau-\tau_T)},\ \tau\in(\tau_T,\ \Delta_1^0); \\ \dfrac{f_{\max}}{2}\left[1+(-1)^{j+1}\right],\ \tau_{j-1} < \tau < \tau_j,\ j = 2,3,\ ..,N. \end{cases} \qquad (23)$$

Рассмотрим случай, когда заданная точность нагрева совпадает с предельно достижимой точностью $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ при двухинтервальном управлении. В этом случае сам минимакс $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ заранее неизвестен, и его величина должна быть отнесена к неизвестным параметрам оптимального алгоритма управления как и длительности интервалов Δ_1^0, Δ_2^0, а также a, b, β в (31), обеспечивающие достижение предельно возможной точности нагрева в классе двухинтервальных управлений [7].

Расчёт искомых алгоритмов управления осуществляется при помощи оптимизационного комплекса, предназначенного для проведения многокритериальной оптимизации одномерных полей. Специальная процедура оптимизации позволяет осуществлять поиск значений параметров алгоритмов управления, при которых достигается минимально возможное отклонение поля от заданного значения. При этом учитываются ограничения на возможные значения оптимизируемых параметров [10].

На рис. 2, *б–г* представлены результаты расчёта оптимального по быстродействию процесса нагрева алюминиевых цилиндрических заготовок диаметром 215 мм путём их вращения в постоянном магнитном поле при токе источника питания 323,2 кА с учётом технологического ограничения (20). Изменение частоты вращения заготовки представлено на рис. 2, *б*; на рис. 2, *в* показано температурное распределение по сечению

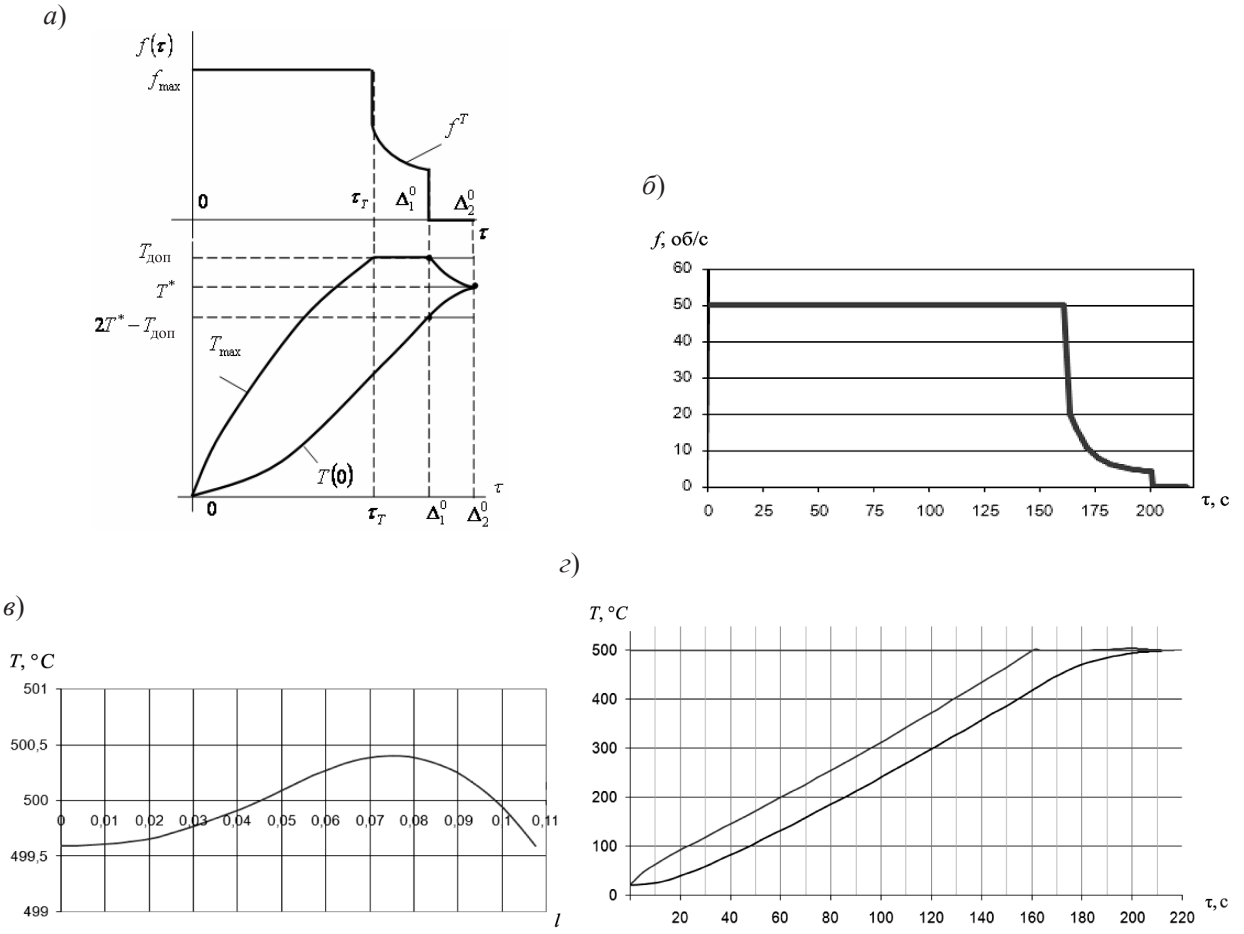


Рис. 2. Результаты расчёта оптимального двухинтервального процесса нагрева с учётом ограничения на максимально допустимую температуру:

а – графическая интерпретация оптимального процесса нагрева с учётом ограничения на максимальную температуру; *б* – изменение частоты вращения в процессе нагрева с учётом ограничения на максимальную температуру; *в* – температурный профиль по сечению заготовки в конце процесса нагрева; *г* – динамика температуры в центре и на поверхности заготовки в процессе нагрева

заготовки по окончании процесса нагрева; на рис. 2, *г* представлено изменение температуры в центре и на поверхности заготовки в ходе нагрева. Как видно из представленных данных, в конце процесса нагрева неравномерность распределения температуры по радиусу цилиндра составляет $\varepsilon^{(2)}_{\min} = 0{,}4°$ С.

Постановка и решение задачи оптимального управления с учётом ограничения на максимально допустимые термонапряжения. При нагреве заготовки помимо максимальной температуры необходимо отслеживать и уровень возникающих термических напряжений.

Температурные перепады по всему объёму нагреваемой заготовки должны быть ограничены на всём протяжении процесса нагрева таким образом, чтобы обусловленное ими максимальное значение $\sigma_{\max}$ растягивающих термонапряжений $\sigma(l, \tau)$ не превышало заданной допустимой величины $\sigma_{\text{доп}}$, согласованной с пределом прочности материала заготовки. Иначе говоря, подобно (20), должно быть выполнено следующее неравенство для поля термонапряжений:

$$\sigma_{\max}(\tau) = \max_{l \in [0,\,1]} \sigma(l, \tau) \le \sigma_{\text{доп}}, \; 0 < \tau \le \tau_{\kappa}. \qquad (24)$$

Нарушение этого условия может привести к появлению необратимого брака – растрескиванию заготовок.

Тогда задача оптимального по быстродействию управления нагревом заготовки до требуемой температуры с заданной точностью за минимально возможное время дополняется ограничением (24) на максимально допустимое растягивающее термонапряжение в ходе нагрева.

Аналогично рассмотренному ранее случаю учёта ограничения на максимально допустимую температуру, коррекция оптимальных режимов в связи с рассматриваемым технологическим ограничением на термонапряжение оказывается необходимой только в пределах первого интервала процесса нагрева при $f \equiv f_{\max}$. В данном случае также необходим подбор управляющего воздействия, поддерживающего $\sigma_{\max}$ на предельно допустимом уровне $\sigma_{\text{доп}}$, т. е. к выполнению на этом участке условия (24) в форме соответствующего равенства. Таким образом, типичный алгоритм оптимального по быстродействию управления с учётом рассматриваемого технологического ограничения принимает следующий вид (рис. 3, *а*) [7]:

$$f(\tau) = \begin{cases} f_{\max}, \tau \in (0, \tau_\sigma); \\ f^\sigma(\tau), \tau \in (\tau_\sigma, \Delta_1^0); \\ 0, \tau \in (\Delta_1^0, \Delta_2^0). \end{cases} \qquad (25)$$

После определения τ_σ и $f^\sigma(\tau)$ оптимальное управляющее воздействие опять определяется заранее с точностью до N параметров Δ_i, $i = \overline{1, N}$, где Δ_i вновь имеют смысл длительностей различных интервалов управления с известным законом изменения частоты вращения на каждом из них.

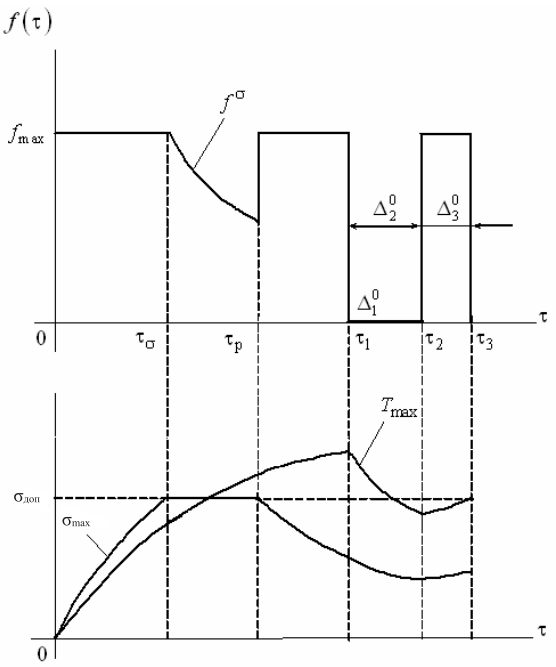
Аналогично рассмотренному выше случаю, в первом приближении управление $f^\sigma(\tau)$, стабилизирующее термонапряжение на заданном уровне, представляется с достаточной точностью экспоненциальным законом изменения во времени.

Тогда базовый вариант алгоритма управления с учётом ограничения на максимально допустимое термонапряжение представляется в виде:

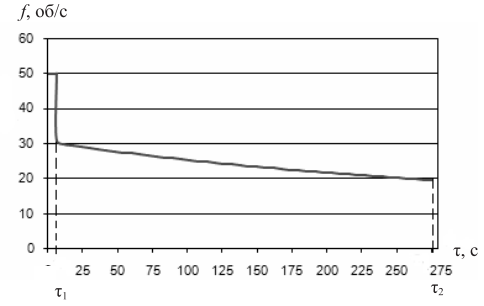
$$f_{\text{опт}}(\tau) = \begin{cases} f_{\max}, \tau \in (0, \tau_\sigma); \\ f^\sigma(\tau) \cong a + be^{-\beta(\tau - \tau_\sigma)}, \tau \in (\tau_\sigma, \Delta_1^0); \\ \dfrac{f_{\max}}{2}\left[1 + (-1)^{j+1}\right], \tau_{j-1} < \tau < \tau_j, \; j = 2, 3, ..., N. \end{cases} \qquad (26)$$

Для обеспечения выполнения условия (24) при $\sigma_{\text{доп}} = \sigma^* = 30$ МПа и оптимизации параметров алгоритма управления (17) процессом нагрева при помощи численной модели и оптимизационного комплекса был произведен расчёт процесса индукционного нагрева. В результате было опре-

а)



б)



в)

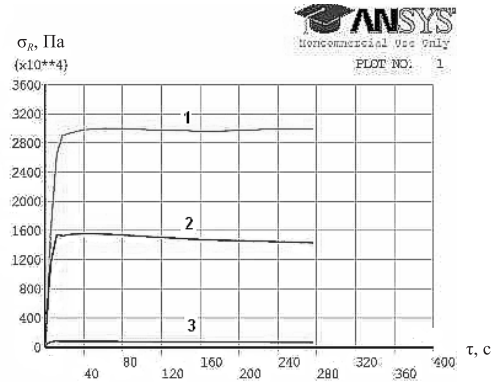


Рис. 3. Результаты расчёта оптимального двухинтервального процесса нагрева с учётом ограничения на максимально допустимое растягивающее термонапряжение:

а – графическая интерпретация оптимального процесса с учётом ограничения на максимально допустимое термонапряжение; *б* – изменение частоты вращения в процессе нагрева; *в* – изменение радиального температурного напряжения в ходе нагрева: (1 – в центре заготовки; 2 – в промежуточной точке; 3 – на поверхности заготовки)

делено изменение частоты вращения заготовки, представленное на рис. 3, *б*. На рис. 3, *в* показано изменение радиального температурного напряжения в процессе нагрева для различных точек по сечению заготовки.

Совместный учет ограничений на максимально допустимые температуру и термонапряжения в процессе нагрева

В большинстве практических задач оказывается необходимым учёт обоих фазовых ограничений (20) и (24), ввиду взаимосвязанности температурных полей по сечению заготовки и полей термонапряжений. Поведение максимальных значений температуры и термонапряжений во времени в оптимальном процессе, полученном без учёта фазовых ограничений [7], указывает, что оптимальный процесс должен дополниться участками стабилизации максимальных температуры и растягивающих термонапряжений на допустимых уровнях в пределах первого интервала управления [7].

Таким образом, необходима новая постановка задачи оптимального управления с условием выполнения ограничений (20) и (24) в ходе нагрева.

Типичный алгоритм оптимального по быстродействию управления с учётом рассматриваемых технологических ограничений принимает, согласно [7], следующий вид:

$$f(\tau)=\begin{cases} f_{\max},\ \tau\in(0,\ \tau_\sigma); \\ f^{\sigma}(\tau),\ \tau\in(\tau_\sigma,\ \tau_T); \\ f^{T}(\tau),\ \tau\in(\tau_T,\ \Delta_1^0); \\ \dfrac{f_{\max}}{2}\left[1+(-1)^{j+1}\right],\ \tau_{j-1}<\tau<\tau_j,\ j=2,3,...,N. \end{cases} \qquad (27)$$

Моменты времени τ_σ и τ_T, как и ранее при рассмотрении каждого из ограничений в отдельности, могут быть найдены из условий достижения предельно допустимых значений ограничиваемых величин, т. е. непосредственно исходя из равенств:

$$\sigma_{\max}(\tau_\sigma)=\sigma_{\text{доп}};\ T_{\max}(\tau_T)=T_{\text{доп}}, \qquad (28)$$

которые следует рассматривать как уравнения относительно τ_σ или τ_T при известных зависимостях $\sigma_{\max}(\tau)$ и $T_{\max}(\tau)$. Стабилизирующие управления $f^{\sigma}(\tau)$ и $f^{T}(\tau)$ также следует определить из условий поддержания с их помощью равенств:

$$\sigma_{\max}(\tau)=\sigma_{\text{доп}};\ T_{\max}(\tau)=T_{\text{доп}}, \qquad (29)$$

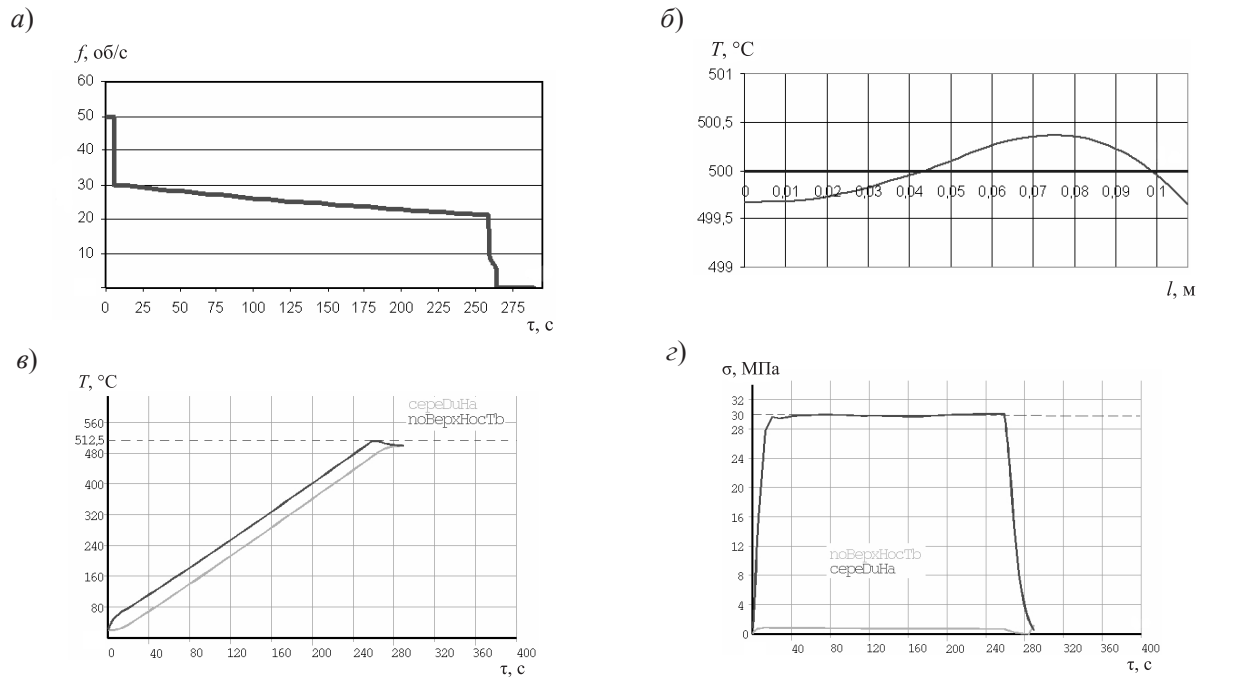


Рис. 4. Результаты расчёта оптимального процесса нагрева с учётом ограничений на максимально допустимые температуру и термонапряжение:

а – изменение частоты вращения в процессе нагрева; *б* – температурный профиль по сечению заготовки в конце процесса нагрева; *в* – температуры в центре и на поверхности заготовки в процессе оптимального нагрева; *г* – термонапряжения в центре и на поверхности заготовки в процессе оптимального нагрева

на соответствующих участках оптимальных программ изменения частоты вращения заготовки в (27).

Как и в предыдущих случаях в первом приближении управления $f^T(\tau)$ и $f^\sigma(\tau)$, стабилизирующие температуру и термонапряжение на заданном уровне, представляются экспоненциальными законами изменения во времени. Тогда вместо (27) получим более простой вариант алгоритма управления:

$$u_{\text{опт}}(\tau)=\begin{cases} f_{\max},\ \tau\in(0,\ \tau_\sigma); \\ f^\sigma(\tau)\cong a+be^{-\beta(\tau_\sigma-\tau_T)},\ \tau\in(\tau_\sigma,\ \tau_T); \\ f^T(\tau)\cong a_1+b_1e^{-\beta_1(\tau_T-\Delta_1^0)},\ \tau\in(\tau_T,\ \Delta_1^0); \\ \dfrac{f_{\max}}{2}\left[1+(-1)^{j+1}\right],\ \tau_{j-1}<\tau<\tau_j,\ j=2,3,...,N. \end{cases} \quad (30)$$

После проведения оптимизационной процедуры было получено изменение частоты вращения заготовки, представленное на рис. 4, *а*. Минимакс $\varepsilon^{(2)}_{\min}$ составил 0,36 ° С.

На рис. 4, *б* представлен результат расчёта температурного распределения по сечению заготовки по окончании процесса. На рис. 4, *в*, *г* приведены временные зависимости температур и термонапряжений в центре заготовки и на поверхности в течение оптимального процесса нагрева с учётом ограничения на температуру и термонапряжение.

В данной статье рассмотрена инновационная технология процесса индукционного нагрева алюминиевых заготовок перед прессованием путём их вращения в магнитном поле постоянного тока. При помощи численного моделирования был проведён анализ поведения температурных полей и полей термонапряжений при различных режимах нагрева [9].

Для учёта дополнительных требований к состоянию нагреваемых изделий в процессе термообработки сформулированы и решены задачи оптимального управления с учётом ограничений как на максимально допустимую температуру, так и на термонапряжения, введение которых позволяет обеспечивать требуемое качество нагрева при максимальной производительности технологического комплекса. Была разработана специальная процедура оптимизации, позволяющая осуществлять поиск оптимальных значений параметров алгоритмов управления [10].

Полученные оптимальные алгоритмы управления приводят к повышению эффективности индукционных нагревателей за счёт сокращения общего времени нагрева и отсутствии брака благодаря учёту технологических ограничений.

Работа выполнена при поддержке фонда DAAD имени Л. Эйлера, в рамках госконтрактов Федерального агентства по образованию на проведение поисковых НИР № П231, П1448, П2090

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Демидович В.Б.** Применение индукционного нагрева в металлургической промышленности. СПб., 2003.

2. **Magnusson N.** Prospects for rotating billet superconducting induction heating // Proceedings of the International Symposium on Heating by Electromagn. Sources–Padua, 2007. P. 479–486.

3. **Ulferts A., Nacke B.** ALUHEAT – A superconducting approach of an aluminium billet heater // International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing. Hannover, Oct. 27–29 2008. P. 71–76.

4. **Рапопорт Э.Я.** Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993. 279 с.

5. **Nacke B., Zlobina M., Nikanorov A. et al.** Numerical simulation of induc-tion heating of aluminum billets by rotation in DC magnetic field [Text] // Proceedings of the International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources. Padua, 2007. P. 497–504.

6. **Тимошенко С.П., Гудьер Дж.** Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.

7. **Рапопорт Э.Я.** Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. М.: Высш. шк., 2009. 677 с.

8. **Плешивцева Ю.Э.** Последовательная параметризация управляющих воздействий и полубесконечная оптимизация алгоритмов управления технологическими объектами с распределенными параметрами Дис. … д-ра техн. наук. СамГТУ. Самара, 2009. 416 с.

9. **Pleshivtseva Yu., Zaikina N., Nacke B. et al.** Time-optimal control of energy-efficient heating of aluminum billets rotating in DC magnetic field / Przeglad Electro-techniczny (Electrical Review). 2008. R. 84 № 11/2008. P. 120–123.

10. **Pleshivtseva Yu., Rapoport E., Efimov A. et al.** Special Method of Parametric Optimization of Induction Heating Systems // International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing. Hannover, Oct. 27–29 2008. P. 229–234.

УДК 656.025.4.6

И.А. Русинов, Н.Ю. Барышникова

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ

Контейнерные перевозки являются наиболее удобным и экономичным способом транспортировки грузов. Конструкция грузового контейнера обеспечивает сохранную перевозку грузов в любой комбинации морских, речных и сухопутных видов транспорта. При этом интенсифицируются процессы переработки грузов, минимизируются затраты в транспортных узлах, упрощается мониторинг. Основным транспортным узлом в контейнерных перевозках является специализированный контейнерный терминал. На терминале осуществляется переработка грузов, прибывающих на морских и речных судах в импорте, а также – по железной дороге и автомобильным транспортом в экспорте.

Неотъемлемой частью специализированного терминала являются каналы переработки грузов, которыми в частных случаях являются морские или речные причалы. При разработке и эксплуатации терминалов возникает необходимость определения показателей качества процессов переработки грузов, характеризующих среднее время ожидания судов и среднее время пребывания судов на терминале, а также пропорциональных этим показателям – средних значений числа судов, находящихся в очереди или на терминале. Указанные показатели характеризуют качество услуг, т. к. ожидание в очереди приводит к существенным потерям для транспортных компаний. В результате, несмотря на увеличение грузооборота, излишнее увеличение коэффициента загрузки каналов становится экономически нерентабельным. При этом величина убытков возрастает с увеличением числа судов, простаивающих в ожидании освобождения каналов.

В настоящее время широкое распространение получили детерминированные модели переработки грузов. При использовании детерминированных моделей предполагается, что прибытие к терминалу морских или речных судов представляет собой регулярный поток событий, в котором прибытия следуют одно за другим строго по графику через одинаковые промежутки времени. Однако детерминированные модели не отражают специфику функционирования специализированных терминалов. В действительности моменты прибытия судов к терминалу – нерегулярные потоки событий.

Процессы, протекающие при обработке судов, переходят из одного состояния в другое в случайные моменты времени. При этом меняется число судов, находящихся в очереди и число занятых каналов. Переход процессов из одного состояния в другое происходит в моменты когда либо новое судно подходит к терминалу, либо освобождается один из каналов. Система содержит n+1 счётное множество состояний: E_0, E_1, E_2, …, En, где n – число судов, находящихся в системе, т. е. учитываются как суда, находящиеся в очереди, так и суда, которые находятся в обработке.

Как известно, суммарный поток моментов прибытия морских или речных судов к терминалу можно рассматривать как сумму потоков судов, принадлежащих различным компаниям и доставляющих различные грузы.

В то же время известно, что при взаимном наложении большого числа ординарных стационарных потоков с практически любым последействием получается поток, сколь угодно близкий к стационарному пуассоновскому (простейшему) потоку. Будем также считать, что время обработки судна подчиняется показательному закону распределения.

Принятые допущения о пуассоновском потоке прихода судов и показательном распределении времени обработки контейнерных грузов позволяют использовать для описания процессов в контейнерных терминалах аппарат массового обслуживания. Применение аппарата массового обслуживания позволяет описать процесс обработки судов в контейнерном терминале с помощью линейных дифференциальных уравнений и представить выражения для вероятностных показателей качества процессов в аналитической форме. Однако применение существующих моделей массового обслуживания для определения вероятност-

ных характеристик процессов обработки судов не представляется целесообразным, т. к. эти модели неадекватно описывают указанные процессы в реальных условиях функционирования.

Так, классическая теория обслуживания предусматривает исследование многоканальной системы, причём число приборов S равно числу каналов. Каждый канал может обслуживаться одним прибором независимо от других каналов (система массового обслуживания (СМО) без взаимопомощи). Кроме того, каналы могут обслуживать все свободные приборы или часть свободных приборов (СМО с полной или частичной взаимопомощью). Вероятности переходов системы из состояния E_n в состояния E_{n-1}, т. е. вероятность обслуживания одной заявки зависит от числа работающих каналов обслуживания. Результирующая интенсивность обслуживания в n–м состоянии определяется на основе принципа линейной суперпозиции, т. е. равна суммарной интенсивности всех приборов обслуживания и кратна расчётной интенсивности одного прибора μ_0. Таким образом, результирующая интенсивность обслуживания в этом случае не может превышать $S\mu_0$, т. е. $\mu_p \le S\mu_0$, а интенсивность обслуживания одним прибором μ_0 не меняется в зависимости от состояния СМО. Кроме того, процесс обслуживания считается непрогнозируемым и неуправляемым, т. е. администратору СМО неизвестно число заявок, которые в ближайшее время поступят в систему, и он не может в зависимости от состояния СМО менять интенсивности приборов обслуживания.

В реальных условиях функционирования терминала, процессы переработки грузов неадекватны указанным допущениям. Именно поэтому рассматривается централизованная система обработки грузов, управление которой осуществляется администратором (диспетчером) терминала. Администратор определяет дисциплину очереди и дисциплину обслуживания, а также производит распределение человеческих и технических ресурсов между отдельными каналами. В случае необходимости, когда очередь судов существенно возрастает, администратор может привлечь дополнительные ресурсы, тем самым существенно увеличивая интенсивность обработки грузов отдельными каналами. Однако во многих случаях в виду ограничения фронта перегрузочных работ результирующая интенсивность системы становится меньше суммарной интенсивности отдельных технических средств. Таким образом, в реальных условиях результирующая интенсивность обработки грузов, как правило, не бывает кратной средней интенсивности обработки μ_0 и в отдельных случаях может превышать величину $S\mu_0$.

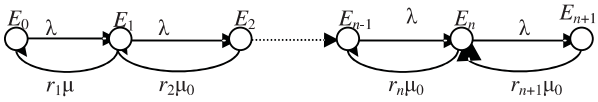
Указанные особенности централизованной системы обработки контейнерных грузов требуют, чтобы разрабатываемые вероятностные модели учитывали возможность изменений интенсивности отдельных приборов обслуживания в зависимости от состояния СМО. Однако классическая теория массового обслуживания оперирует с постоянными значениями интенсивности отдельных приборов восстановления. Поэтому одним из основных научных результатов настоящей работы, является развитие классической теории массового обслуживания с учётом специфики функционирования контейнерного терминала, т. е. с учётом возможности изменения значения интенсивности обслуживания отдельными приборами в зависимости от состояния СМО.

Рассмотрим контейнерный терминал, включающий S каналов, на вход которых поступает простейший поток судов (заявок) с интенсивностью λ. Расчётная интенсивность обработки каждым причалом равна μ_0. Однако результирующая интенсивность процесса может меняться в зависимости от его состояния. Результирующая интенсивность обработки грузов в состоянии $E_n = r_n\mu_0$, где r_n – коэффициент интенсивности обработки может быть как целым, так и дробным числом. Как правило, когда заняты все причалы, т. е. $n \ge S$ предполагается что $r_n = \text{const}$ (обычно $r_n = r_{\max}$).

Возможностью «перескока» системы через состояние (например, из E_n в E_{n+2} или из E_{n-1} в E_{n+1}, минуя состояние E_{n+1} и E_n) за малый промежуток времени dt можно пренебречь, как величиной высшего порядка малости.

Величина r_n характеризует результирующую интенсивность обработки контейнерных грузов в состоянии E_n; r_n может быть как целым, так и дробным числом, а в отдельных случаях – превышать величину S.

Наглядное представление о марковском процессе обработки грузов даёт квадратная матрица интенсивностей простейших потоков прихода судов и обработки грузов. Если рассматривать n+1 состояние системы, то матрица интенсивностей имеет вид:



Граф состояний

$$\lambda = \begin{array}{c} \begin{matrix} E_0 & E_1 & E_2 & E_3 & \dots & E_{n-1} & E_n & E_{n+1} \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & \lambda & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ r_1\mu_0 & 0 & \lambda & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2\mu_0 & 0 & \lambda & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3\mu_0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & r_n\mu_0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & r_{n+1}\mu_0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{matrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ E_{n-1} \\ E_n \\ E_{n+1} \end{matrix} \quad (1)$$

Матрице интенсивностей соответствует ориентированный граф состояний, в котором размер ребра, связывающий два последовательных состояния, равен соответствующей интенсивности перехода из одного состояния в другое. Указанный граф состояний приведен на рисунке.

Рассмотрим, какими свойствами должна обладать матрица интенсивностей, а, следовательно, и граф состояний, чтобы в СМО протекали пуассоновские процессы. Для этого необходимо чтобы все потоки событий, переводящие систему из одного состояния в другое, были пуассоновским (простейшими), т. е. элементы матрицы интенсивностей (1) не изменялись во времени. Таким образом, коэффициенты r_n (n = 1, 2, 3...) могут принимать любые целые или дробные положительные значения, но должны оставаться постоянными величинами. Такая матрица обычно называется простейшей матрицей, а соответствующий случайный процесс – простейшим марковским процессом. Аналогичным образом граф состояний (рис.), из которого каждому ребру соответствуют постоянные значения интенсивностей, будем называть простейшим графом состояний.

На основе графа состояний может быть составлена стохастическая матрица переходов. При этом следует учитывать, что, как показано выше, ввиду отсутствия «перескока» событие v может быть только одним из трёх событий E_{n-1}, E_n, E_{n+1} ($v = n–1, n, n+1$). Соответственно каждая строка и каждый столбец стохастической матрицы не должны содержать больше трёх ненулевых элементов. В соответствии с вышеизложенным, представим вероятности перехода системы из одного состояния в другое следующим образом:

$$\begin{cases} E_0 \to E_0 & P_{00} = 1 - \lambda t, \\ E_0 \to E_1 & P_{01} = \lambda t, \\ E_1 \to E_0 & P_{10} = r_1\mu_0 t. \end{cases}$$

$$1 \le n \le S \begin{cases} E_n \to E_n & P_{nn} = 1 - (\lambda + r_n\mu_0)dt, \\ E_n \to E_{n+1} & P_{n,n+1} = \lambda t, \\ E_n \to E_{n-1} & P_{n,n-1} = r_n\mu_0 dt. \end{cases}$$

$$n \ge S \begin{cases} E_n \to E_n & P_{nn} = 1 - (\lambda + r_n\mu_0)dt, \\ E_n \to E_{n+1} & P_{n,n+1} = \lambda dt, \\ E_n \to E_{n-1} & P_{n,n-1} = r_n\mu_0 dt. \end{cases}$$

Тогда стохастическую матрицу переходов можно представить в виде матрицы:

$$J(t) = \begin{array}{c} \begin{matrix} E_0 & E_1 & E_2 & E_3 & E_{n-1} & E_n \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 1-\lambda dt & \lambda dt & 0 & 0 \dots & 0 & 0 \\ r_1\mu_0 dt & 1-(\lambda + r_1\mu_0)dt & \lambda dt & 0 \dots & 0 & 0 \\ 0 & r_2\mu_0 dt & 1-(\lambda + r_2\mu_0)dt & \lambda dt \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\vdots\vdots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \dots & 1-(\lambda + r_{n-1}\mu_0)dt & \lambda dt \\ 0 & 0 & 0 & 0 \dots & r_n\mu_0 dt & 1-(\lambda + r_n\mu_0)dt \\ 0 & 0 & 0 & 0 \dots & 0 & r_{n+1}\mu_0 dt \end{bmatrix} \end{array} . \quad (2)$$

Строкам матрицы соответствует состояние $E_n(t)$, а столбцам $E_{n+1}(t)$. Осуществив операцию транспонирования над левой и правой частями выражения $P^T(t + dt) = P^T(t)J(t)$, получим: $\vec{P}(t + dt) = J^T(t)\vec{P}(t)$, где J^T(t) – матрица, транспонированная к матрице переходов $J(t)$; $\vec{P}(t)$ – вектор столбец вероятностей размерностей n×1.

Представим (2) в виде: $\vec{P}(t + dt) = \left[J^T(t) - E_n\right] \times \vec{P}(t) + P(t)$.

Перенесём $P(t)$ в левую часть, тогда: $\vec{P}(t+dt) - \vec{P}(t) = \left[J^T(t) - E_n\right]\vec{P}(t)$.

Разделив левую и правую части (2) на dt, получим: $\vec{P}'(t) = R\vec{P}(t)$, где $R = \frac{1}{dt}\left[J^T(t) - E_n\right]$ – матрица, которая имеет вид:

$$R = \begin{array}{c} \begin{matrix} P_0 & P_1 & P_2 & & P_{n-1} & P_n & P_{n+1} \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} -\lambda & r_1\mu_0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & -(\lambda + r_1\mu_0) & r_2\mu_0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & -(\lambda + r_2\mu_0) & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\vdots\vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -(\lambda + r_{n-1}\mu_0) & r_n\mu_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda & -(\lambda + r_n\mu_0) & r_{n+1}\mu_0 \end{bmatrix} \end{array} \begin{matrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ P_n \end{matrix}$$

Первые n+1 дифференциальных уравнений системы обработки грузов можно также представить в виде:

$$\begin{aligned} P_0'(t) &= -\lambda P_0(t) + r_1\mu_0 P_1(t), \\ P_0'(t) &= \lambda P_0(t) - (\lambda + r_1\mu_0)P_1(t) + r_2\mu_0 P_2(t), \\ &\dots \\ P_n'(t) &= \lambda P_{n-1}(t) - (\lambda + r_n\mu_0)P_n(t) + r_{n+1}\mu_0 P_{n+1}(t), \; n = 1,2,3... \end{aligned} \quad (3)$$

Будем считать, что процесс обработки грузов является марковским случайным эргодическим, т. е. по истечению достаточно продолжительного промежутка времени (теоретически при $t\to\infty$) вероятности состояний системы обработки грузов практически не зависят от того, в каком состоянии система находилась в начальный момент времени при $t = 0$ и не зависит от самого промежутка времени. Такое допущение возможно, т. к. все потоки событий, переводящие систему из одного состояния в другое, являются простейшими, т. е. все элементы матрицы интенсивностей (1) являются постоянными величинами.

На основе уравнений (3) производится исследование системы переработки грузов в динамических режимах.

Режим работы контейнерного терминала, при котором вероятности P_n нахождения системы в состоянии n не зависят от времени, называется стационарным режимом. Таким образом, контейнерный терминал имеет предельные стационарные режимы. Характеристики этих режимов зависят не от того, в каком состоянии контейнерный терминал находился в начальный момент времени, а от принятой дисциплины обработки грузов, т. е. от распределения ресурсов контейнерного терминала.

Для определения значений вероятностей отдельных состояний системы в стационарных режимах необходимо приравнять к нулю значения производных состояний, т. е. левых частей системы уравнений (3).

Распишем систему уравнений более подробно, перенесём в каждом уравнении одно из слагаемых в левую часть:

$$r_1\mu_0 P_1 = \lambda P_0,$$
$$r_2\mu_0 P_2 = (\lambda + r_1\mu_0)P_1 - \lambda P_0,$$
$$r_3\mu_0 P_3 = (\lambda + r_2\mu_0)P_2 - \lambda P_1,$$
$$\dots$$
$$r_n\mu_0 P_n = (\lambda + r_{n-1}\mu_0)P_{n-1} - \lambda P_{n-2}.$$

Введём обозначение $\psi = \dfrac{\lambda}{\mu_0}$ и назовём его приведённой плотностью потока прихода судов. Выражение соотношений между стационарными значениями вероятностей отдельных состояний:

$$P_1 = \frac{1}{r_1}\psi P_0,$$

$$P_2 = \frac{1}{r_2}\psi P_1 = \frac{1}{r_1 r_2}\psi^2 P_0, \qquad (4)$$

$$P_3 = \frac{1}{r_3}\psi P_2 = \frac{1}{r_2 r_3}\psi^3 P_0,$$

$$\dots$$

$$P_n = \frac{1}{r_n}\psi P_{n-1} = \frac{1}{\prod_{i=0}^{n} r_i}\psi^n P_0.$$

Используя выражение (4), получим нормировочное условие:

$$P_0\left[\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{\prod_{i=0}^{n} r_i}\psi^n\right] = 1,$$

где r_0 берётся равным 1.

Вероятность нулевого состояния системы, т. е. вероятность того, что в момент прихода судна в порт все причалы будут свободны, определяется выражением:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{\prod_{i=0}^{n} r_i}\psi^n}. \qquad (5)$$

Будем считать, что при $n \ge S$' результирующая интенсивность системы равна $r_{\max}\mu_0$. Обычно $S' = S$, т. е. равна числу причалов. Однако в отдельных случаях S' может быть как больше, так и меньше числа причалов S. В дальнейшем, если это не будет оговорено, будем считать $S' = S$. Тогда:

$$P_n = \frac{P_0}{\prod_{i=0}^{n} r_i}\psi^n,$$

$$P_{S+d} = P_0\frac{\psi^S}{\prod_{n=1}^{S} r_n}\left(\frac{\psi}{r_{\max}}\right)^d.$$

Нормировочное условие можно записать следующим образом:

$$P_0\left[\sum_{n=0}^{S-1}\frac{\psi^S}{\prod_{n=1}^{S} r_n} + \frac{\psi^S}{\prod_{n=1}^{S-1} r_n}\sum_{d=0}^{\infty}\left(\frac{\psi}{r_{\max}}\right)^d\right] = 1. \qquad (6)$$

Вторая сумма (6) представляет сумму членов геометрической прогрессии. Отсюда:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{S-1}\frac{\psi^S}{\prod_{i=o}^{n} r_i} + \frac{\psi^S}{\prod_{n=1}^{S} r_n\left(1-\frac{\psi}{r_{\max}}\right)}}. \qquad (7)$$

Выражение (7) является наиболее общим выражением для вероятности того, что в момент прихода судна в порт все причалы свободны. В зависимости от дисциплины обработки грузов (без взаимопомощи, с полной или частичной взаимопомощью, а также в случаях, когда интенсивность обработки грузов отдельными причалами меняется в зависимости от состояния системы) значение коэффициентов r_i, а, следовательно, и элементов матрицы интенсивностей и переходов будет меняться. Соответственно будут меняться и выражения для вероятностей состояний системы. Но все они могут рассматриваться, как частные случаи выражений (4) и (7). Стационарный режим системы существует только при выполнении следующего условия: $\frac{\psi}{r_{\max}} < 1$.

Если взять $r_{\max} = S$ (как это достаточно часто встречается на практике), то условие существования стационарного режима можно записать в виде: $\varphi = \frac{\psi}{S} \le 1$, где φ – коэффициент загрузки системы обработки судов.

Из этих условий следует, что среднее число судов, обрабатываемых в единицу времени всеми S причалами должно быть больше среднего числа судов, поступающих в терминал в единицу времени. Если это условие не выполняется, то число мест в очереди считается бесконечным, а в терминале не будет стационарного режима. Действительно при $\psi \ge r_{\max}$ ($\varphi \ge 1$), процесс неограниченно перемещается в сторону состояний с большим числом d, и очередь будет неограниченно возрастать. Тогда при $\psi \ge r_{\max}$ ($\varphi \ge 1$), для любого конечного d $\lim P_{S+d} = 0$, т. е. система должна обязательно пройти состояние $S+d$ и не вернуться в него. Действительно при $r_{\max} = \psi$, как видно из (5) и (6), вероятности P_0 и P_n равны 0. При $r_{\max} < \psi$ эти выражения теряют физический смысл.

Определим среднее число судов, находящихся в очереди:

$$\bar{d} = \sum_{n=S+1}^{\infty}(n-S)P_n = \sum_{d=1}^{\infty} dP_{S+d} = P_S \sum_{d=1}^{\infty} d\left(\frac{\psi}{r_{\max}}\right)^d,$$

где $d = n - S$ число судов, находящихся в очереди:

$$P_S = P_0 \frac{\psi^S}{\prod_{i=1}^{S} r_i}.$$

Получим выражение для среднего числа судов, находящихся в очереди:

$$\bar{d} = P_0 \frac{\psi^S}{\prod_{i=1}^{S} r_i} \frac{\frac{\psi}{r_{\max}}}{\left(1-\frac{\psi}{r_{\max}}\right)^2} = P_0 \frac{\psi^{S+1}}{\prod_{i=1}^{S-1} r_i (r_{\max}-\psi)^2}.$$

Определим среднее число судов, находящихся в терминале:

$$\bar{d}_{\Sigma} = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = \sum_{n=0}^{S-1} nP_n + \sum_{n=S+1}^{\infty} nP_n.$$

Тогда среднее общее число судов в терминале:

$$\bar{d}_{\Sigma} = \bar{d} + S - \sum_{n=0}^{S}(S-n)\frac{\psi^n}{\prod_{n=1}^{S} r_n} P_0.$$

Следует отметить, что независимо от значения ψ и S, среднее число в терминале равно сумме среднего числа обрабатываемых судов и среднего числа судов, находящихся в очереди, т. е. $\bar{d}_{\Sigma} = \bar{d}_{\text{обр}} + \bar{d}$.

Соответственно, среднее число судов, находящихся в обработке:

$$\bar{d}_{\text{обр}} = S - \sum_{n=0}^{S}(S-n)\frac{\psi^n}{\prod_{n=1}^{S} r_n} P_0.$$

Среднее время ожидания судна в очереди и среднее общее время пребывания судна в терминале определяются с помощью формул Литтла.

Среднее время задержки судна в ожидании процесса обработки из-за занятых причалов:

$$\bar{T}_{\text{ож}} = \frac{\bar{d}}{\lambda} = \frac{P_0}{\lambda}\frac{\psi^{S+1}}{\prod_{i=1}^{S-1} r_i (r_{\max}-\psi)^2} = \frac{P_0}{\mu_0}\frac{\psi^S}{S\prod_{i=1}^{S-1} r_i (1-\varphi)^2}.$$

Среднее общее время пребывания судна в терминале:

$$\bar{T}_{\Sigma} = \frac{\bar{d}_{\Sigma}}{\lambda} = \frac{\bar{d}}{\lambda} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\lambda}\left[S - \sum_{n=0}^{S}(S-n)P_n\right] =$$

$$= \bar{T}_{\text{ож}} + \frac{1}{\lambda}\left[S - \sum_{n=0}^{S}(S-n)P_n\right].$$

Полученные вероятностные модели процессов переработки грузов позволяют произвести вероятностный анализ характеристик указанных процессов в общем случае с учётом возможной зависимости коэффициента интенсивности r_n от дисциплины переработки грузов.

Произведённые расчеты помогают администратору специализированного терминала решать вопросы планируемой интенсивности потока прихода судов в определённый период времени

с учётом допустимой длины очереди и достаточно высокой пропускной способности. Если во время указанного периода интенсивность прихода судов увеличивается по сравнению с планируемой, то администратор передаёт часть судов на смежный терминал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кузин Л.Т.** Основы кибернетики: В 2 т. // Т. 2: Основы кибернетических моделей. М.: Энергия, 1979. 576 с

2. **Русинов И.А.** Обработка и хранение рефрижераторных грузов на специализированном терминале. СПб.: СПбИИ РАН, 2005. 168 с.

3. **Русинов И.А.** Формализация и оптимизация процессов переработки рефрижераторных грузов на специализированных терминалах. СПб.: Политехника, 2008. 472 с.

УДК 351.713

Н.А. Руденко, М.П. Комаров

КЛЮЧЕВЫЕ СКВОЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОРГАНИЗАЦИИ И МЕТОДИКА ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ

В управлении широкое распространение получил процессный подход как метод фундаментального проектирования различных процессов. Международный стандарт системы менеджмента качества ISO 9000:2000 определяет процесс как «совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, которые преобразуют входы в выходы», при этом «любая деятельность или совокупность видов деятельности, которая использует ресурсы для преобразования входов в выходы, может рассматриваться как процесс» [2].

Процессный подход к управлению организацией позволяет руководителям определять процессы и управлять ими и результатами деятельности организации, а также интегрировать разрозненные действия функциональных подразделений и направлять их усилия на достижение единого результата.

В современных исследованиях можно встретить два различных подхода к выделению процессов организации. Часть авторов придерживается подхода к сегментации (выделению) процессов в рамках структурных подразделений, другие же используют понятие сквозных или межфункциональных процессов [1, 5]. Дадим определения этим понятиям. Процесс подразделения – это процесс, ограниченный рамками одного структурного подразделения организации [6]. А все ресурсы, необходимые для выполнения процесса, находятся под управлением руководителя структурного подразделения, при этом он же является владельцем процессов подразделения, как показано на рис. 1.

Сквозной процесс – это процесс, полностью или частично включающий деятельность, выполняемую структурными подразделениями организации, имеющими различную функциональную

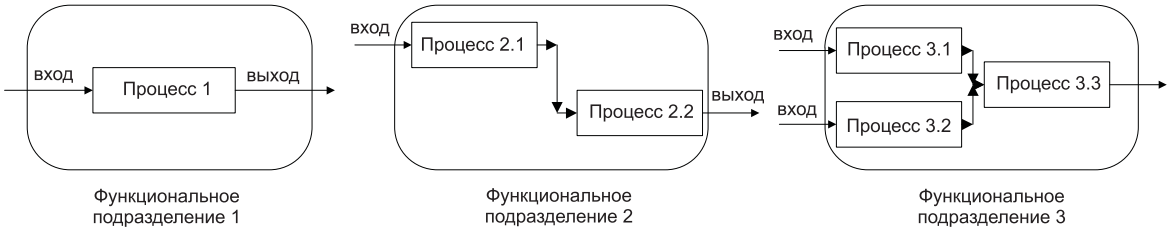


Рис. 1. Модель процессов подразделений

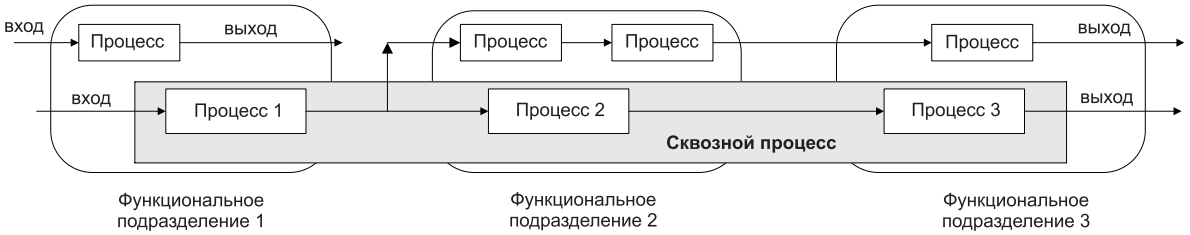


Рис. 2. Модель сквозного процесса

подчинённость [5]. Пример сквозного процесса показан на рис. 2.

Очевидно, что могут исследоваться обе группы процессов в зависимости от поставленных целей и особенностей организации. Однако в реальной организации взаимозависимости различных функциональных действий могут быть очень сложны и представлены сетью различных процессов и подпроцессов. При таком подходе определять и описывать все виды деятельности как процессы оказывается достаточно трудоёмко. В случае если система в целом не требует реорганизации или она невозможна, целесообразно сосредоточить внимание на процессах, при реализации которых возникают наибольшие трудности. А это, как правило, процессы «взаимодействия», в выполнении которых участвуют разные функциональные подразделения, т. е. сквозные процессы. Основные проблемы при реализации таких процессов чаще всего вызваны следующими причинами:

сотрудники организации (исполнители) не понимают совсем или не до конца понимают свою роль в процессе;

требования к результатам работ и срокам их выполнения не установлены;

взаимодействие между сотрудниками носит хаотический характер;

никто не отвечает за качество конечного результата и сроки.

Отнесение деятельности того или иного подразделения к сквозному процессу является субъективным и зависит от конкретной организации. Очевидно, что не все сквозные процессы требуют исследования, а только ключевые. При этом под ключевыми сквозными процессами будем понимать процессы, требующие дальнейшего более глубокого изучения: моделирования, анализа и, возможно, оптимизации.

Цель выделения таких процессов состоит в том, чтобы обеспечить понимание сквозных процессов руководителями и сотрудниками организации, научить исполнителей «видеть процесс целиком» и понимать конечный результат, а также определить возможные направления оптимизации сквозных процессов через улучшение взаимодействия вовлечённых в них подразделений (сотрудников) и достижение синергетических эффектов. Следовательно, ключевых сквозных процессов в организации должно быть ровно столько, сколько необходимо для налаживания эффективного взаимодействия подразделений на межфункциональном уровне.

Для решения задачи выбора сквозных процессов для последующего моделирования и оптимизации может быть предложена следующая методика.

I э т а п. Выделение сквозных процессов.

На основе анализа всей совокупности функций, осуществляемых организацией, формируется список процессов организации. При этом все процессы организации можно подразделить на две группы: процессы подразделений и сквозные процессы. Применяя приведённое выше определение понятия «сквозной процесс», для их выявления и идентификации можно сформулировать два условия:

1. Процесс проходит через несколько функциональных подразделений.

При этом под понятием «функциональные подразделения» можно понимать подразделения разных иерархических уровней. Например, участки работы в одном отделе, отделы, группы отделов, зависимые организации и др.

2. Подразделения, через которые проходит процесс, имеют различную функциональную подчинённость. Владелец процесса не назначен или назначен формально.

II э т а п. Выделение ключевых сквозных процессов с помощью разработанных критериев.

Для решения задачи выбора ключевых сквозных процессов для последующего моделирования и оптимизации разработаны следующие критерии:

1. Процесс существенно (значительно) влияет на достижение конечных целей деятельности организации.

2. Процесс существенно (значительно) влияет на эффективность деятельности организации.

3. Процесс часто повторяется (несколько раз в день, в квартал, в год).

4. В рамках процесса существует значительный документооборот (десятки и сотни документов).

Второй этап методики состоит в экспертной оценке каждого сквозного процесса по системе предложенных критериев. Если процесс отвечает сформулированному требованию, то критерию присваивается значение единица, если нет – ноль. Далее система процессов, система критериев и присвоенные им значения представляются в форме таблицы. В последнем столбце таблицы размещаются окончательные результаты оценки каждого процесса. По итогам оценки всех процессов организации выявляется окончательный перечень ключевых сквозных процессов. Если процесс удовлетворяет перечню критериев, по всем столбцам проставлена единица, то он требует дальнейшего более глубокого изучения: моделирования, анализа и, возможно, оптимизации.

Таким образом, можно сформулировать следующее правило: *сквозной процесс является ключевым и требует дальнейшего исследования, если удовлетворяет всем критериям одновременно*. Сквозной процесс, не удовлетворяющий указанным выше критериям, скорее всего, будет второстепенным и незначительным, а время и ресурсы, которое можно потратить на его анализ и реорганизацию, не оправдаются экономически.

Предложенные критерии позволят руководству сосредоточить внимание на наиболее значимых проблемах, выбрать для исследования те процессы, которые требуют чёткой регламентации, контроля и оптимизации.

Блок-схема методики (алгоритм действий) выявления ключевых сквозных процессов, требующих дальнейшего исследования в организации, представлена на рис 3.

Данная методика может применяться при реализации процессного подхода в органах государственной власти. Деятельность таких организаций строго регламентирована нормативно-правовыми актами и, в то же время, многие процессы (особенно процессы взаимодействия) чётко не прописаны законодательством и нормативными документами. Типичным является относительно высокий уровень регламентации процессов внутри ведомств, при одновременно низком уровне регламентации межведомственного взаимодействия, где слабо определена ответственность и контроль сроков исполнения. Вследствие этого типичными проблемами при управлении органами государственной власти становятся несоблюдение сроков исполнения, чрезмерный документооборот, рассогласованность действий подразделений (ведомств), отсутствие ответственности за конечный результат и др.

Рассмотрим деятельность конкретного органа государственной власти – Межрегиональной инспекции Федеральной налоговой службы по крупнейшим налогоплательщикам. С точки зрения системного подхода, налоговые органы можно рассматривать как сложную общественно-экономическую систему с множеством прямых и обратных связей, в которой деятельность – налоговое администрирование – трактуется как процесс, преобразующий ресурсы в заданные результаты [3]. Однако некоторые процессы налогового администрирования недостаточно организованы и низкоэффективны. Так, например, на современном этапе развития налоговых органов существует ряд системных проблем, к ним относятся: непрерывное увеличение налогового документооборота, усложнение и постоянное изменение процедур налогового законодательства, огромные трудозатраты на обработку налоговых документов, низкая эффективность контрольной работы и др.

Применим предложенную методику для выбора ключевых сквозных процессов в Межрегиональной инспекции ФНС по крупнейшим налогоплательщикам № 9.

На первоначальном этапе проанализируем всю совокупность процессов, протекающих в рамках налоговой инспекции, и составим перечень сквозных, в выполнении которых задействованы сотрудники разных функциональных подразделений (отделов). Анализ функций проведём на основе «Положения о Межрегиональной инспекции ФНС по крупнейшим налогоплательщикам № 9», а также положений об отделах инспекции. Можно выделить более пятидесяти процессов, реализуемых в инспекции. В результате анализа выясняется, что к сквозным относятся шесть процессов: проведение камеральных и выездных проверок, приём сальдо по закрытым филиалам, постановка и снятие с налогового учёта плательщиков, подготовка

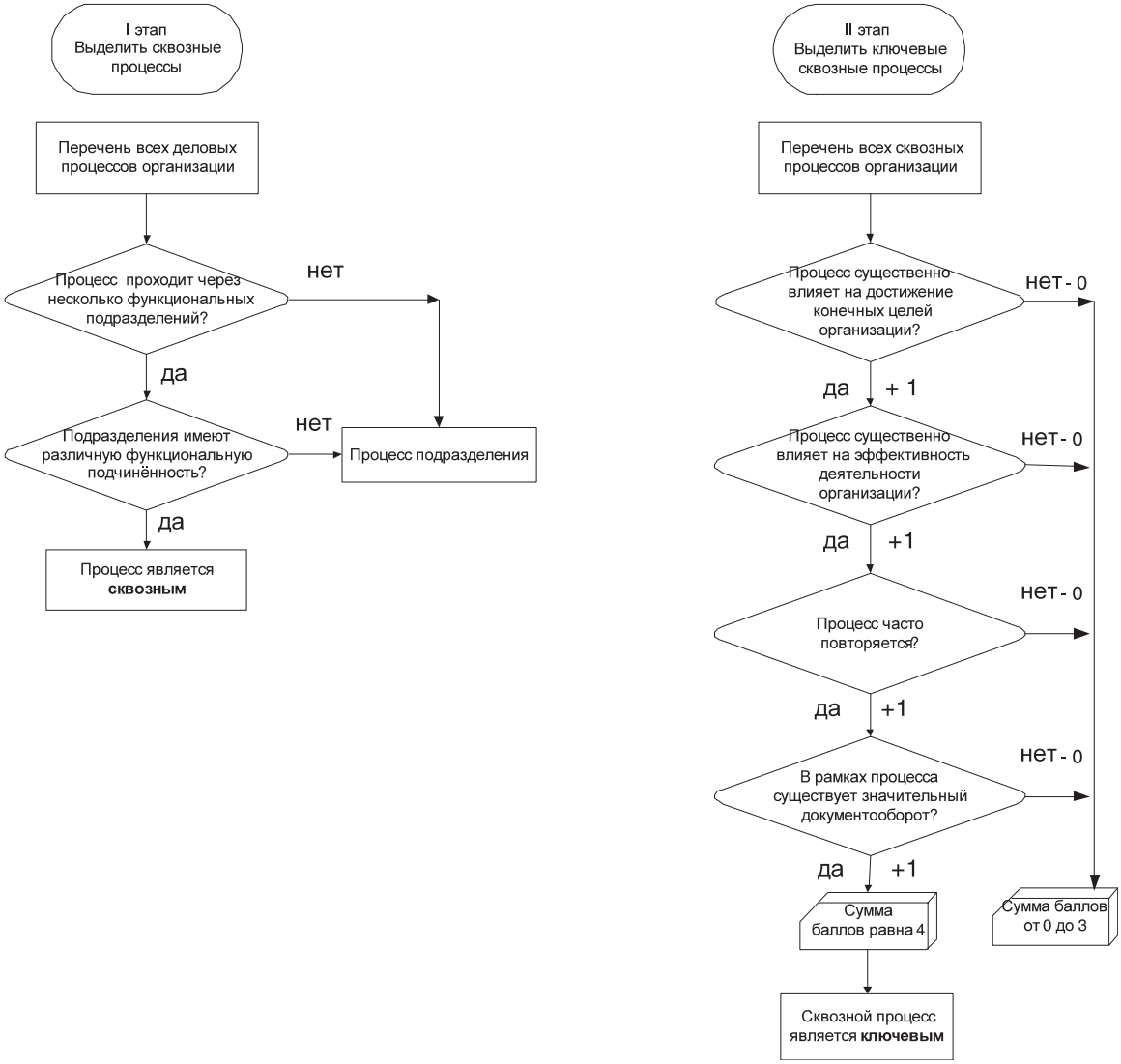


Рис. 3. Блок-схема методики выявления ключевых сквозных процессов организации

отчётов в Федеральную налоговую службу, планирование налоговых проверок. Так, например, при проведении выездной налоговой проверки могут быть задействованы несколько выездных отделов (специализирующихся по разным налогам), отделы правового обеспечения, налогового аудита, анализа и планирования налоговых проверок [4]. В ходе выполнения процесса нередко возникает рассогласованность, а иногда и противоречивость действий.

Далее проведём экспертную оценку сквозных процессов по системе предложенных критериев (см. табл.).

Из таблицы следует, что в Межрегиональной инспекции ФНС ключевыми сквозными процессами, требующими исследования, являются:

проведение камеральных проверок;

проведение выездных проверок;

приём сальдо по закрытым филиалам.

Рассмотрение приведённых выше сквозных процессов, выделенных по предложенным критериям, их анализ, выявление и устранение проблем, безусловно, может дать положительный эффект. Так, после того, как процессы выделены, можно разработать нормативно-методические документы, регламентирующие деятельность и взаимодействие подразделений для повышения результативности и эффективности. Построенная модель процесса может позволить увидеть его от начала до конца всем участникам, обсудить его, утвердить и потом добиваться выполнения в установленные сроки с требуемым уровнем качества.

Выявление ключевых сквозных процессов в Межрегиональной инспекции ФНС по крупнейшим налогоплательщикам

Критерий / Процесс	Процесс существенно влияет на достижение конечных целей деятельности организации	Процесс существенно влияет на эффективность деятельности организации	Процесс часто повторяется (несколько раз в день, в квартал, в год)	В рамках процесса существует значительный документооборот	Итого
1. Проведение камеральных проверок	1	1	1	1	4
2. Постановка на налоговый учёт, снятие с учёта плательщиков	0	0	1	1	2
3. Приём сальдо по закрытым филиалам	1	1	1	1	4
4. Проведение выездных проверок	1	1	1	1	4
5. Подготовка отчётов в ФСН	0	0	0	1	1
6. Планирование налоговых проверок	1	1	0	0	2

Все определённые таким образом процессы обязательно должны иметь своих владельцев. В их распоряжении должны находиться ресурсы, необходимые для выполнения процесса. Владелец процесса должен координировать деятельность сотрудников из разных подразделений, контролировать сроки и проверять качество промежуточных результатов, организовывать необходимые совещания и т. п.

В каждой организации, в т. ч. и в налоговых органах, существует два типа процессов: сквозные и процессы подразделений. Руководство организации должно сосредотачивать своё внимание, прежде всего, на оптимизации сквозных процессов, а среди них – на ключевых процессах. Для научного выявления сквозных процессов целесообразно использовать предложенную классификацию и методику выявления перечня ключевых сквозных процессов. Выделение сквозных процессов в организации может дать такие положительные результаты как системное понимание руководством организации и реальное управление процессами, улучшение взаимодействия вовлечённых в сквозные процессы подразделений (сотрудников) и, как следствие, повышение результативности, эффективности и качества выполняемых видов деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефимов В.В.** Описание и улучшение бизнес-процессов: Учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2005. 84 с.

2. Международный стандарт ИСО 9000. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. 2-е изд. 2000-12-15. ISO - 2000.

3. **Паскачев А.Б., Джамурзаев Ю.Д., Хубаев Г.Н. и др.** Моделирование деловых процессов в налоговых инспекциях / Под ред. Т.В. Шевцовой, Д.А. Чушкина. М.: Изд-во экономико-правовой литературы, 2006.

4. Положение об отделе выездных проверок Межрегиональной инспекции по крупнейшим налогоплательщикам № 9. Утв. нач. МИ ФНС по крупнейшим налогоплательщикам № 9 от 25.07.2009.

5. **Репин В.В.** Два понимания процессного подхода к управлению предприятием // Методы менеджмента качества. 2007. № 4.

6. **Репин В.В., Елиферов В.Г.** Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. 408 с.

УДК 681.3

А.В. Крошилин, А.В. Бабкин, С.В. Крошилина

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Мощные компьютерные системы, хранящие информацию и управляющие огромными базами данных, стали неотъемлемым атрибутом жизнедеятельности как крупных корпораций, так и небольших компаний. Тем не менее, наличие данных само по себе недостаточно для улучшения показателей работы. Следует уметь трансформировать сырые данные в информацию, полезную для принятия решений [6].

Теория нечётких множеств имеет неоспоримое преимущество над вероятностными подходами, которое заключается в том, что системы поддержки принятия решений, построенные на её основе, обладают повышенной степенью обоснованности принимаемых решений. Это связано с тем, что в расчёт попадают все возможные сценарии развития событий, что несвойственно вероятностным методам, рассчитанным на конечное (дискретное) множество сценариев.

Знания человека-эксперта о решении задач в условиях неполноты, нечёткости исходной информации и поставленных целей также имеют нечёткий характер. Для их формализации в настоящее время успешно применяется аппарат теории нечётких множеств и нечёткой логики. Нечёткие понятия в данном случае формализуются в виде нечётких и лингвистических переменных, а нечёткость действий в процессе принятия решения – в виде нечётких алгоритмов [4]. Системы поддержки принятия решений, способные формализовывать нечёткую информацию и обрабатывать её в рамках нечётких алгоритмов, будем называть системами поддержки принятия решений на основе нечёткой логики (СППР НЛ).

Применение семантической сети для разрабатываемой системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики

Основная задача – разработка систем поддержки принятия решений, осуществляющих сбор и управление знаниями экспертов, принимающих решения об оптимальном способе достижения целей в условиях неполноты и нечёткости предметной области.

В настоящее время большую актуальность приобретает необходимость многокритериального моделирования поддержки принятий решений при планировании хозяйственных процессов на предприятии [1].

Использование СППР НЛ для решения объёмных, трудно формализуемых задач в различных предметных областях характеризуются, как правило, отсутствием или сложностью формальных алгоритмов решения, неполнотой и нечёткостью исходной информации, нечёткостью поставленных целей, а также сложностью нахождения компромиссного решения в случаях Парето–неразрешимости исходной задачи [3].

Перечисленные особенности приводят к необходимости использования в процессе решения данных задач знаний, полученных от человека-эксперта в предметной области. На основании их разрабатываются системы поддержки принятия решений, осуществляющие сбор и управ-

ление этими знаниями, принимающие решения об оптимальном способе достижения целей в условиях неполноты и нечёткости предметной области [2].

Особенности такого подхода в том, что СППР НЛ могут использоваться в различных областях, в т. ч. и для эффективного анализа статистической информации в медицинских учреждениях. Системы применяются при определении статистических показателей для выявления и оценки существующих и потенциальных угроз неблагоприятных эпидемиологических ситуаций и при подготовке мотивационной базы для принятия управленческих решений, направленных на повышение эффективности мероприятий по устранению таких угроз.

Использование аппарата теории нечётких множеств позволило повысить эффективность и обоснованность принятия управленческих решений об эпидемиологических ситуациях, исключить ряд недостатков классических традиционных методов диагностики, позволило внедрить в медицинском учреждении интеллектуальную аналитическую систему мониторинга пациентов (с минимальным участием человека и минимальными трудовыми и финансовыми затратами) [5].

На основе знаний экспертов, накопленных в системе, строится гипотеза анализа ситуации и формируются конкретные рекомендации по её развитию. Семантическая сеть отражает смысловую взаимосвязь между ситуациями, а точнее, понятиями, включёнными в них, с теорией развития ситуаций подобного рода, построенных на основе концептуальных графов. Она используется для синтаксического и семантического анализа текстов естественного языка. Модель понимания смысла слов (Teachable Language Comprehender: доступный механизм понимания языка), предложенную Куиллианом, будем использовать в качестве структурной модели долговременной памяти. В ней применена сетевая структура как способ представления семантических отношений между концептами. Основу данной модели составляет описание значений класса, которому принадлежат объект, его прототип и связи, установленные со словами, отображающими свойства объекта. Концептуальные объекты представляются ассоциативными сетями, состоящими из вершин, показывающих концепты, и дуг, показывающих отношения между концептами [2].

Отличительной особенностью СППР НЛ является использование семантической сети для описания предметной области (ПрО). В основе семантической сети лежит универсальная алгебра, описанная тройкой:

$$A=<S,O,R>, \tag{1}$$

где S – множество семантических сетей, представляющих модели ПрО; O – множество операций на S; R – множество отношений на S.

В разрабатываемой СППР НЛ семантическая сеть, соответствующая модели ПрО, задаётся как двойка следующего вида:

$$S = \{G, U\}, \tag{2}$$

где G – множество объектов ПрО (ситуации для рассмотрения и рекомендации); U – множество дуг, связывающих объекты ПрО.

Каждая дуга показывает взаимосвязь ситуаций или отношений между ситуациями, а также взаимосвязь ситуаций и рекомендаций для ПрО (рис. 1). В реальной ПрО отношения между объектами осуществляются с помощью различных степеней зависимости. Типы градуируемых связей рассматриваются как нечёткие объектные связи.

Пусть даны два нечётких объекта:

$$\begin{aligned}\widetilde{A} &= \{x_i, \mu_{\tilde{A}}(x_i) | x_i \in \psi_1, 1 \le i \le n\},\\ \widetilde{B} &= \{y_i, \mu_{\tilde{B}}(y_i) | y_i \in \psi_2, 1 \le i \le m\}.\end{aligned} \tag{3}$$

Тогда можно определить отношение нечётких объектов следующим образом:

$$R_{f(\tilde{A},\tilde{B})} = \{(x_i, y_j), \mu_{f(\tilde{A},\tilde{B})}(x_i, y_j)\}, \tag{4}$$

где $(x_i, y_i) \in \psi_1 \times \psi_2$, ($\psi$ – модель ПрО).

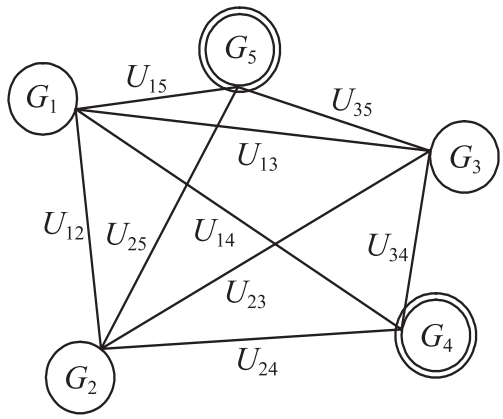


Рис. 1. Семантическая сеть

Функция принадлежности $\mu_{f(\tilde{A},\tilde{B})}(x, y)$ представляет степень ассоциации между атрибутами двух объектов модели ПрО. Данный формализм можно обобщить для случая *n*-арных связей, включающих *n* нечётких объектов. Обозначим множество объектов Λ:

$$\Lambda = \left\{\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \tilde{A}_3, ..., \tilde{A}_n\right\}, \quad (4)$$

где $\tilde{A}_i = \left\{x, \mu_{\tilde{A}}(x) \middle| x \in \psi_i, 1 \le i \le n\right\}$.

Функция отношения для *n* объектов следующая:

$$R^i_{f(\tilde{A}_i,\tilde{A}_j)} = \left\{(x_i,x_j), \mu_{f(\tilde{A}_i,\tilde{A}_j)}(x_i,x_j) \middle| \tilde{A}_i, \tilde{A}_j \in \Lambda, \; i \ne j, 1 \le i, j \le n\right\}, \quad (5)$$

где $(A_1, A_2, A_3, \ldots, A_n)$ – группа объектов, коллективные характеристики которых представляют единый суперобъект *O*. В нечётком окружении *O* представляется нечётким объектом:

$$\tilde{O} = \left\{\tilde{A}_i, \mu_{\tilde{A}}(\tilde{A}_i) \middle| \tilde{A}_i \in \Omega, 1 \le i \le n\right\}, \quad (6)$$

где $\Omega = \bigcup_i \psi_i$ и ψ_i – некоторая модель ПрО:

$$\tilde{A}_i = \left\{x, \mu_{\tilde{A}}(x) \middle| x \in \psi_i, 1 \le i \le n\right\}. \quad (7)$$

Объект G_i семантической сети представляется следующим образом:

$$G_i = \left\{I, P, U_{G_i}\right\}, \quad (8)$$

где *I* – название критерия ПрО; *P* – множество понятий, входящих или связанных с критерием; U_{G_i} – множество отношений между понятиями *P* и критерием *I* (рис. 2).

U_{G_i} определяется как множество двоек типа $\left\{T, U^g_{IP}\right\}$, где *T* определяет тип критерия ПрО,

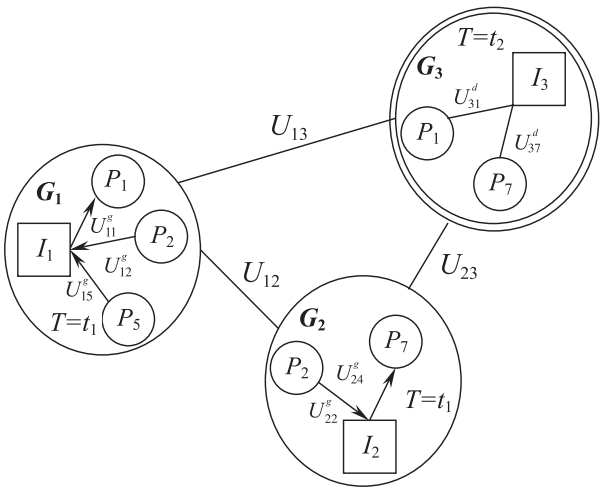


Рис. 2. Пример внутреннего представления ситуации и рекомендаций

U^g_{IP} представляет собой нечёткое подмножество, которое показывает степень зависимости между объектом и понятием (степень зависимости определяет близость с ситуацией и критерием ПрО). Тип объекта *T* определяет два вида критерия ПО:

$$T = \{t_1, t_2\}, \quad (9)$$

где t_1 – критерий ПрО – ситуация; t_2 – критерий ПрО – рекомендация.

U^g_{IP} определяется как

$$U^g_{IP} = \left(\mu_{\tilde{U}^g_{IP}}(P_j, I) \middle| P_j \in P, I \in G_i\right), \quad (10)$$

где $j = 1\ldots n$; P_j – понятие, принадлежащее критерию G_i; *n* – количество понятий для критерия.

Таким образом, объект ПрО G_i, соответствующий критерию $\tilde{G}_i$ с неопределёнными и фиксированными атрибутами, можно определить так:

$$\tilde{G}_i = \left\{I_i, P_1, ..., P_n, t_{P_1}, ..., t_{P_n}, \left\{\mu_{\tilde{G}_i}(I_i, P_1), ..., \mu_{\tilde{G}_i}(I_i, P_n)\right\}\right\}, \quad (11)$$

где I_i – информационная часть *i*-го объекта; P_i – множество понятий, принадлежащих *i*-му критерию; t_{P_i} – тип критерия ПрО; $\mu_{G_i}(I_i, P_i)$ – отношение близости понятия P_i и названия критерия I_i. Зависимость между узлами будет строиться на основе взаимосвязи между понятиями критериев ПрО. Далее введём нечёткое отношение $Up_{ij} = \mu S(P_i, P_j)$, определяющее близость понятий между собой.

На его основе формируется нечеткое подмножество *Up*:

$$Up = \{P_i, P_j, \mu S(P_i, P_j) | P_i \in P, P_j \in P, i,j = 1\ldots N\}, \quad (12)$$

где *N* – количество понятий в ПрО СППР НЛ. При формировании отношений между понятиями выделяем три свойства:

синонимичность: $\forall P_i \in S$, $\mu S(P_i, P_i) = 1$;

симметричность: $\forall P_1 \in S$, $\forall P_2 \in S$, $\mu S(P_1, P_2) = \mu S(P_2, P_1)$;

положительные значения: $\forall P_1 \in S$, $\forall P_2 \in S$, $\mu S(P_1, P_2) \ge 0$.

Соотношения между ситуациями, а также между ситуацией и рекомендацией *U* вычисляются с использованием зависимости между отдельными понятиями, принадлежащими ситуациям и рекомендациям ($U = \{U_{ij}\}$):

$$U_{ij} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{l=1}^{n} \sum_{k=1}^{m} Up_{lk}, \quad (13)$$

где U_{ij} – среднее отношение близости между понятиями, принадлежащими *i* и *j* критерию ПрО; *n* – количество понятий в *i*-м критерии ПрО;

m – количество понятий в j-м критерии ПрО.

При выборе необходимой ситуации для решения в СППР НЛ используются отношения близости между понятиями (U) и отношения близости между понятиями, принадлежащими ситуации, а также информационной частью ситуации (U_{IP}^{g}). В свою очередь рекомендации в ПрО группируются согласно выбранной ситуации для их дальнейшего анализа.

Особенности построения систем поддержки принятий решений на основе нечёткой логики

Практически решение можно свести к созданию комплексных систем нечёткой логики различных типов и уровней сложности.

В частности разработана система поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для медицинских учреждений «Stacionar» ver.5.4., позволяющая определить статистические показатели для выявления и оценки существующих и потенциальных угроз неблагоприятных эпидемиологических ситуаций и подготовить мотивационную базу для принятия управленческих решений, направленных на повышение эффективности мероприятий по устранению таких угроз.

Аналитическая часть системы состоит из четырёх основных блоков: начальной подготовки данных для анализа; формализации экспертных знаний; анализа и рекомендаций; моделирования ПрО и ситуаций (рис. 3).

Блок начальной подготовки данных для анализа отвечает за подготовку множества данных для анализа и выделение атрибутов, по которым будет производиться анализ. Этот блок является технологическим этапом перевода исследуемых данных в числовые и нормирования числовых данных в диапазоне [0,1] путём их взвешивания или упорядочивания. Взвешивание производится экспертом ПрО путём присваивания числовых значений категориальным атрибутам. При отсутствии эксперта можно произвести упорядочивание данных – каждому из значений категориального атрибута приписывается порядковый номер. Атрибут исключается из рассмотрения, если невозможно применить упорядочивание, а эксперт затрудняется с оценкой. Исследуемые числовые данные необходимо нормировать, чтобы каждый из атрибутов имел равный вес при сравнении. Также необходимо учитывать и вес атрибута относительно других атрибутов для правильного нормирования.

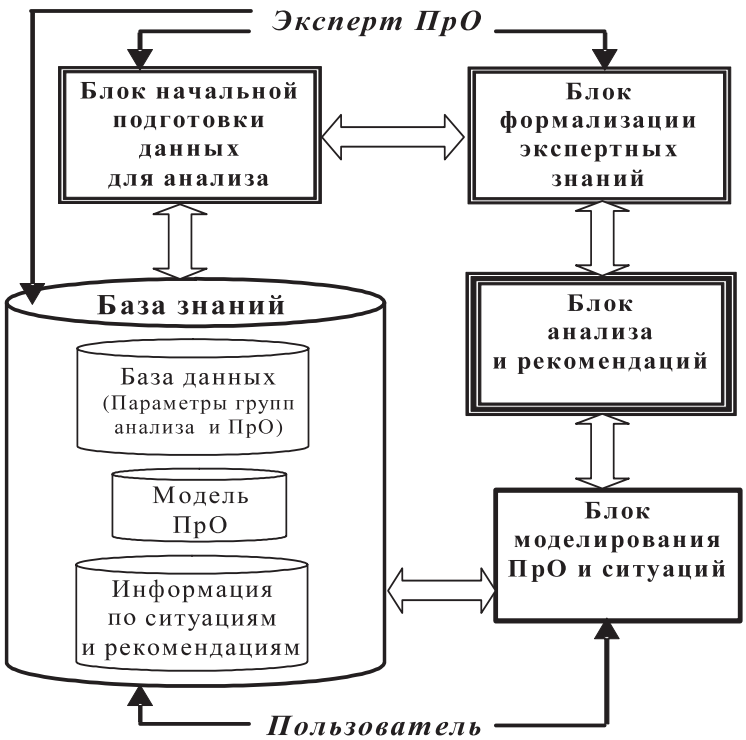


Рис. 3. Укрупнённая схема СППР НЛ

Блок формализации экспертных знаний обеспечивает формализацию, сохранение и использование банка знаний для принятия стратегических решений, а также для формирования начальной структуры предметных областей, моделей объекта управления и в целом базы знаний. Позволяет провести сбор экспертных знаний о эпидемиологической ситуации и угрозах, сильных и слабых сторонах медучреждения и формализовать данные знания, представив их в численной и наглядной графической форме. Эти знания могут быть использованы в дальнейшем. Блок позволяет выявлять, ранжировать и согласовывать экспертные представления различных специалистов о стратегических целях организации и возможных действиях специалистов, направленных на их достижение. Специалисты также могут выступать в роли экспертов, в этом случае их мнения учитываются с бóльшим весом.

Блок анализа и рекомендаций позволяет предложить систему мероприятий и установленных ключевых показателей, генерировать множество стратегических траекторий развития ситуаций, рекомендовать набор функциональных стратегий с выбором контрольных показателей, их граничных значений, и проводить мониторинг эффективности выполнения стратегических планов. Блок позволяет на основе сформулированных в *блоке формализации экспертных знаний* целей организации в нескольких сферах устанавливать систему ключевых показателей, определять методы расчёта показателей, задавать для них граничные значения и контролировать их достижение в процессе выполнения стратегического плана.

Блок моделирования ПрО и ситуации позволяет пользователю анализировать сложившиеся ситуации в организации и получать рекомендации для принятия управленческих решений согласно группам анализа. Блок, получая на входе информацию из базы знаний и из *блока анализа и рекомендаций*, позволяет строить набор стратегических решений для разных сценариев. Задавая различные уровни макропараметров и внутренних показателей организации, пользователь может оптимизировать структуру процессов, исходя из эпидемиологической ситуации и возможностей организации. Блок позволяет проводить стресс-тесты, связанные с негативным развитием ситуации. В нём заложена поддержка принятия решений по деятельности и различным сценариям развития.

На основе эффективного мониторинга данных и достижения целевых значений показателей выявляются причины отклонения от плановых нормативов, связанные как с внешней средой, так и с внутренними проблемами организации.

Разработанная СППР НЛ, в состав которой входит предложенный алгоритм, позволяет получить дополнительные сведения для анализа информации по группам пациентов, диагнозам, заболеваемости, методам лечения и т. д. Это даёт возможность осуществлять эффективную терапию, составлять отчёты, графики, диаграммы и документы на основе динамически изменяющейся информации.

Опытная эксплуатация разработанной системы принятия решений на основе нечёткой логики «Stacionar» подтвердила её работоспособность и показала высокие характеристики надёжности и эффективности. Применение указанной системы позволяет:

обоснованно использовать формализацию опыта экспертов, который является единственной наиболее достоверной информацией в случае неблагоприятной эпидемиологической ситуации;

обеспечить соответствие конкретным условиям эпидемиологической ситуации, при отсутствии реальной оценки существующих и потенциальных угроз в случае неблагоприятной эпидемиологической ситуации.

Предложенный новый нетрадиционный подход к задаче эффективного мониторинга данных обеспечивает эффективное решение задач в условиях неполной априорной информации об эпидемиологических ситуациях.

Особенность построения СППР НЛ в том, что каждая модель создаётся на основе отдельной семантической сети, причём работает система с несколькими моделями ПрО, взаимосвязанными или не связанными между собой. Затем эти сети объединяются в единую модель ПрО.

Достоинством нечётко-множественного подхода является его близость к естественному языку, что даёт эксперту возможность формализовать свои нечёткие представления, трансформировав их в язык количественных оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В. и др.** Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 336 с.

2. **Крошилин А.В.** Разработка и анализ интеллектуальных поисковых программ в вычислительных сетях на основе универсальных алгебр. Дис. … канд. техн. наук. Рязань: РГРТА, 2003. 167 с.

3. **Подиновский В.В., Ногин В.Д.** Паретооптимальные решения многокритериальных задач. М.: Физматлит, 2007. 256 с.

4. **Чернов В.Г.** Модели поддержки принятия решений в инвестиционной деятельности на основе аппарата нечетких множеств. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 312 с.

5. **Крошилина С.В.** Разработка и исследование автоматизированных систем аналитики деятельности предприятия. Дис. … канд. техн. наук. Рязань: РГРТУ, 2009. 169 с.

6. **Дюк В.А.** Интеллектуальный анализ данных. СПб.: Питер, 2008.

УДК 622.232.8.72

М.И. Арпабеков

АДАПТИВНО-ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Системы программного управления проходческими комбайнами разрабатывались институтами ВНИИгидроуголь, КузНИУИ, Астоматгормаш, Гипроуглегормаш, Копейским машзаводом, Прокопьевским заводом шахтной автоматики и др.

Во ВНИИгидроуголь разработана и испытана в шахтных условиях система программного управления комбайном К-56МГ [1]. Задание программы осуществляется с помощью 152 многопозиционных и 76 малогабаритных тумблерных переключателей, расположенных на панели программонаборника. С помощью этих переключателей создаётся условная сетка, разбивающая сечение забоя на девятнадцать равных частей по горизонтальной и вертикальной осям. Однако промышленные испытания показали, что эта система характеризуется недостаточной гибкостью принятого способа задания программы, её небольшим объёмом и ограниченной разрешающей способностью.

Институтом КузНИУИ разработан и испытан в шахтных условиях экспериментальный образец аппаратуры программного управления контактно-релейного исполнения с жестким заданием программы на специальном коммутаторе, в качестве которого используются многоконтактные штекерные разъёмы. Забой выработки разбивается условной координатной сеткой на семнадцать равных частей по горизонтальной и вертикальной осям. С помощью этой координатной сетки может быть набрана любая траектория из семнадцати перемещений режущего органа. Для последовательного задания величин и направления этих перемещений служит распределитель, выполненный на базе шагового искателя типа ШИ-17 [1]. Промышленные испытания экспериментального образца показали, что аппаратура имеет те же недостатки, что и система управления, разработанная ВНИИгидроуголь.

При работе выемочного манипулятора по челноковой схеме с разворотом стрелы исполнительного органа по концам лазы выемка пласта осуществляется качательным движением исполнительного органа. При первом проходе манипулятора вынимается породный прослой, затем, после разворота исполнительных органов, вынимается угольный массив на всю величину мощности пласта с передвижкой крепи и конвейера. Уголь транспортируется из очистного забоя до погрузочного пункта при прямом ходе реверсивного штрекового конвейера. Порода подаётся забойным конвейером на штрековый реверсивный конвейер с переключателем на обратный ход. Далее она поступает в закладочный комплекс и после переработки через трубопроводы разбрасывается за секции механизированной

крепи в выработанное пространство полосой в 20–40 м вдоль конвейерного штрека, что позволяет повторно использовать выработку при отработке следующего выемочного столба. Программа управления крепью при челноковой схеме реализует следующие режимы работы комплекса:

1) установление режима передвижки крепи (автоматический или дистанционный);

2) установление режима работы (выбор секции, передвижка секции, контроль за передвижкой);

3) контроль за предварительным распором стоек секций, повторение команд на передвижку секции при наличии невыполнения команды.

Для функционирования автоматизированной крепи в автоматическом режиме работы выемочного комплекса необходим обязательный контроль конечных положений секций крепи на шаге передвижки. После прохода выемочного манипулятора на передвижку секции крепи, которая перемещается к конвейеру на шаг передвижки в переднее положение, поступает сигнал.

В момент распора секции возможен отход цилиндра гидродомкрата за счёт выбора зазоров соединительной цепи, образовавшихся в процессе выдвижки гидродомкратов, и, таким образом, возможна потеря информации о положении секции в момент контроля. Когда шток и цилиндр полностью выдвинуты относительно друг друга по окончании передвижки конвейера, фиксируется заднее положение секции крепи. Для обеспечения нужной линии забоя, кроме прямолинейной, требуется равномерное перемещение крайних секций крепи, для чего необходим контроль пути перемещения. Также он необходим для избегания сползания крепи по падению пласта вдоль забоя. Контроль всех данных параметров осуществляется с помощью датчиков положения.

На основе экспериментальных исследований и анализа литературных источников подготовлены исходные данные на создание фланговофронтальных технологических поточных процессов при селективной выемке [2–4].

Принципиальная гидравлическая схема управления перемещением рабочего органа манипулятора в вертикальной плоскости показана на рис. 1.

Рассмотрим работу механизма перемещения исполнительного органа в вертикальной плоскости. От рабочего насоса жидкость подаётся по магистрали через гидрораспределитель домкрата подъёма стрелы манипулятора в поршневую полость гидроцилиндра, что вызывает перемещение рабочего органа вниз. При достижении рабочим органом крайнего нижнего положения при помощи датчиков положения домкрата через блок управления переключается электрораспределитель с управлением от двух электромагнитов, что

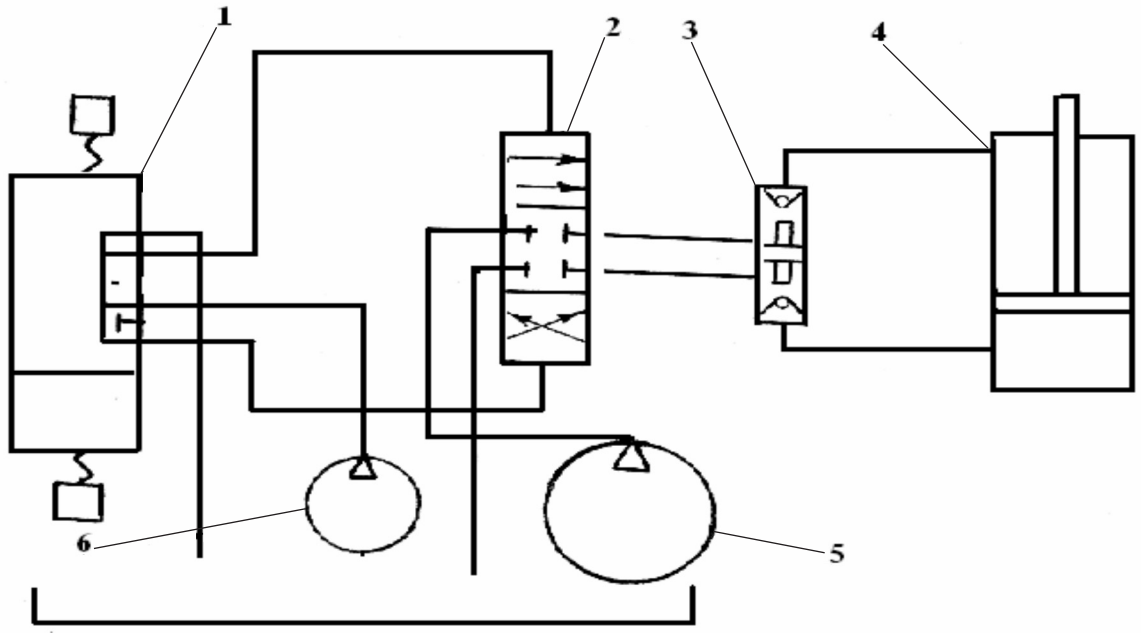


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема управления работой гидродомкрата

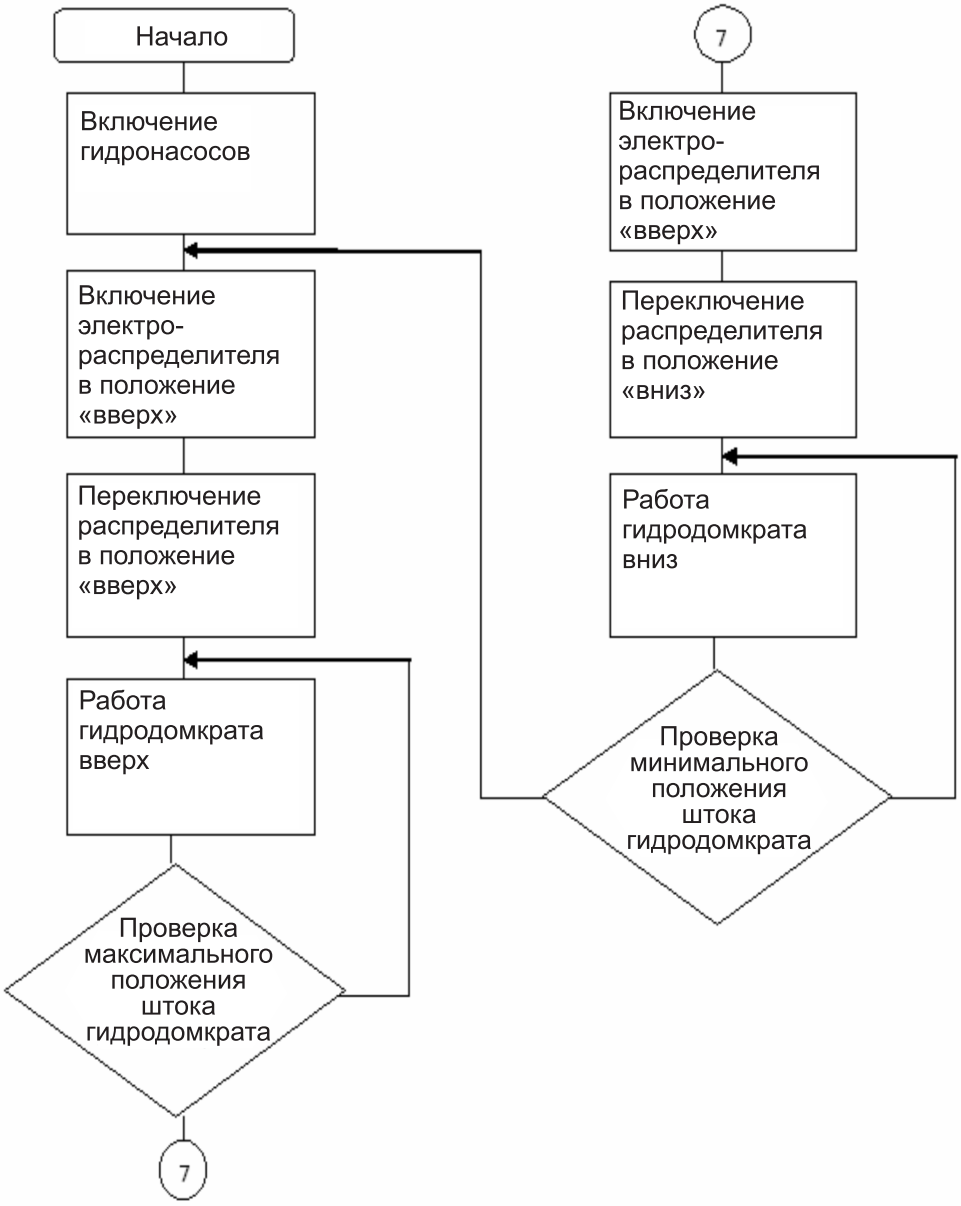


Рис. 2. Блок-схема работы гидросистемы домкрата подъёма стрелы манипулятора

вызывает, в свою очередь, переключение гидрораспределителя домкрата подъёма манипулятора. Жидкость от рабочего насоса подаётся теперь в штоковую полость гидроцилиндра, что вызывает перемещение рабочего органа снизу вверх. Затем цикл повторяется. Начальное движение рабочего органа может быть направлено вверх, в зависимости от положения гидрораспределителя в начальный момент времени.

Блок-схема данного процесса представлена на рис. 2.

Рассмотрим процесс регулирования заданной нагрузки на исполнительный орган манипулятора (рис. 3, 4).

Для этого используем телескопичность трубы манипулятора. Движение выдвигаемой части трубы осуществляется гидродомкратами. Их и будем применять для подачи на забой исполнительного органа. Тем самым скорость подачи самой машины остаётся равной определённому значению, т. е. исключаются динамические нагрузки, возникающие при изменяющейся скорости движения манипулятора.

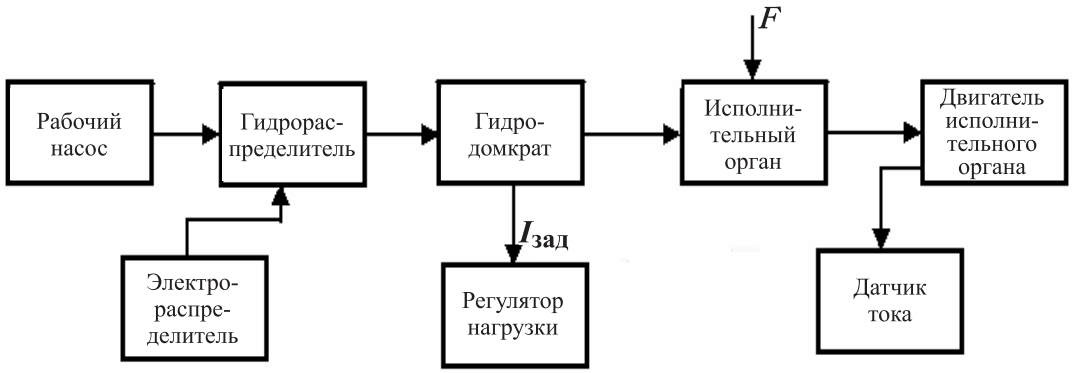


Рис. 3. Функциональная схема регулирования нагрузки на исполнительном органе

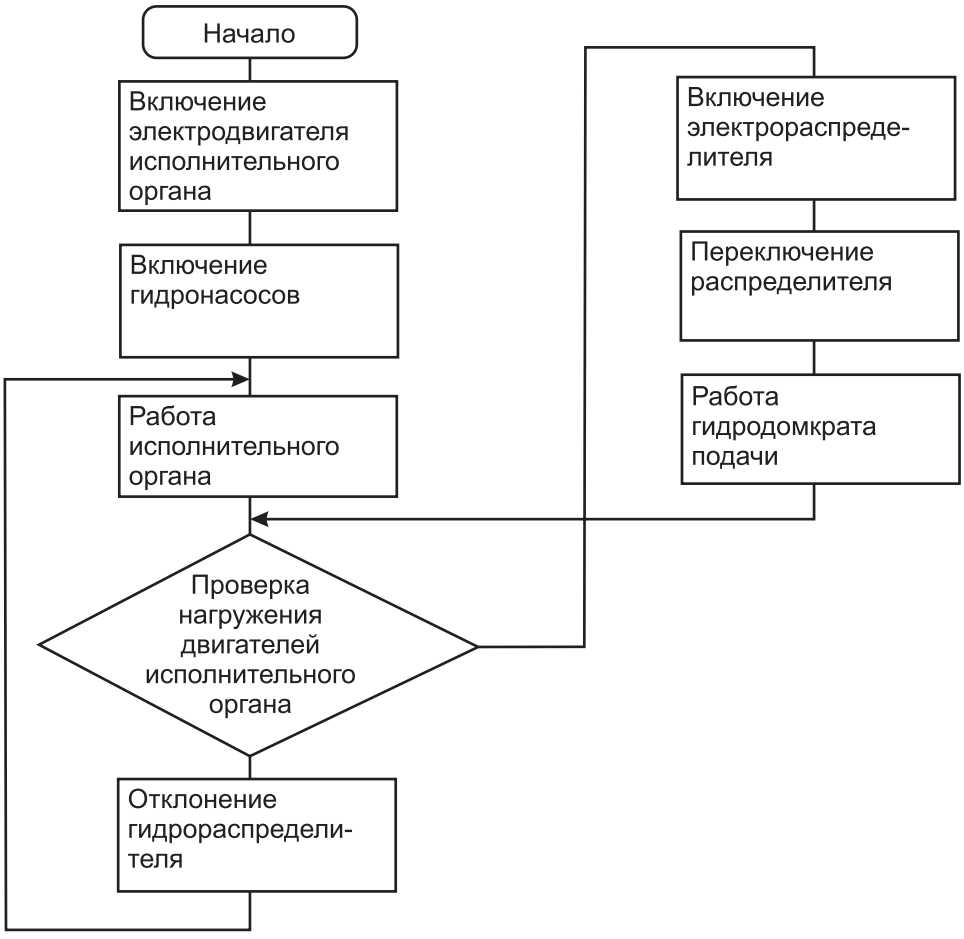


Рис. 4. Блок-схема системы регулирования нагрузки на исполнительном органе

При отклонении нагрузки двигателя рабочего органа (ДРО) манипулятора от номинального значения изменяется величина выходного сигнала измерительного устройства – датчика регулируемого параметра – датчика тока (ДТ). В регулятор (Р) от ДТ подаётся значение, пропорциональное фактическому значению тока электродвигателя рабочего органа. Р сравнивает значение тока с величиной тока оптимальной для данных рабочих условий. Оптимальное значение закладывается в память Р.

Когда сигнал рассогласования превысит зону нечувствительности, он через усилитель подаётся на зажимы катушек трёхпозиционного электрогидрораспределителя РП-2. В зависимости от знака рассогласования гидрораспределитель переключается в положения «вперёд» или «назад». До тех пор пока сигнал рассогласования не исчезнет, будет происходить движение исполнительного органа. Таким образом, происходит процесс стабилизации нагрузки электродвигателя рабочего органа за счёт регулирования скорости перемещения исполнительного органа манипулятора.

Важным элементом автоматизации является использование промышленных компьютеров для управления работами в лаве. Из известных систем, применяющихся на шахтах за рубежом, в Казахстане и в России, это системы немецких фирм Тайсен бах и Марко РМ-4, РМ-32.

Из известных автоматизированных систем на шахтах Караганды используется комплекс оборудования Глиник, оборудованный гидравлическими блоками, управляемыми процессорами РМ-4. В основном управление происходит с использованием восьми каналов, а в Германии – до четырнадцати каналов и, как указывают специалисты, в основном из работ главного технологического цикла это касается системы передвижения крепи. Но процессор и гидравлическая система позволяют установить дополнительные датчики и, соответственно, линии управления, что «интеллектуализирует» работу крепи. Операции по передвижке включают отслеживание положения в лаве комбайна, состояние конвейерной линии, состояние гидростоек и домкрата, передвижение записи показаний которых производят в базы. При этом оператор ПК может выбрать один из нескольких режимов передвижения. Список возможных функций фирма предлагает клиенту выбрать заранее. Состояние очистного забоя оценивает оператор. Например, он может выбрать последовательное передвижение секции, указав величину сжатия гидростоек при снятии с распора крепи, после достижения которой включается домкрат передвижения секции. Возможны и иные схемы. Система автоматической передвижки может быть мгновенно отключена оператором в случае нарушения безопасности. Естественно, что время передвижки, определяемое количеством и длительностью выполняемых операций по подготовке к передвижению и распору секции, зависит от того, на какие параметры сжатия гидростоек настроит секцию оператор. Это связано с опытом оператора. Поэтому современные системы являются не роботами, а частично автоматизированными линиями. Но секция крепи характеризуется большим количеством гидроприёмников, например, имеются выдвижные борта, предотвращающее просыпание боковых пород в межсекционные зазоры. Секции наклоняются, изменяют угол базирования к забойному конвейеру, в результате чего возникают неперекрытые зазоры, через которые прорывается порода. Эти актуальные проблемы автоматизации пока не решены. Но главной задачей «интеллектуализации» работы крепи является управление горным давлением, которое индивидуально для каждой лавы. Например, наличие неустойчивой непосредственной кровли способно максимально уменьшить степень использования автоматических функций, хотя существуют способы предотвращения прорыва пород за счёт оставления в кровле угольной пачки. Многие вопросы необходимо решать на месте, но для этого системы не приспособлены по причине наложения запретов и отсутствия эффективного ПО. И, в частности, по учёту горного давления. С этой точки зрения разработки ряда фирм направлены на создание возможностей учёта состояния массива для автоматизированных систем. Например, при передвижке секций следует учитывать состояние кровли над крепью. Так, величина сжатия гидростоек определяется наличием кусков породы, обрушенных на перекрытие. Опускание перекрытия должно быть таким, чтобы секция не цепляла его и, соответственно, передвигалась плавно, без разворотов.

Как же рационально разместить датчики? Очевидно, что это лучше выполнить в базе, моделирующей структуру крепи и иерархические связи элементов структуры, узлов и подузлов, с чёткой привязкой индексов записей между реальными датчиками и записанными показаниями.

Имея схему расположения датчиков, выполняем это на основе алгоритмов многомерных классификаций АМК и соответствующей базы. Такие базы представляют возможность хранения и обработки тотальной информации о крепи в логической связи её узлов и могут составляться для проектирования крепи, её улучшения, а также для управления крепью в лаве и в частности в автоматическом режиме с применением промышленных компьютеров. Хотя в последнем случае её можно видоизменить, и столбцы, относящиеся к этапам проектирования, извлечь для уменьшения памяти и повышения скорости обработки данных. В таблице представлен вариант отдельного размещения базы данных «Датчики», а также основные элементы таблиц для этой базы. Понятно, что по фиксациям показаний датчиков можно судить не только о геомеханическом управлении массивом, но и о состоянии крепи, например её гидроприёмников. В свою очередь сущность аварий (отказов тех или иных устройств) можно проверить по глобальным записям других датчиков, чья работа функционально связана с соседями, причём комплекс отказов их основных и косвенных (по замерам соседних датчиков) индетификационных параметров устанавливается в программах обслуживания. Несмотря на автоматизацию работ, использование интеллектуальных программ ещё недостаточно. Об этом говорит обслуживание восьми каналов управления на секции, когда их может быть в 3–4 раза больше. В этом случае как в любых робототехнических устройствах резко усилится роль перепрограммирования машин в зависимости от конкретных условий.

Роль перепрограммирования тем важнее, чем сложнее машина. Тогда для неё можно разработать новые варианты схем работы, включающиеся в ответ на проявления и изменения среды работы. Например, для секции крепи типа «Глиник» в рамках пая (группы секций, обслуживаемых одним компьютером) можно составить 3–4 схемы передвижки и, соответственно, столько же моделей поведения секции всей группы крепи и столько же моделей управления крепью.

Система управления механизированными крепями очистных работ с электронным управлением предназначена для увеличения объёмов добычи и обеспечения безопасных условий труда, для возможности осуществления оператором дистанционно любой из функций управления механизированной крепью в различной последовательности и по заданной программе.

Система должна обеспечивать автоматическое управление операциями секции крепи, получение информации о состоянии секций, дистанционное и ручное управление разгрузкой, передвижкой, распором секций, передвижкой конвейера.

Система автоматизации механизированной крепи включает следующие подсистемы:

дистанционное и автоматизированное управление гидрораспределителя;

дистанционный контроль над полнотой передвижки секций, их распором, номером управляемой секции;

автоматический контроль за прямолинейностью базы (конвейера, крепи);

контроль за состоянием гидросистемы, регулирование сопротивления крепи и средств для передвижки секции с подпором.

Конструкция секции крепи и электрогидравлическая система управления позволяют управлять на запрограммированном расстоянии от выемочного манипулятора по сигналам датчиков или командам оператора. Автоматическая передвижка секций крепи и согласованность её с процессом выемки обеспечивается за счёт применения электрогидроклапанов ЭКУ, датчиков положения и контроля секции крепи, давления и управляющих сигналов от микропроцессоров, перемещения забойного конвейера в зависимости от кривизны и положения.

Управление крепью осуществляется по сигналам микроЭВМ, которая выдаёт их на группу секций. Управление секциями крепи в группе осуществляется микропроцессором. Микропроцессоры, управляющие группами секций крепи, устанавливаются в искровзрывобезопасные корпуса, размещаемые на базовой секции.

Подсистема управления крепью позволяет устанавливать необходимый режим работы (выбор секции, передвижка, контроль за передвижкой секции и конвейера, контроль за предварительным распором стоек, секций); повторять команду на передвижку секции, не выполнившей в заданное время цикл автоматической передвижки; устанавливать и при необходимости корректировать расстояние между секцией и выемочным манипулятором.

Информация о состоянии секции крепи от датчиков переднего, заднего, предварительного распора через устройства выемки и хранения информации поступает на микропроцессор, который через преобразователь уровня управляет

Порядок включения имитаторов мнемосхемы

Объект управления	Устройство	Состояние устройства	Кодирование устройства
Конвейер	Пускатель	«ВКЛ»	1
Манипулятор ВМФ	Пускатель	«ВКЛ»	1
Лебедка	Пускатель	«ВКЛ»	1
Манипулятор ВМФ	Домкрат подачи комбайна	ЭМД-1-«ВКЛ»	1
	Домкрат вертикального перемещения	«Исполнительный орган вверх»	1
	Датчик давления гидрозажима	ДД-ГЗ	1
	Подача комбайна	Стрела вверх «ВКЛ»	1
	Датчик давления гидростойки	Распор-ДД-ГС	1
	Датчик перемещения по мощности пласта	«Исполнительный орган вниз»	0
	Датчик давления гидростойки	«Снятие распора ГС»	0
	Подача комбайна	«ВКЛ»	1
	Датчик давления гидрозажима	ДД-ГЗ	0
Крепь 2ОКП70	Датчик давления	Опускание секции	0
	Домкрат передвижки секции	Перемещение секции	1
	Датчик давления	Распор секции	1
Конвейер	Пускатель	«ВКЛ»	1

электрогидравлическим клапаном управления (ЭКУ) секции.

Основные функции датчиков, применяемых для автоматизации крепи, – защита от превышения усилий положения секционной группы; информация для управления – давление в гидросистеме, перемещение гидродомкратов секции крепи; используемые датчики и устройства (датчик давления, предохранительный клапан, датчик положения).

Предложенная система электрогидравлического (профилирующего) программного управления автоматического ВМФ-5, обеспечивает движения, заданные программой, с помощью программ-наборщиков, запоминающих ограниченное число команд.

Динамические свойства исполнительного органа выемочной машины ВМФ таковы, что имеется возможность использовать в качестве подсистем регулирования аппаратуру, разработанную Карагандинском институтом «Гипроуглегормаш» с использованием СП и двухкаскадного усилителя.

В случае применения телескопического исполнительного органа необходимо разработать датчик величины вылета стрелы исполнительно-

го органа, а к аппаратуре «Гипроуглегормаш» добавить соответствующую следящую подсистему с интегрирующими звеньями. Для удобства перенастройки машины ВМФ при селективной выемке угольных пластов необходимо использовать СП подсистемы качания вертикальной плоскости, введя в канал системы звено с легко изменяемым коэффициентом передачи датчика.

Таким образом, в статье рассмотрены особенности адаптивно-программного управления роботизированного комплекса, используемого для разработки угольных массивов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сагинов А.С., Квон С.С., Лазуткин А.Г. и др.** Флангово-фронтальная выемка пластовых месторождений: Учебник. Алматы: Наука, 1983. 280 с.

2. **Ермеков Т.Е., Шоланов К.С., Арпабеков М.И.** Научные основы решения, а также обоснование параметров горных и строительных робототехнологических комплексов: Монография. Алматы: Эверо, 2009. 272 с.

3. **Арпабеков М.И.** Система диагностики неисправностей функциональных элементов очистного роботизированного комплекса для селективной выемки угольных пластов // Хабаршы-Вестник ЕНУ. Астана: Изд-во ЕНУ, 2009. № 4 (71). С. 207–212.

4. **Ермеков Т.Е., Арпабеков М.И.** Определение зоны резания для различных режимов работы манипулятора // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникации / Сб. науч. тр. 2009. № 4 (59). Алматы: Изд-во КазАТК. С 118–123.

5. **Арпабеков М.И.** Оценка спектрально корреляционных характеристик работы манипулятора на базе коронки ПК-3М, ПК-9Р // Вестник ПГУ. 2009. № 1. Павлодар: Кереку ПГУ. С. 19–23.

УДК 538.911

В.А. Кузьменко, Е.А. Ванина

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ К ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДАМ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Керамические детали при эксплуатации в экстремальных условиях реакторного облучения испытывают термические, электрические и механические нагрузки, в результате возникают дефекты, изменяющие структуру материалов. В зависимости от состава керамики происходят различные изменения в её структуре, влияющие на свойства готового изделия. Субструктура кристаллов в керамике пока недостаточно изучена. Её влияние на общую структуру и свойства, как правило, определяется только косвенно [2]. Поэтому установление связи «субструктура–структура–свойства» в многокомпонентных керамических системах является актуальной задачей.

Изучение облучённых материалов − длительный и дорогостоящий процесс, в связи с чем необходимо разрабатывать модели, позволяющие проводить исследования на ЭВМ.

Литературный обзор показал, что ни одно из исследований не демонстрирует радиационный фазовый переход. В [7] моделируется образование упорядоченной структуры мелких скоплений дефектов в твёрдом теле под действием электронного облучения. Дискретное моделирование с использованием теории клеточных автоматов позволяет продемонстрировать изменение формы зёрен под действием реакторного облучения.

Теория клеточных автоматов активно развивается последние пятнадцать лет, используется в работах Ю.В. Дашко, А.Ю. Смолина [3, 4]. В [3] моделируются процессы прессования, спекания сегнетокерамики. В [4] изучены деформации и разрушения сложных гетерогенных материалов и структур в условиях внешних динамических воздействий.

Постановка задачи

Объектом нашего исследования является корундовая керамика с содержанием α-Al_2O_3 более 90 %, стеклофаза алюмосиликатная, пористость

1 %. Керамика находится в поле нейтронного облучения с потоком 1013 нейтрон/см^2, с энергией 200 кэВ. Температура облучения 300° С. Размеры зёрен 6×15 мкм. Стеклофаза распределена равномерно в виде тонких (~1 мкм) прожилок [1, 6].

Целью исследования является разработка имитационной модели применительно к моделированию воздействия нейтронного облучения на корундовую керамику на основе теории клеточных автоматов.

Для достижения указанной цели ставились следующие задачи:

1) создание алгоритма;

2) написание программы с использованием разработанного алгоритма;

3) проверка адекватности разработанной модели.

Алгоритм разработан в [5]. Он основан на усреднении плотности в соседних ячейках. Программа с использованием разработанного алгоритма создана в среде Delphi.

Описание программы

После разбиения исследуемой области на клетки называем каждую ячейкой. Плотность рассматриваем нормированную, т. е. $1 \equiv \frac{\rho}{\rho_0} = \rho_n$, где ρ_0 – плотность вещества при данной температуре; ρ – текущая плотность; $\rho_n = 1$ соответствует нормальному содержанию вещества без уплотнения или разрыхления (пористость, нехватка вещества в объёме). Под уплотнением будем понимать увеличение величины ρ_n. Плотной называется клетка со значением $\rho_n > 1$. Форма плотного состояния – геометрическое понятие, показывающее на графике области с одинаковым $n\rho$. Переходом будем именовать процесс перехода части вещества в клетке из одного состояния в другое с изменением плотности в клетке.

На рис. 1 мы видим интерфейс программы.

В программе двухмерная область разбивается на ячейки. Входными параметрами являются вероятность (2), разница плотностей двух фаз (6), число итераций (3). На выходе получаем в (7), (8) графики кристаллофазы и стеклофазы.

В программе задаётся вероятность (2) фазового перехода некоторой части вещества (4). На величину (6) происходит увеличение плотности в одной ячейке, где произошёл фазовый переход

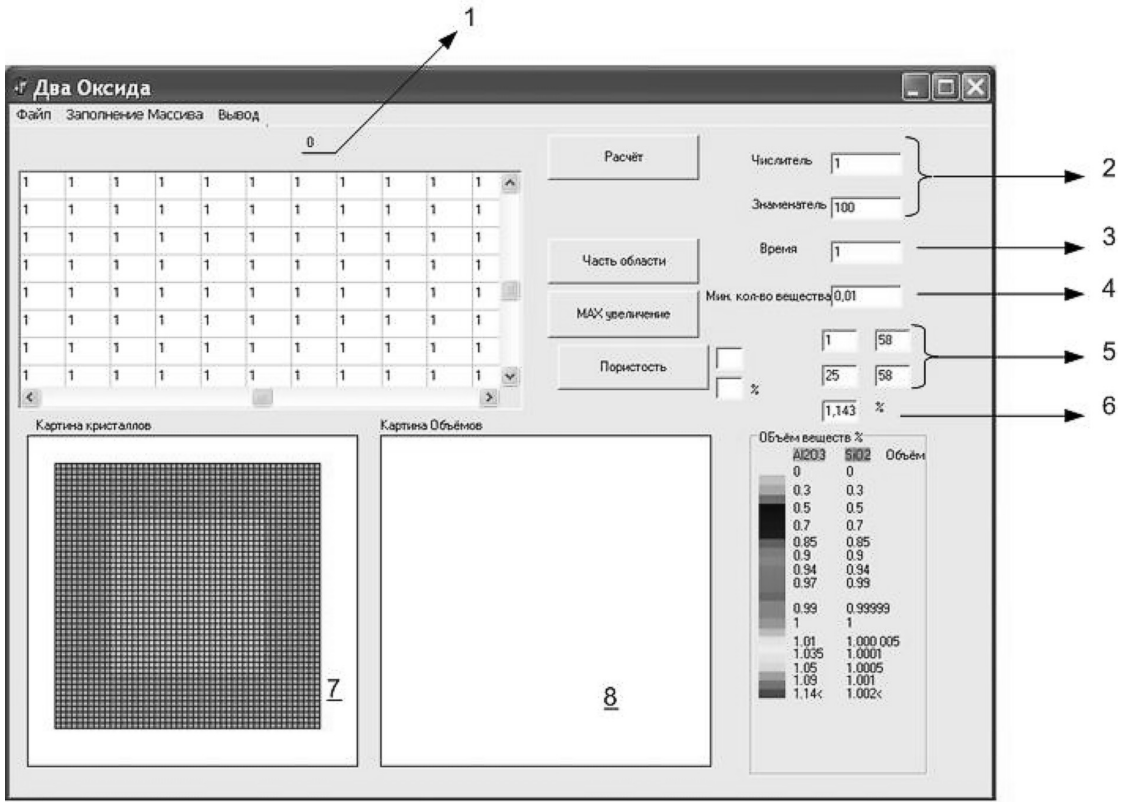


Рис. 1. Интерфейс программы

вещества. Время (3) показывает число итераций по массиву при нажатии на кнопку «Расчёт». Общее число итераций по массиву показано (1).

Если необходимо задать мгновенный переход, то в строках (5) указываются координаты прямоугольной области, в которых произошёл фазовый переход. Далее нажимается кнопка «MAX увеличение». В программе на разных временных интервалах можно варьировать параметры (2), (4), (6).

Исследуемая область разбивается на квадратные клетки с длиной стороны 10^{-7}м, флюенс задаётся с вероятностью 10^{-4} в ед. времени на одну клетку.

В случайных клетках задаётся фазовый переход α-Al_2O_3 в γ-Al_2O_3, в результате которого плотность вещества в клетке увеличивается. Далее просматриваем массив клеток и осуществляем процесс усреднения плотности в соседних клетках по правилам, описанным в [5]. Эта последовательность действий повторяется заданное число раз (3). Пористая структура моделируемых образцов задаётся двумя способами: в первом одиночные клетки оставляем пустыми в случайном порядке, во втором уменьшаем плотность вещества в клетке.

Так как увеличение клетки идёт во всех направлениях, было уточнено направление «обхода» по массиву. Это четыре направления: 1) i: = 1..n, j: = 1..n; 2) i: = n..1, j: = n..1; 3) i: = 1..n, j: = n..1; 4) i: = n..1, j: = 1..n. Такая схема последовательных «обходов» позволяет смоделировать равномерное расширение вещества за ед. времени. На выбор единицы времени накладывается ряд условий: чем динамичнее процесс, тем чаще необходимо выполнять четыре «обхода» по массиву; в статичных процессах, где расширение клетки идёт медленно, единицу времени можно выбрать большую, с учётом того, чтобы «обходы» успевали описать изменение объёма.

Результаты работы программы

Рассмотрим поведение кристаллофазы в области «сосуда» (рис. 2).

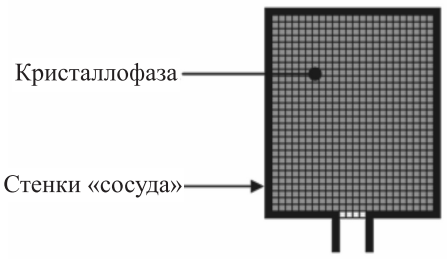


Рис. 2. Кристаллофаза в «сосуде»

«Сосуд» заполнен α-Al_2O_3 оксидом алюминия; при α-γ переходе объём увеличивается на 14,3 % [1, 6].

На рис. 3, *а* представлена область в момент 135 000 ед. времени. Установлено появление границы перехода от одной плотности к другой. В верхней части находится более плотное вещество, разница плотности составляет 0,01 %. На рис. 3, *б* α-Al_2O_3 полностью перешёл в γ-Al_2O_3. В центральной части «сосуда» нормальная плотность пришла к единице.

Проведён вычислительный эксперимент с изменением пористости. Установлено, что при пористости 1 % с некоторым запозданием постепенно формируется граница области с разными плотностями вещества; при пористости в 10 % граница перехода между разными значениями ρn не может сформироваться: плотность в каждой точке имеет различные значения. Заполнение пустот произошло по всей исследуемой области после фазового перехода 70 % α-Al_2O_3 в γ-Al_2O_3. Выявлено, что если поры находятся ближе к стенкам «сосуда», то образуется устойчивая граница с разными плотностями вещества (рис. 4).

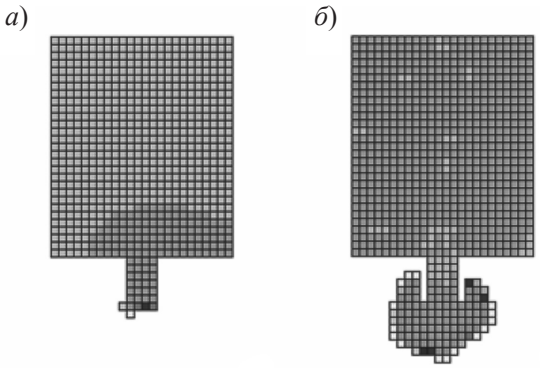


Рис. 3. Расчётная область
в различные моменты времени:
а − ед. времени равна 135 000; *б* − ед. времени равна 900 000

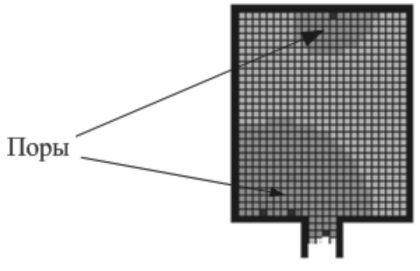


Рис. 4. Моделирование с изменением пористости

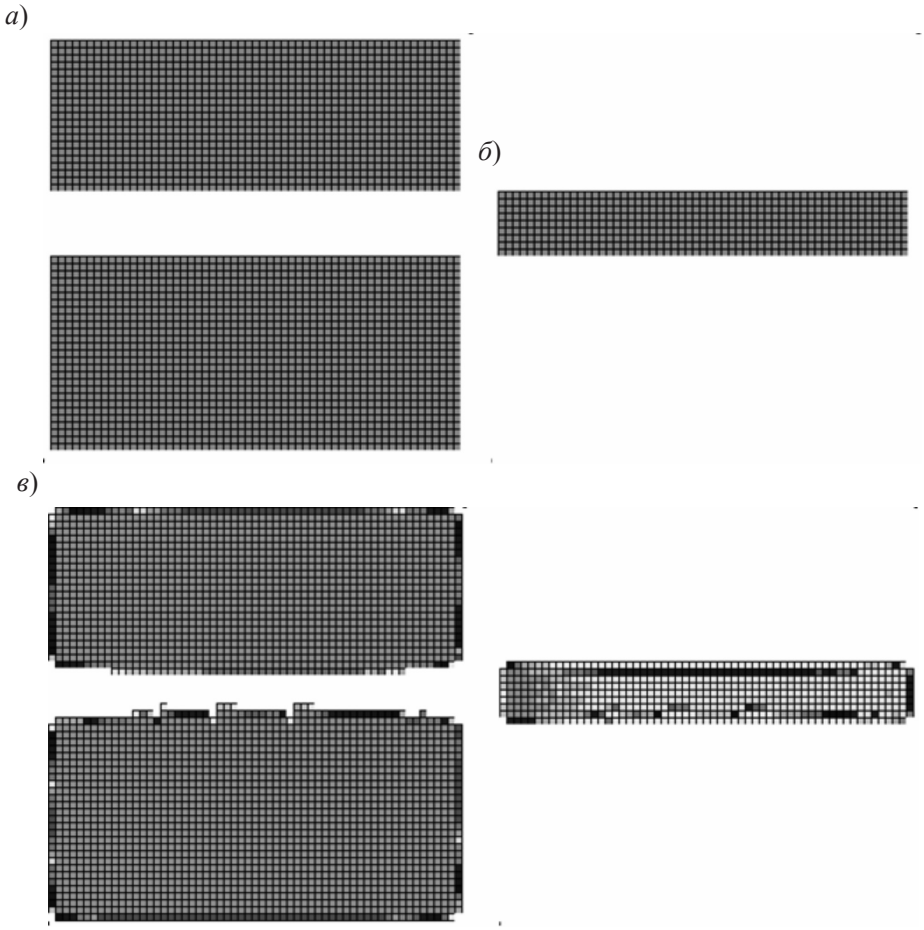


Рис. 5. Две пластины кристаллофазы и прослойка стеклофазы между ними шириной 1мкм:
а – расположение кристаллофазы; *б* – расположение стеклофазы; *в* – вытеснение стеклофазы кристаллофазой в момент равный 450 000 ед. времени.

Рассмотрим две пластины кристаллической фазы, между которыми находится стеклофаза (рис. 5). Кристаллофаза увеличивается на 14,3 %, стеклофаза уменьшается на 12 %. Размер одной ячейки составляет $10^{-7}\times10^{-7}$м. Ширина слоя стеклофазы 10^{-6}м.

В процессе реализации модели происходит уплотнение стеклофазы и вытеснение вещества на границу области. При снижении вероятности в стеклофазе отмечается плавное снижение плотности. На рис. 5, *в* показано вытеснение стеклофазы кристаллофазой после полного фазового перехода α-Al_2O_3 в γ-Al_2O_3.

Разработанная модель позволяет подбирать флюенс нейтронов, при которых вещество не будет быстро распухать, и не будут действовать критические нагрузки, способные разрушить вещество.

Результаты вычислительного эксперимента помогают оценить изменение формы зёрен кристаллофазы под действием нейтронного облучения.

При уменьшении потока нейтронов происходит нормализация плотности в ячейках с избытком плотности.

Программа показывает изменение границы области с различной плотностью в динамике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Астапова Е.С.** Радиационные изменения структуры глиноземистой керамики // Тр. Всерос. науч.- техн. конф. «Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных сред». Барнаул, 1997. С. 114–116.

2. **Senor D.J., Youngblood G.E., Moore C.E. et al.** Effects of Neutron Irradiation on Thermal Conductivity of SiC-Based Composites and Monolithic Ceramics / Fusion Technology. 1996. № 30. P. 943–955.

3. **Дашко Ю.В.** Перколяционное представление микроструктуры сегнетокерамики / [Электронный ресурс]: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. 01.04.07. М.: РГБ, 2007.

4. **Смолин А.Ю.** Развитие метода подвижных клеточных автоматов для моделирования деформации и разрушения сред с учётом их структуры: автореф. дис. … д-ра физ.-мат. наук. 01.02.04. Томск, 2009. С. 34.

5. **Кузьменко В.А., Ванина Е.А.** Моделирование радиационного фазового перехода в корундовой керамике // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2009. № 3. С. 7−10.

6. Диэлектрики и радиация: в 4 кн. / Под общ. ред. Н.С. Костюкова // Кн. 3: Механическая и электрическая прочность и изменение структуры при облучении. М.: Наука, 2003. 256 с.

7. **Баранов А.Ф., Ванина Е.А., Рокосей В.А.** Моделирование упорядоченной структуры мелких скоплений радиационных дефектов // Информатика и системы управления. 2006. № 1(11). С. 27−31.

Вычислительные машины и программное обеспечение

УДК 004.896

М.М. Шилов, О.С. Воробьёва, Т.К. Кракау

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ И СРЕДСТВ НЕЧЁТКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ АВТОМАТИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

Применение систем технического зрения (СТЗ) позволяет выполнять обнаружение и распознавание объектов окружающей среды, производить анализ ряда их характеристик. Поэтому включение СТЗ в состав робототехнических систем стало признанной тенденцией их развития.

СТЗ в составе робототехнической системы могут быть использованы для решения следующих задач:

обнаружение объектов;

определение формы объектов;

распознавание и классификация объектов;

выделение изображений;

распознавание и классификация изображений.

Указанные задачи в той или иной степени могут быть решены с использованием одной СТЗ или совокупности СТЗ, в т. ч., основанных на различных физических принципах. Для решения задачи планирования траектории движения наиболее часто применяются СТЗ, построенные по принципу восприятия отражённого от объектов сигнала (инфракрасного или ультразвукового спектра), т. е., СТЗ радарного типа, сканирующие окружающее пространство. Для распознавания изображений необходимы СТЗ, позволяющие получить растровое представление сцены.

Применение таких СТЗ как видеокамеры, при соответствующей обработке данных позволяет решить как задачу планирования траектории, так и задачу распознавания, однако обработка растровых изображений требует больших вычислительных ресурсов и применения мощных вычислителей или специализированных сигнальных процессоров. Одной из основных проблем обработки и анализа изображений является неопределённость и неоднозначность их характеристик в связи с непостоянством освещённости, изменением цветовых характеристик и расположения объектов на фоне; кроме того, в ряде случаев применение аналитических методов обработки изображений во встраиваемых системах затруднено или невозможно по причине сложности используемого математического аппарата и, следовательно, ресурсоёмкости этих методов, из-за чего представляет интерес применение в таких задачах методов и средств интеллектуальной обработки данных (в частности, аппарата нечётких вычислений), эффективно решающих эти задачи при существенных ограничениях на вычислительные ресурсы. Отметим, что методы нечёткой обработки позволяют оперировать такими естественными параметрами описания изображений, как яркость, однородность, близость участков и др., а также обладают простотой модификации, предсказуемостью и объяснимостью поведения.

Обобщенная структура использования средств нечётких вычислений в задачах обработки изображения показана на рис. 1.

Существующие СТЗ коммерческого назначения и средства их разработки являются закрытыми и непригодными для исследований принципов построения СТЗ, создания новых методов и алгоритмов их функционирования. Таким образом, актуальна задача разработки открытых средств проектирования встраиваемых СТЗ, позволяющих выполнять научные исследования и проводить подготовку специалистов в области автоматики и вычислительной техники.

В лаборатории встраиваемых интеллектуальных систем управления (ВИСУ) кафедры

автоматики и вычислительной техники СПбГПУ разработан комплекс средств автоматизации проектирования (САПР) алгоритмического обеспечения СТЗ различных принципов действия.

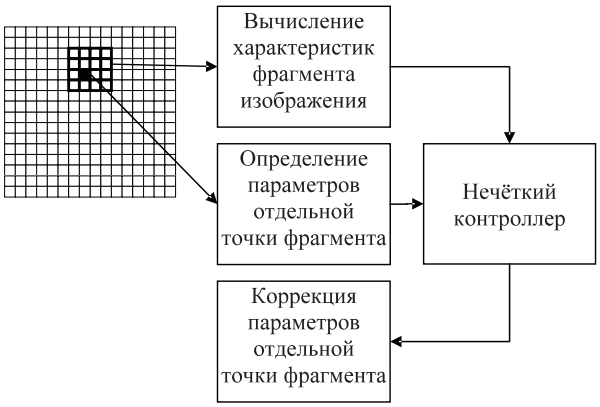


Рис. 1. Пример схемы включения нечёткого контроллера в систему обработки изображений

Как правило, обработка визуальных изображений включает три основных этапа: препроцессинг, сегментирование и распознавание.

На этапе препроцессинга производится улучшение качества обрабатываемого изображения (путём удаления шума, увеличения контрастности), что позволяет упростить его дальнейшую обработку.

Аддитивный шум характеризуется искажением яркости исходного изображения добавлением к значениям яркости некоторых точек случайных значений. Возможным способом подавления такого шума является усреднение значения яркости точек по их некоторой совокупности. Для всех точек окна заданных размеров, окружающего обрабатываемую точку, рассчитываются среднее арифметическое и дисперсия яркости. Разность значений яркости обрабатываемой точки и средней яркости для окна, а также дисперсия яркости подаются на вход нечёткой системы. Нечёткий контроллер рассчитывает величину приращения яркости точки, знак приращения определяется знаком разности яркости.

Импульсный шум характеризуется искажением значения яркости исходного изображения заменой значений яркости отдельных точек случайным значением. Для удаления импульсного шума используется средняя величина яркости в окне, окружающем обрабатываемую точку, и величина дисперсии яркости. Нечёткий контроллер определяет принадлежность точки к множествам «шум» и «сигнал», в зависимости от близости к которым яркость точки остаётся неизменной, либо заменяется усреднённым значением.

Повышение контрастности изображения способствует снижению затрат на его сегментацию. Для каждой точки оценивается степень принадлежности её яркости множествам «светлый» и «темный». Для светлых точек выполняется операция увеличения яркости, для темных – уменьшения.

На этапе сегментирования выполняется разбиение изображения на различающиеся (по некоторому признаку) области, соответствующие объектам или их частям; границы областей соответствуют границам объектов.

Большинство методов выделения краёв объектов основаны на анализе разности значений яркости соседних точек, в связи с чем на результат их работы существенное влияние оказывает шум, присутствующий на изображении, поэтому для применения этих методов, как правило, необходим препроцессинг.

В простейшем случае для выявления края объекта производится анализ разности значений яркости каждой точки и соседних с ней (например, нижней и правой точек по отношению к рассматриваемой). Нечёткий контроллер принимает решение о принадлежности точки множеству «край» или «не край». В случае, когда на изображении присутствует аддитивный или импульсный шум, на изображении в дополнение к корректно выявленным краям появляется множество точек, неверно отнесённых к краевой линии изображения.

Для уменьшения возможного влияния шума на выделение краев объектов проводится оценка неоднородности изображения:

$$Delta = \frac{\sum_{i=1}^{w}\sum_{j=1}^{h}\frac{(|C_{ij}-C_{i+1,j}|+|C_{ij}-C_{i,j+1}|)}{2}}{(w-1)(h-1)},$$

где w и h – габаритные размеры изображения; C_{ij} – яркость пикселя (i, j).

На вход нечёткого контроллера подаётся вычисленная величина *Delta*, выходом является пороговое значение. Затем по вышеуказанному принципу производится вычисление разности значений яркости анализируемой точки и соседних с ней. В случае если эта разность превышает пороговое значение, точку относят к краевой линии объекта.

Данный метод позволяет уменьшить влияние шума, однако полученная краевая линия может иметь разрывы и нуждаться в восстановлении.

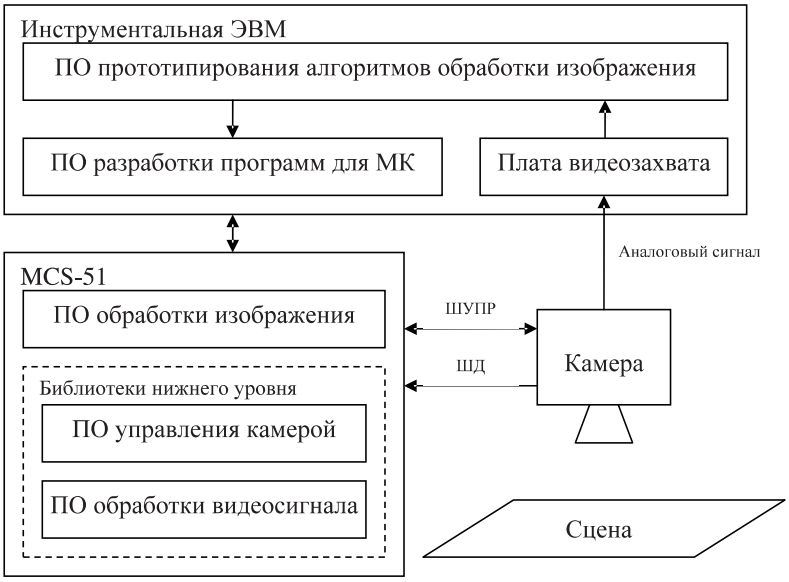


Рис. 2. Структурная схема комплекса САПР СТЗ оптического диапазона

На этапе распознавания выполняется оценка признаков выделенных объектов и отнесение каждого объекта к одному из известных классов (в ряде случаев с попутным формированием самих классов).

Широко известен метод распознавания объектов на основе локальных признаков контура путём анализа краевой линии объекта. Принцип распознавания заключается в вычислении количества углов и доли прямых и кривых линий участков контурной линии объекта. Вычисляется также отношение площади объекта к площади описывающего его прямоугольника. Полученные значения подаются на вход нечёткой системы. Число выходов нечёткой системы соответствует числу распознаваемых объектов. Выход с максимальным значением указывает на наиболее вероятный класс принадлежности. Недостатком является чувствительность метода к гладкости контурной линии объекта.

Структурная схема САПР СТЗ с обработкой сигнала оптического диапазона показана на рис. 2. Аппаратное обеспечение системы состоит из управляющего микроконтроллера, цифровой видеокамеры и инструментальной ЭВМ. Видеокамера имеет аналоговый выход, позволяющий подключать её к плате видеозахвата инструментальной ЭВМ, а также цифровую шину, обеспечивающую взаимодействие с микроконтроллером. Таким образом достигается возможность разработки, испытаний и сравнительного анализа характеристик алгоритмов, реализованных на инструментальной ЭВМ и на встраиваемой микроконтроллерной системе.

В качестве устройства получения видеоизображения используется цифровая видеокамера C3088 Color Camera Module. Настройка и программирование камеры производится с микроконтроллера посредством стандартного интерфейса I2C.

Для микроконтроллера разработаны библиотеки программ управления видеокамерой и захвата видеокадра. Программное обеспечение верхнего уровня микроконтроллера реализует алгоритмы препроцессинга, сегментации и распознавания обрабатываемого изображения и передаёт результаты на инструментальную ЭВМ; для отображения результатов используется программа авторской разработки MK-Vision (рис. 3).

Структурная схема САПР СТЗ с обработкой сигналов инфракрасного диапазона (ИК-СТЗ) показана на рис. 4. Система состоит из двух модулей СТЗ, каждый из которых фиксирует часть сцены. Каждый модуль состоит из управляющего микроконтроллера, ИК-узла и сервопривода. По команде с микроконтроллера сервопривод устанавливается в определённое положение, позволяющее выполнить обзор заданного сектора сцены, после чего излучатель ИК-узла генерирует пачку импульсов заданной мощности, обеспечивая сканирование пространства на заданную глубину. Факт приёма отражённых импульсов ИК приёмником означает

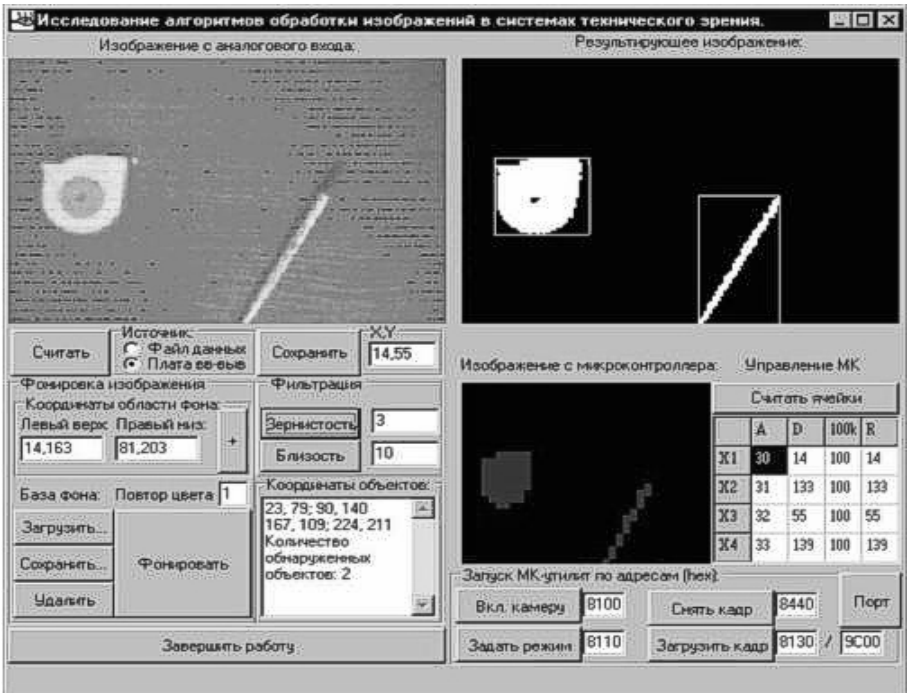


Рис. 3. Окно программы МК-Vision

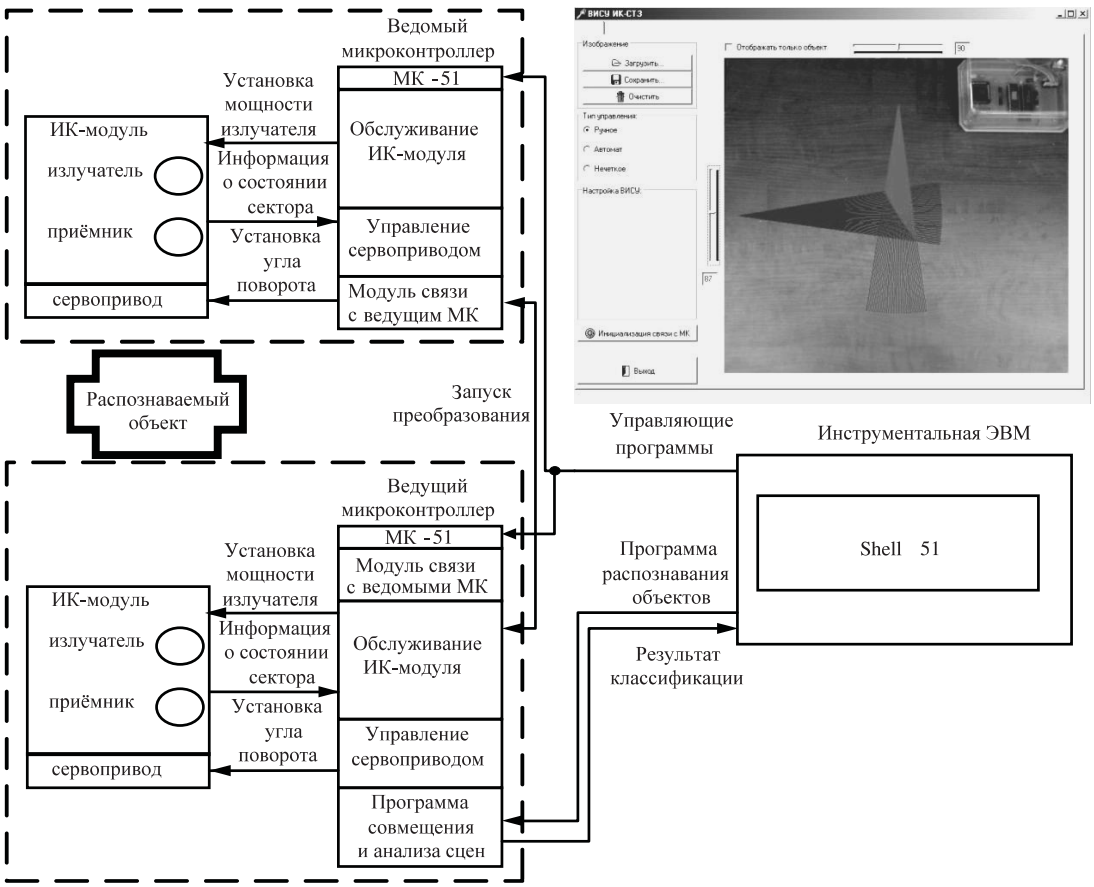


Рис. 4. Структурная схема комплекса ИК СТЗ

наличие объекта на зависящем от мощности излучателя расстоянии. Ведущий микроконтроллер по окончании сканирования всех участков сцен (выполненных всеми микроконтроллерами) осуществляет композицию образцов, формируя тем самым общее изображение объекта.

В памяти ведущего МК находится подсистема распознавания объектов. Результат распознавания либо сообщение о несовпадении передаётся в систему верхнего уровня иерархии (инструментальную ЭВМ). Для отображения результатов работы микроконтроллерной системы используется программа авторской разработки IrVision.

В обеих подсистемах САПР в качестве управляющего микроконтроллера применяется микроконтроллер МК С515 фирмы Infineon, обладающий архитектурой семейства MCS 51 и снабжённый обширным набором периферийных устройств.

По мнению авторов, описанный комплекс может быть применён как для исследования интеллектуальных алгоритмов обработки сложных категорий изображений, так и в учебном процессе при подготовке специалистов в области встраиваемых интеллектуальных систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proceedings Embedded World 2004 Conference / Published by C. Grote, R. Ester. Germany: Design&Electronic, 2004. 825 p.

2. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: Современный подход / 2-е изд. Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. 1408 с.

3. **Джонс М.Т.** Программирование искусственного интеллекта в приложениях / Пер. с англ. А.И. Осипова. М.: ДМК Пресс, 2006. 312 с.

4. **Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В. и др.** Обработка нечёткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. 304 с.

5. **Форсайт Дэвид А., Понс Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход / Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. 928 с.

6. **Васильев А.Е.** Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 304 с.

УДК 004.451.2

А.С. Шульмин

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ СКРЫТЫХ ПРОЦЕССОВ

В настоящее время является актуальной разработка формализованного описания процесса в операционной системе (ОС): его структуры и алгоритмической модели, исследование сцепленности процессов в ОС и разработка способа обнаружения скрытых процессов в ОС.

В статье описан процесс в ОС с позиций общей теории процессов, выделены параметры, на которых развиваются процессы, атрибуты, используемые при генерации нового состояния процесса. Исследован процесс вызова системного сервиса режима ядра из процесса режима ядра, выделены параметры, по которым происходит сцепление процесса, вызвавшего сервис, с процессом ядра ОС, показано, что сцепление произошло по параметру, хранящему стек адресов возврата, и предложен способ обнаружения скрытых процессов в ОС, основанный на анализе этого параметра при каждом вызове системного сервиса.

Используется понятийная база общей теории процессов (ОТП), предложенная в работе [5]. Для удобства читателя основные понятия ОТП, сведены в таблицу.

Рассмотрим один из основных компонентов ОС – *процесс*. Как указано в [9], в общем случае процесс в системе состоит из следующих компонентов:

исполняемый образ машинного кода данной программы;

Основные понятия общей теории процессов

Понятие	Обозначение	Описание
Параметрическое множество системы	$Q = \{q_i\}_{i=1}^{n}$	Параметрическое множество системы – вся совокупность параметров системы, определяющих процесс функционирования или участвующих в нём; q_i – некоторый параметр системы
Множество значений параметра q_i	$\sigma(q_i)$	Множество значений, которые может принимать параметр q_i
Пространство состояний системы	$S_Q = \prod_{q_i \in Q} \sigma(q_i)$	Декартово произведение множеств значений всех параметров системы
Состояние системы	$s \in S_Q$	Любой элемент пространства S_Q, описывающий определённое состояние системы
Процесс	$Z = \langle S, T, F \rangle$	Последовательность изменения состояний системы во времени. S – пространство состояний системы, в которой развивается процесс; T – множество моментов времени изменения состояния системы; F – однозначное (функциональное) отображение $F \to S$
Интервал определения процесса	$[t_H; t_K]$	Интервал, на котором определён процесс $t_H = \min\{T\};\ t_K = \max\{T\}$
Объект системы	$O \subset Q$	Составная часть системы; определяется параметрическим множеством объекта, которое является подмножеством параметрического множества системы
Пространство состояний объекта	$S_O = \prod_{q_i \in O} \sigma(q_i)$	Декартово произведение множеств значений всех параметров объекта
Состояние объекта	$s \in S_O$	Любой элемент пространства S_O, описывающий определённое состояние объекта
Процесс в объекте	$Z_O = \operatorname{Пр}_{S_O} Z_Q$	Определение процесса в объекте O по заданному процессу Z_Q в системе
Элементарный оператор	h_i	Оператор, вычисляющий состояние системы $s \in S_Q$ только в одной точке i
Инициатор	I	Объект, перемещающийся от одного элементарного оператора к другому и вызывающий выполнение элементарного оператора при сцеплении с ним

Понятие	Обозначение	Описание
Оператор генерации состояния объекта	$s^O_{t_i} = H^O\left(A^O, t_i, \omega\right)$	Оператор, позволяющий рассчитать состояние объекта $s \in S_O$ в некоторый момент времени t_i A^O – множество аргументов $A^O \subseteq Q$; $t_i \in [t^O_{\text{Н}}; t^O_{\text{К}}]$ – момент времени, принадлежащий интервалу, на котором определен процесс Z^O; ω – некоторое случайное число (позволяет задавать случайные операторы)
Трек процесса	$TR = \left\langle \{h_i\}_{i=1}^n, \beta \right\rangle$	Линейная последовательность элементарных операторов
Сцепленность объектов (процессов)	$O_l \to O_m$	Если в системе развиваются два процесса в объектах O_l и O_m, для которых заданы операторы генерации состояния объекта, причём $O_l \bigcap A^{O_m}_{t_i} \neq \varnothing$, то говорим, что объект O_l сцеплен с объектом O_m. То же касается и их процессов

память (обычно – некоторые области виртуальной памяти), в которой содержатся исполняемый код, данные, специфичные для процесса (ввод и вывод), стек вызовов (для сохранения стека активных подпрограмм и/или других событий) и «куча» (содержащая объекты, созданные в процессе выполнения программы);

дескрипторы ресурсов ОС, связанные с процессом (файловые дескрипторы, источники данных и т. п.);

параметры системы безопасности (информация о владельце процесса, о множестве допустимых операций для процесса);

состояние процесса (контекст), содержащее информацию о значениях регистров, адресации физической памяти и т. п.

Таким образом, в общем случае процесс в ОС можно определить как шестерку:

$$P = \langle IMG, MEM, DESCR, LSA, CNTX, ALG \rangle, \quad (1)$$

где *IMG* – исполняемый образ, из которого процесс был создан; *MEM* – память, принадлежащая процессу; *DESCR* – дескрипторы ресурсов ОС, связанные с процессом; *LSA* – параметры системы безопасности ОС для данного процесса; *CNTX* – контекст процесса; *ALG* – алгоритмическая модель процесса.

Необходимо разделять понятия «процесс ОС» и «процесс в общей теории процессов». В первом случае речь идет об абстракции, представляющей работающую программу в ОС [4], во втором – о совокупности пространства состояний системы *S*, множества моментов изменения состояния системы *T* и функционального отображения $F \to S$ (см. табл.). В дальнейшем, чтобы избежать двусмысленности, будем использовать термины «*процесс ОС*» и «*процесс ОТП*».

Рассмотрим составные элементы описания процесса ОС. В соответствии с ОТП, *алгоритмическую модель процесса ОТП* в [5] предложено определять как совокупность трека процесса ОТП и инициатора на данном треке:

$$ALG = \langle TR, I \rangle. \quad (2)$$

Исполняемым образом процесса ОС будем называть бинарный файл, оформленный в соответствии с внутренними правилами ОС, пригодный для порождения процесса ОС.

Память, принадлежащую процессу ОС, представим в виде тройки:

$$MEM = \langle M_C, M_D, M_H \rangle, \quad (3)$$

где M_C – память процесса ОС, содержащая исполняемый код (всё множество элементарных операторов процесса); M_D – память процесса ОС, содержащая данные (множество параметров для элементарных операторов процесса); M_H – память процесса ОС, содержащая созданные процессом объекты («куча»).

Дескрипторы ресурсов операционной системы, связанные с процессом ОС, представим следующим образом:

$$DSCR = \{r, p\}_{i=1}^{n}, \quad (4)$$

где r – описатель конкретного ресурса ОС, предоставленного в пользование процессу ОС; p – права доступа к данному ресурсу, которыми наделён процесс ОС.

Параметры системы безопасности ОС для данного процесса – это множество разрешений, установленных для процесса, и описатель владельца процесса, т. е.:

$$LSA = \left\langle \{ps\}_{j=i}^{m}, OWNER \right\rangle, \quad (5)$$

где $\{ps\}_{j=i}^{m}$ – множество прав данного процесса ОС; *OWNER* – описатель пользователя – владельца данного процесса ОС.

Блок состояния процесса ОС (контекст процесса ОС) может быть описан следующим образом:

$$CNTX = <PID, REGS, SP, PR> ,$$

где *PID* – идентификатор процесса ОС; *REGS* – значение регистров ЦП на момент последней команды, выполненной процессом; *SP* – указатель на вершину стека процесса ОС; *PR* – приоритет процесса ОС.

Будем рассматривать каждый процесс операционной системы с позиций ОТП как некоторый объект O_l. Процесс ОТП, развивающийся в объекте O_l будем обозначать Z^{O_l}. *Рассмотрим предложенное нами описание процесса ОС (1) и выявим параметры процесса* Z^{O_l}.

Первый член в предложенном описании – *IMG* – исполняемый образ, из которого порожден процесс ОС. Данная характеристика процесса ОС является постоянной, её невозможно изменить, не завершив процесс ОС, следовательно, *она не может выступать в роли параметра процесса* Z^{O_l}.

MEM – память процесса ОС, представлена как тройка составных элементов (3). M_D и M_H – атрибуты с динамически изменяемым значением, *выступают в роли параметров при описании процесса* Z^{O_l}.

M_C – память, содержащая основной алгоритм процесса ОС, по умолчанию недоступна для редактирования, однако в некоторых системах процессы ОС имеют право модифицировать этот вид памяти. Поскольку возможность изменения его исключена из современных ОС не полностью, *будем считать данный атрибут параметром процесса* Z^{O_l}.

С позиций ОТП параметром процесса Z^{O_l} может считаться та характеристика соответствующего процесса в ОС, которую этот процесс ОС может изменить самостоятельно, не прибегая к передаче вызова в другие процессы. По этому признаку не являются параметрами процесса Z^{O_l} следующие атрибуты и характеристики процесса:

ресурсы ОС, предоставленные в распоряжение процессу ОС (4);

параметры системы безопасности, установленные ОС для процесса ОС (5);

идентификатор процесса ОС (*PID*);

приоритет процесса ОС (*PR*).

Значения регистров и указателя на вершину стека (*REGS* и *SP* соответственно) – *это параметры процесса* Z^{O_l}, *поскольку могут быть модифицированы процессом ОС*.

Таким образом, для пользовательского процесса в ОС следующие элементы его описания являются элементами параметрического множества объекта ОТП, соответствующего рассматриваемому процессу в ОС.

$q_1 = M_C$ – память процесса ОС, занятая исполняемым кодом.

$q_2 = M_D$ – память процесса ОС, занятая данными.

$q_3 = M_H$ – память процесса ОС под «кучу» объектов.

$q_4 = SP$ – указатель на вершину стека процесса ОС. Весь стек вызовов, предшествующих данному этапу выполнения процесса ОС, может быть восстановлен из этого параметра. В общем случае является самостоятельным параметром и не входит в q_5.

$q_5 = REGS$ – регистры ЦП, используемые данным процессом ОС.

Таким образом, процесс в объекте O_l в системе Q развивается на множестве параметров

$\{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5\}$. Множество параметров, на которых определяется состояние объекта $O_l \subset Q$, и множество аргументов A^{O_l} оператора генерации процесса H^{O_l} являются самостоятельными подмножествами Q.

Введём понятие множества *возможных аргументов для генерации процесса* и обозначим его $\sigma(A^{O_l}) = \left\{a_i^{O_l}\right\}_{i=1}^{N}$. Данное множество будет включать в себя все те элементы, из которых может быть составлено множество аргументов $A_{t_i}^{O_l}$ в конкретный момент времени t_i.

В общем случае развитие процесса зависит от следующего:

1. Памяти процесса, содержащей исполняемый код: $a_1^{O_l} = q_1 = M_C$.

2. Памяти процесса, содержащей данные: $a_2^{O_l} = q_2 = M_D$.

3. «Кучи» процесса: $a_3^{O_l} = q_3 = M_H$.

4. Указателя на вершину стека: $a_4^{O_l} = q_4 = SP$.

5. Значения регистров процессора: $a_5^{O_l} = q_5 = REGS = \{regs\}_{i=1}^{n}$.

6. Множества дескрипторов безопасности: $a_6^{O_l} = DESCR = \{r, p\}_{i=1}^{n}$.

7. Множества разрешений, установленных для процесса: $a_7^{O_l} = \left\langle \{ps\}_{i=1}^{n} \right\rangle$.

Очевидно, что $\sigma(A^{O_l}) \bigcap O_l \neq \varnothing$, но при этом $\sigma(A^{O_l}) \neq O_l$, т. е. множество возможных аргументов для генерации процесса в объекте O_l шире, чем множество параметров, на которых развивается процесс Z^{O_l}.

Если в системе существуют два объекта – O_l и O_m, и $O_l \rightarrow O_m$, это значит, что в некоторый момент времени t_i $O_l \bigcap A_i^{O_m} \neq \varnothing$, т. е. в момент времени t_i параметры процесса в объекте O_l являются атрибутами генерации нового состояния объекта O_m. Исследование пересечения множеств O_l и $A_{t_i}^{O_m}$ позволит сделать вывод о том, по каким параметрам произошло сцепление объекта O_l с объектом O_m. То же верно для процессов ОТП, протекающих в этих объектах.

Применим предложенное формализованное описание процессов в ОС общего назначения Windows XP с целью исследования сцепленности процессов режима ядра с ядром ОС в момент вызова системных сервисов. По данным исследования компании w3schools (Норвегия) [8], на ноябрь 2009 Windows XP являлась самой распространённой ОС среди ОС общего назначения.

Как указано в [6], «руткиты» (вредоносные программы, скрывающие свое присутствие в системе) для ОС Windows XP являются существенной проблемой, т. к. архитектура данной ОС позволяет злоумышленнику легко осуществить доставку вредоносного кода на уровень максимальных привилегий (уровень ядра ОС). Аналитики «Лаборатории Касперского» отмечают [7] рост количества вредоносных программ, использующих руткит-технологии. На сегодняшний день авторами антивирусных продуктов предложен ряд методов для обнаружения скрытых процессов в системе (руткитов и защищаемых ими процессов), однако вирусные эпидемии последних лет [1, 2] показали необходимость совершенствования имеющихся методов.

ОС Windows XP содержит в себе специальный интерфейс системных вызовов, используя который, прикладные программы (через шлюз) и драйверы (напрямую) могут обратиться к ядру системы с запросом на выполнение привилегированных функций [3].

Рассмотрим систему, в которой развивается системный процесс ОС режима ядра (объект в терминах ОТП, соответствующий данному процессу, – O_S), а также процесс ядра ОС (O_K). В дальнейшем для краткости, говоря о выполняющихся процессах в ОС, будем использовать обозначения соответствующих им объектов с позиций ОТП – O_S и O_K.

Системные сервисы режима ядра в ОС Windows XP размещены в ядре ОС. Следовательно, вызов системного сервиса из процесса O_S вызовет смену выполняющегося процесса на O_K. Большинство системных сервисов режима ядра имеют параметры – набор аргументов, передаваемых из вызывающих процессов. При вызове каждого системного сервиса в стеке сохраняется адрес возврата – он указывает внутрь $M_C^{O_S}$. Системные сервисы возвращают значения тремя способами: через регистры ЦП, через рабочие параметры и через выходные параметры. Следовательно, *процесс O_K развивается на параметрах процесса O_S*, т. е.:

$$O_S \bigcap A_{t_i}^{O_K} \neq \varnothing,$$

где t_i – момент смены выполняющегося процесса в системе при вызове системного сервиса.

Таким образом, *процесс O_K сцеплен с процессом O_S*, т. е. $O_S \rightarrow O_K$.

Среди параметров процесса O_K есть указатель на вершину стека $a_4^{O_K} = SP$, куда процесс O_S помещает адрес возврата. Атрибут $a_4^{O_K}$ с позиций ОТП является локальной средой процесса O_K, *по данному значению процессы O_S и O_K сцеплены*.

Таким образом, анализируя атрибут $a_4^{O_K}$, мы можем легко получить адрес возврата A_{RET}. Очевидно, что в рассматриваемом случае:

$$A_{RET} \in M_C^{O_S}.$$

При наличии в системе процесса O_H, скрывающего свое присутствие, он будет передавать ядру всякий раз, при вызове им системных сервисов, параметр $a_4^{O_H}$.

Один из системных сервисов (ZwQuerySystem Information) при запросе типа SystemModuleInformation возвращает информацию о загруженных драйверах режима ядра с сообщением для каждого модуля данных:

$$SM = \langle BASE, SIZE \rangle,$$

где *BASE* – начальный адрес (база) загрузки модуля в память; *SIZE* – размер модуля.

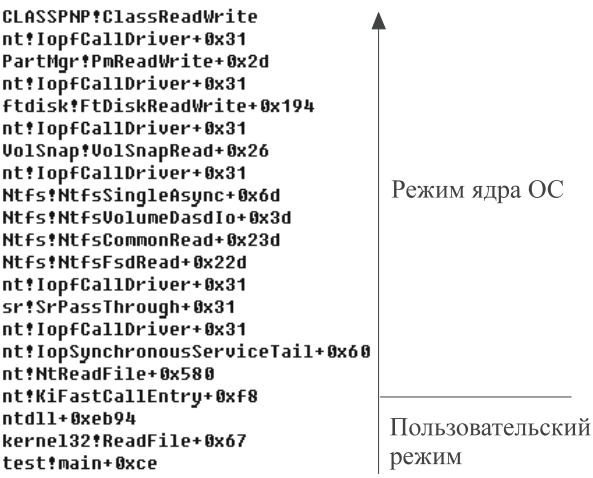
Верно следующее: $M_C^{O_H} \subset [BASE_H, BASE_H + SIZE_H]$, поскольку область памяти процесса O_H не выходит за границы памяти, отведённой данному драйверу системой при его загрузке.

Соответственно, если $A_{RET} \notin \bigcup_{\forall i} [BASE_i, BASE_i + SIZE_i]$, то *мы можем утверждать, что вызов в системный сервис пришел из скрытого модуля*.

Такой способ обнаружения скрытых процессов эффективен по следующим причинам: во-первых, практически все известные сегодня вредоносные программы, работающие в режиме ядра ОС, вызывают системные сервисы, во-вторых, при сокрытии процессов в системе они, как правило, исключаются из выдачи сервиса ZwQuerySystemInformation. Таким образом, сравнительный анализ позволит легко выявить несоответствие.

Предложена практическая реализация указанного способа. Суть данной реализации сводится к перехвату управления контролирующим драйвером всякий раз при вызове системного сервиса с последующим анализом адреса возврата на стеке и сравнением его со списком загруженных в систему модулей (процессов режима ядра ОС).

Возможна ситуация, при которой вредоносный код, скрывающий свое присутствие в системе, для обеспечения своего функционала обращается к системным сервисам, минуя стандартный шлюз, или непосредственно к нижележащим функциям. К примеру, на рисунке представлен стек системных вызовов при выполнении API-функции ReadFile (запроса на чтение данных).



Передача API-запроса на чтение файла ReadFile

Роль шлюза исполняет функция KiFastCall Entry, которая передаёт запрос из API-функции ReadFile в режим ядра, в системный сервис NtReadFile. После системного сервиса вызов проходит ещё шестнадцать вызовов, прежде чем будет непосредственно исполнен. Соответственно, *вредоносный код может инициировать запрос на чтение на любом из этих уровней*. Предложенный выше способ обнаружения в этом случае требует модернизации: перехват с передачей управления в контролирующий драйвер следует производить *как можно ниже* по стеку вызовов (ближе к вершине рисунка), с последующим обратным анализом стека вызовов и поиском адреса возврата, не принадлежащего существующим в системе модулям.

В статье показано лишь одно из возможных применений теории процессов к описанию структуры процессов и их сцепленности в ОС. Выявить все множество задач, решаемых при помощи применения ОТП с целью описания структуры элементов ОС, – это задача будущих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буткит 2009 [Электронный ресурс] // Лаборатория Касперского: [сайт]. [2009]. URL: http://www.securelist.com/ru/ analysis/204007655/Butkit_2009 (дата обращения 24.02.2010)

2. Буткит: вызов 2008 [Электронный ресурс] //Лаборатория Касперского: [сайт]. [2008]. URL: http://www.securelist.com/ru/analysis/204007635/Butkit_vyzov_2008 (дата обращения 24.02.2010)

3. **Руссинович М., Соломон Д.** Внутреннее устройство Microsoft Windows: Windows Server 2003; Windows XP и Windows 2000. 4-е изд. М.: Изд. -торг. дом «Русская Редакция», 2005. 992 с.

4. **Таненбаум Э.** Современные операционные системы. 2-е изд. СПб.: Питер, 2002. 1040 с.

5. **Черненький В.М.** Процессно-ориентированная концепция системного моделирования АСУ: дис. … д-ра техн. наук: 05.13.06. М.: 2000. 299 с.

6. **Hoglund G., Butler J.** Rootkits: subverting the Windows kernel – Addison-Wesley, 2006. 324 p.

7. Kaspersky Security Bulletin. Развитие угроз в 2008 году [Электронный ресурс] // Лаборатория Касперского: [сайт]. [2008]. URL: http://www.securelist.com/ru/analysis/204007645/Kaspersky_Security_Bulletin_Razvitie_ugroz_v_2008_godu (дата обращения 24.02.2010)

8. OS Platform Statistics [Электронный ресурс] // Refsnes Data: [сайт]. [2010]. URL: http://www.w3schools.com/browsers/browsers_os.asp (дата обращения 24.02.2010)

9. **Silberschatz A., Gagne G., Galvin P.** Operating system concepts with Java / 6th Edition. – John Wiley & Sons, 2004. 952 p.

УДК 004.052.42

В.П. Бубнов, А.В. Тырва, А.Д. Хомоненко

ОБОСНОВАНИЕ СТРАТЕГИИ ОТЛАДКИ ПРОГРАММ НА ОСНОВЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ

Модели надёжности программного обеспечения подробно рассмотрены в научной литературе. При этом наибольшую известность получили модели Джелинского–Моранды, Мусы и Литлвуда. Систематическое описание этих и ряда других моделей надёжности программ приводится в [1]. Авторами [2] описываются нетрадиционные методы оценки надёжности информационных систем. В [3] рассматриваются модели поведения программ, в которых учитываются интервалы работоспособного и неисправного состояний программы.

Оценка характеристик надёжности программ представляет несомненный интерес. Однако следующий важный шаг, конечно, связан с выработкой практических рекомендаций по организации отладки программ, позволяющих улучшить характеристики процесса отладки. Планирование испытаний сложных программных комплексов описано в [4, 5]. В них делается существенное предположение о том, что характеристики надёжности отдельных программных модулей известны.

Мы рассмотрим вопрос обоснования стратегии отладки (отдельного модуля) программы на основе использования модели роста надёжности программы, аналогичной вероятностным моделям надёжности программ, таким как экспоненциальная модель Джелинского–Моранды, геометрическая модель, модели Мусы и др. экспоненциальных моделей [1]. Модели роста надёжности программ часто используют вероятностные подходы и модели систем массового обслуживания с конечным и бесконечным числом каналов обслуживания и сетей массового обслуживания Джексона. К примеру, в [6] предлагается модель, основанная на марковской модели систем массового обслуживания, с решением задачи появления и устранения ошибок в программе как марковского процесса гибели и размножения с непрерывным временем и нахождением его характеристик. Недостатком названного решения является использование предположения о стационарности рассматриваемых процессов.

В основу предлагаемого решения положим модель нестационарной системы обслуживания, предложенную в [7]. В данной модели используется допущение об экспоненциальном распределении длительностей интервалов между обнаружением и исправлением последовательных ошибок. Однако в отличие от названных выше моделей, не накладывается ограничений на вид зависимости интенсивностей обнаружения и устранения ошибок от номера ошибки (количества ещё не исправленных ошибок в программе).

При соответствующей вероятностной интерпретации (аналогичной модели Джелинского–

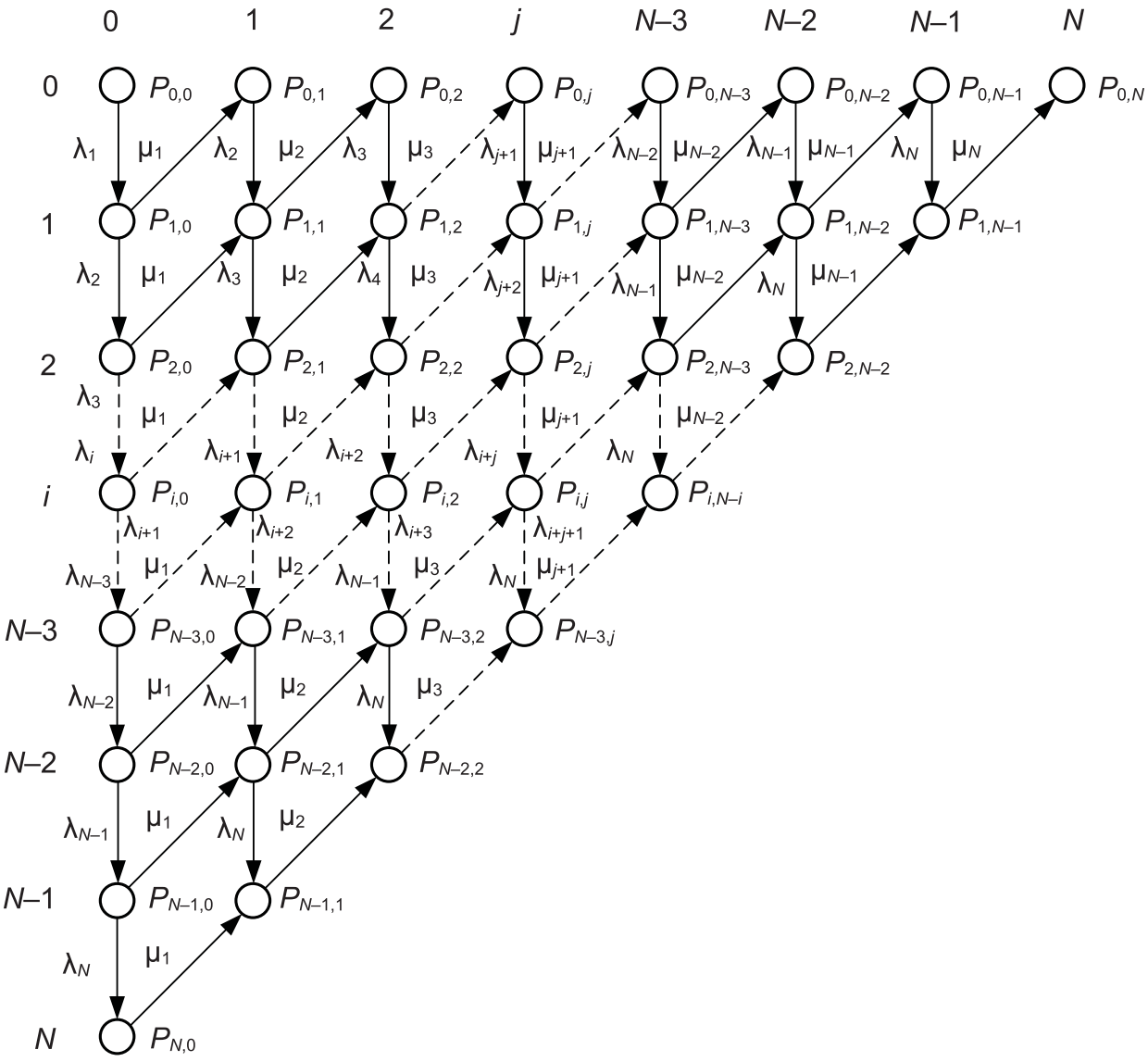


Рис. 1. Диаграмма переходов между состояниями системы $M(i)/M(j)/N$

Моранды и подобным) модель позволяет описывать и рассчитывать характеристики надёжности программы, а также обосновывать стратегию отладки программы. Модель в большей степени подходит для получения прогнозных оценок надёжности отдельных программных модулей, число ошибок в которых может колебаться от единиц до двух–трёх десятков.

Важным вопросом при моделировании надёжности программного обеспечения является выбор исходных данных. Распространённым подходом [1] является использование собранной в процессе разработки уже завершенных проектов статистики ошибок (интенсивности обнаружения ошибок при отладке, временные интервалы между моментами обнаружения ошибок). Однако для учёта особенностей конкретного проекта целесообразно также использовать его характеристики, влияющие на надёжность – например, объектно-ориентированные метрики [8–10] (длина наибольшего пути иерархии наследования, взвешенное количество методов класса и др.). Метод планирования тестирования программ с использованием объектно-ориентированных метрик сложности предложен в [5].

Марковская нестационарная модель процесса отладки

Отладка программы представляет собой процесс, состоящий из двух этапов: тестирование

(поиск ошибок) и устранение обнаруженных ошибок. Эти два типа деятельности, как правило, разделены и выполняются различными исполнителями (командами). Для упрощения будем считать, что при устранении ошибки новые ошибки не вносятся. Кроме того, считаем, что интенсивности обнаружения и исправления ошибок зависят от номера обнаруженной и устраняемой ошибки.

Предположение о зависимости интенсивности обнаружения и исправления ошибок от номера ошибки широко используется во многих вероятностных моделях роста надёжности программного обеспечения. Такое предположение основано на том, что по мере обнаружения и устранения ошибок в программе число ошибок в программе остаётся всё меньше и, соответственно интенсивность обнаружения ошибок уменьшается.

Предположение о зависимости интенсивности исправления ошибок от номера устраняемой ошибки в данном случае не является ограничением предлагаемой модели роста надёжности программы, а расширяет её возможности. В частности, вполне можно предположить, что при отладке конкретной программы, по мере приобретения опыта по устранению выявленных ошибок интенсивность исправления ошибок может увеличиваться. Кроме того, т. к. предлагаемая модель не накладывает ограничений на вид такой зависимости, можно рассматривать её как обобщение разработанных ранее моделей.

Введём следующие обозначения: N – общее число ошибок в программе; λ_k – интенсивность обнаружения k-й ошибки при отладке программы, $k = \overline{1,N}$; μ_k – интенсивность исправления k-й ошибки при отладке программы, $k = \overline{1,N}$. Вероятностная марковская модель процесса отладки программы описывается ниже.

На вход системы последовательно поступает N запросов на устранение обнаруженных ошибок. Распределения длительности интервалов между моментами обнаружения ошибок описываются экспоненциальными законами с интенсивностями $\{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N\}$, зависящими от номера ошибки. Распределения времени исправления ошибок – экспоненциальные с интенсивностями $\{\mu_1, \mu_2, ..., \mu_N\}$, также зависящими от номера ошибки.

Представим такую систему цепью Маркова с дискретным множеством состояний и непрерывным временем. Состояния системы в каждый момент времени будем характеризовать парой (i, j), где i – число обнаруженных, но ещё не исправленных ошибок $i = \overline{0,N}$; j – число уже исправленных ошибок $j = \overline{0,N-i}$. Вероятности пребывания системы в этих состояниях обозначим через $P_{i,j}(t)$. В таком представлении система будет иметь конечное число состояний. Обозначим её как систему обслуживания типа $M(i)/M(j)/N$.

Диаграмма переходов между состояниями системы $M(i)/M(j)/N$ [7], описывающей процесс отладки программ, приведена на рис. 1.

На представленной диаграмме переход из состояния (i, j) в состояние $(i+1, j)$ означает, что при тестировании была обнаружена $(i+j+1)$-я ошибка. Переход из состояния (i, j) в состояние $(i–1, j+1)$ означает, что была исправлена $(j+1)$-я ошибка. Общее число состояний k вычисляется по формуле:

$$k = (N + 1)(N + 2)/2. \quad (1)$$

Для определения вероятностей нахождения в состояниях (i, j) необходимо решить систему из k дифференциальных уравнений:

$$\frac{dP_{i,j}(t)}{dt} = \delta(i)(P_{i-1,j}(t)\lambda_{i+j} - P_{i,j}(t)\mu_{j+1}) + \\ + \delta(j)P_{i+1,j-1}(t)\mu_j - \delta(N-i-j)P_{i,j}(t)\lambda_{i+j+1}, \quad (2)$$

где $i = \overline{0,N}$, $j = \overline{0,N-i}$;

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, \text{если } k > 0; \\ 0, \text{если } k \le 0. \end{cases}$$

Для каждого момента времени t должно соблюдаться условие нормировки вида $\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{N-i}P_{i,j}(t) = 1$.

Задав начальные условия к системе в виде

$$P_{i,j}(0) = \begin{cases} 0, \text{если } i + j \ne 0; \\ 1, \text{если } i + j = 0, \end{cases}$$

можно найти численное решение соответствующей задачи Коши для произвольного значения t.

Эта модель описывает процесс поиска и устранения ошибок, при котором обнаруженные ошибки устраняются последовательно по мере их обнаружения, причём поиск и устранение ошибок выполняются одновременно (рис. 1). Можно регламентировать и другие стратегии отладки, которые можно представить в виде графа, приведённого на рис. 1. Соответствующая система дифференциальных уравнений также будет определяться используемой стратегией отладки.

Выбор конкретной стратегии можно сделать по результатам моделирования с использованием значений показателей надёжности и некоторых критериев (например, требуется выбрать стратегию с меньшим временем отладки до исправле-

ния (обнаружения) k ошибок с заданной вероятностью p и т. д.)

Варианты стратегии отладки

С точки зрения распределения времени между этапами тестирования и исправления ошибок можно рассматривать разные стратегии отладки программ (диаграммы переходов показаны на рис. 2):

1. Этап тестирования продолжается, пока не будет обнаружена одна ошибка. После обнаружения ошибки тестирование приостанавливается, ошибка исправляется. После исправления ошибки вновь начинается тестирование.

Диаграмма переходов, представляющая данную стратегию отладки, представлена на рис. 2, *а*.

Количество состояний системы:

$$k = 2N + 1. \tag{3}$$

Система дифференциальных уравнений (2) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{dP_{i,j}(t)}{dt} &= -\delta(N-j-iN)P_{i,j}(t)\lambda_{j+1} + \\ &+ \delta(i)(P_{i-1,j}(t)\lambda_{j+1} - P_{i,j}(t)\mu_{j+1}) + \\ &+ \delta(j(1-i))P_{i+1,j-1}(t)\mu_j,\end{aligned} \tag{4}$$

где $i = \overline{0,1}$, $j = \overline{0,N-i}$.

2. Этап тестирования продолжается, пока не будут обнаружены все ошибки. Затем обнаруженные ошибки исправляются. Диаграмма, представляющая данную стратегию отладки, представлена на рис. 2, *б*.

Количество состояний системы рассчитывается по формуле (3).

Система дифференциальных уравнений (2) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{dP_{i,j}(t)}{dt} &= -\delta(N-i-jN)P_{i,j}(t)\lambda_{i+1} + \\ &+ \delta((1-j)\,i)(P_{i-1,j}(t)\lambda_i - \\ &- \delta((i+j+1-N)i)P_{i,j}(t)\mu_{j+1} + \\ &+ \delta((i+j+1-N)j)P_{i+1,j-1}(t)\mu_j,\end{aligned} \tag{5}$$

где при $j = 0$, $i = \overline{0,N}$; при $j = \overline{1,N}$, $i = N - j$.

3. Этап тестирования продолжается, пока не будут обнаружены k ошибок. После обнаружения k ошибок тестирование приостанавливается, ошибки полностью исправляются. Затем тестирование продолжается. Диаграмма, представляю-

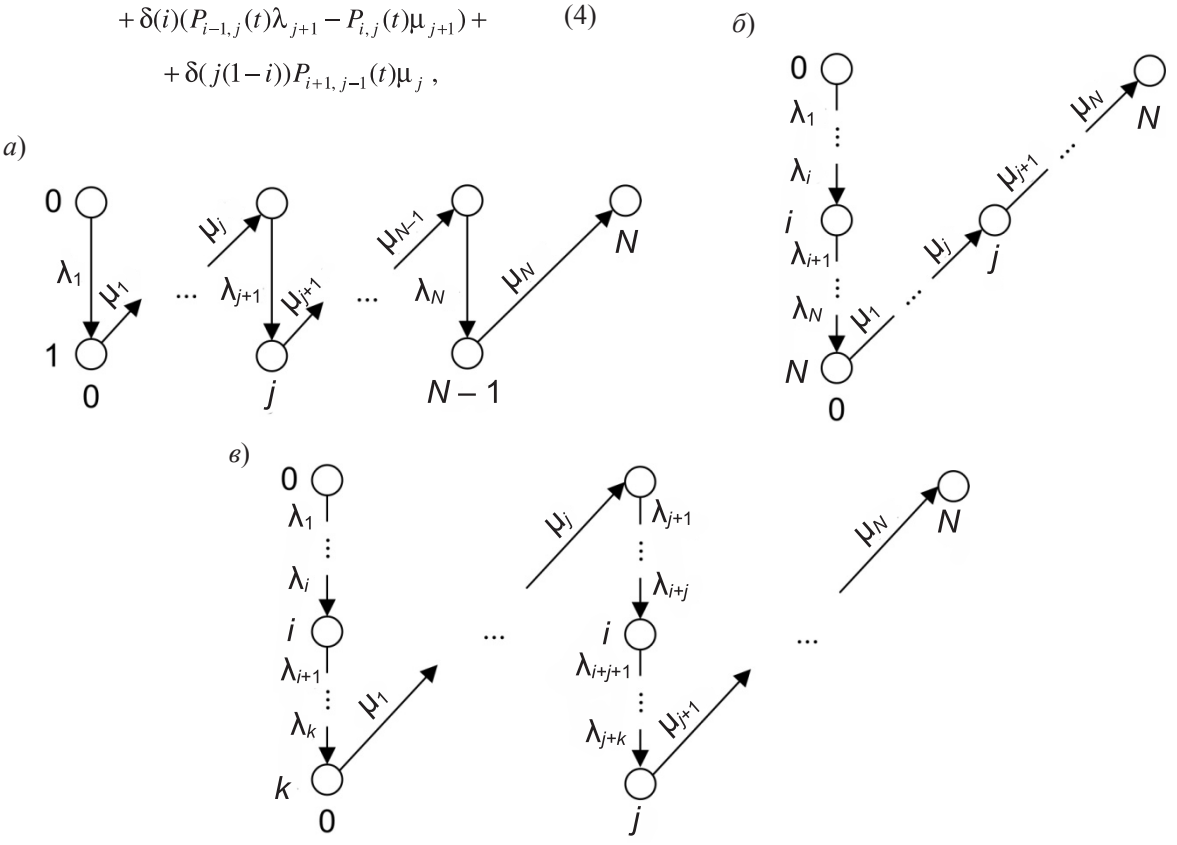


Рис. 2. Диаграммы переходов для стратегий отладки:
а – стратегия 1; *б* – стратегия 2; *в* – стратегия 3

щая данную стратегию отладки, представлена на рис. 2, *в*.

Количество состояний системы рассчитывается по формуле (3).

Система дифференциальных уравнений (2) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{dP_{i,j}(t)}{dt} &= \delta(1-j \bmod k)\times \\ &\times(\delta(i)(P_{i-1,j}(t)\lambda_{i+j} - \\ &-\delta(k-i)\,\delta(N-i-j)P_{i,j}(t)\lambda_{i+j+1})) - \\ &-\delta(i)\delta(1-(i+j) \bmod k)+\delta(1-(i+j) \bmod N))\times \\ &\times P_{i,j}(t)\mu_{j+1}+\delta(i+j)\delta(N \bmod k-i)\times \\ &\times(\delta(1-(i+j) \bmod k)\,\delta(k-i)+ \\ &+\delta(1-(i+j) \bmod N)\delta(N \bmod k-i))P_{i,j}(t)\mu_j ,\end{aligned} \quad (6)$$

где $i \bmod j$ – остаток от деления i / j;
$i = \overline{0,k}$ при $j \bmod k = 0 \& j < N - N \bmod k$;
$i = k - j \bmod k$ при $j \bmod k \neq 0 \& j < N - N \bmod k$;
$i = \overline{0, N \bmod k}$ при $j = N - N \bmod k$;
$i = N \bmod k - j \bmod k$ при $N - N \bmod k < j \leq N$.

Модель, приведённую в предыдущем разделе и описываемую диаграммой на рис. 1 и системой дифференциальных уравнений (2), будем рассматривать в качестве стратегии 0.

Результаты прикладных расчётов и обоснование стратегии отладки

Применение описанных моделей позволяет получить динамические значения ряда величин (вероятности пребывания системы в состоянии (i, j), функцию распределения времени обнаружения и устранения ошибок, математическое ожидание случайных величин, количество обнаруженных и исправленных ошибок). В качестве исходных данных для расчётов используются: число ошибок N, интенсивности $\{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_N\}$ и $\{\mu_1, \mu_2, ..., \mu_N\}$ – обнаружения и исправления ошибок, соответственно.

При практическом использовании модели надёжности $M(i)/M(j)/N$ для расчётов в качестве исходных данных могут быть использованы статистические данные по интервалам времени между обнаружением и исправлением ошибок. Общее число ошибок N при этом неизвестно, однако может быть спрогнозировано, исходя из эмпирических соображений на основе опыта разработки похожих проектов, с использованием существующих прогнозных моделей (Джелинского–Моранды и подобных).

Наилучшим подходом представляется использовать для этого значения объектно-ориентированных метрик сложности, тем самым в большей степени будут учтены особенности конкретного проекта. Модель на основе логистической регрессии, описанная в работах [8–10], позволяет найти вероятности ошибки в классах программы. С использованием этих вероятностей может быть дан прогноз общего количества ошибок программы, например, в виде количества классов, вероятность ошибки которых превышает некоторое пороговое значение. Могут быть предложены и более сложные алгоритмы определения количества ошибок в программе на основе значений объектно-ориентированных метрик сложности (например, с использованием нечётких множеств и продукционных систем), однако, подробное рассмотрение данного вопроса выходит за тему статьи.

Представляет интерес сравнение рассмотренных выше стратегий отладки. В качестве исходных данных для представленных далее расчётов использована статистика по обнаружению и устранению ошибок в процессе разработки программного продукта *учебный курс «Управление качеством при разработке программного обеспе-*

Таблица 1

Исходные данные о программных ошибках

Время тестирования, ч	Число обнаруженных ошибок	Время устранения, ч	Интенсивность обнаружения, $ч^{-1}$	Интенсивность устранения, $ч^{-1}$
4	25	10	6,25	2,5
4	19	4	4,75	4,75
2	3	2	1,5	1,5
2	1	1	0,5	1
1	1	1	1	1

чения на основе современных стандартов и моделей». Проект выполнен в 2008 г. в Петербургском университете путей сообщения. Учебный курс представляет собой web-приложение, при разработке которого использованы языки программирования javascript, actionscript. Данные по обнаруженным и устранённым ошибкам приведены в табл. 1. В ходе отладки были обнаружены и устранены ошибки пользовательского интерфейса, взаимодействия учебного курса с системой дистанционного обучения, вёрстки и др.

Для расчётов использованы следующие значения интенсивностей обнаружения ошибок: $\lambda_1 = \ldots = \lambda_{25} = 6{,}25$, $\lambda_{26} = \ldots = \lambda_{44} = 4{,}75$, $\lambda_{45} = \ldots = \lambda_{47} = 1{,}5$, $\lambda_{48} = 0{,}5$, $\lambda_{49} = 1$ и интенсивностей устранения ошибок $\mu_1 = \ldots = \mu_{25} = 2{,}5$, $\mu_{26} = \ldots = \mu_{44} = 4{,}75$, $\mu_{45} = \ldots = \mu_{47} = 1{,}5$, $\mu_{48} = 1$, $\mu_{49} = 1$.

Полученные в результате решения систем дифференциальных уравнений (2, 4–6) вероятности $P_{i,j}(t)$ пребывания модели системы в состоянии (i, j) могут быть использованы для расчёта значений показателей надёжности.

Вероятность $R_j(t)$ того, что в процессе отладки *найдено* ровно j ошибок, может быть вычислена по формуле:

$$R_j(t) = \sum_{i=0}^{j} P_{j-i,i}(t). \qquad (7)$$

Вероятность $P_j(t)$ того, что в процессе отладки *устранено* ровно j ошибок, может быть вычислена по формуле:

$$P_j(t) = \sum_{i=0}^{N-j} P_{i,j}(t). \qquad (8)$$

Среднее число (математическое ожидание) $N_R(t)$ *обнаруженных* ошибок к моменту времени t вычисляется по формуле:

$$N_R(t) = \sum_{i=1}^{N} iR_i(t). \qquad (9)$$

Среднее число (математическое ожидание) $N_P(t)$ *исправленных* ошибок к моменту времени t:

$$N_P(t) = \sum_{i=1}^{N} iP_i(t). \qquad (10)$$

Соответственно, среднее число $N_{RL}(t)$ ошибок, *не обнаруженных* к моменту времени t, и среднее число $N_{PL}(t)$ ошибок, *не исправленных* к моменту времени t, определяются по формулам:

$$N_{RL}(t) = N - N_R(t); \qquad (11)$$

$$N_{PL}(t) = N - N_P(t). \qquad (12)$$

На рис. 3 приведены графики среднего числа обнаруженных ошибок и среднего числа ещё не исправленных ошибок для предлагаемой модели надёжности – системы $M(i)/M(j)/N$. Графики

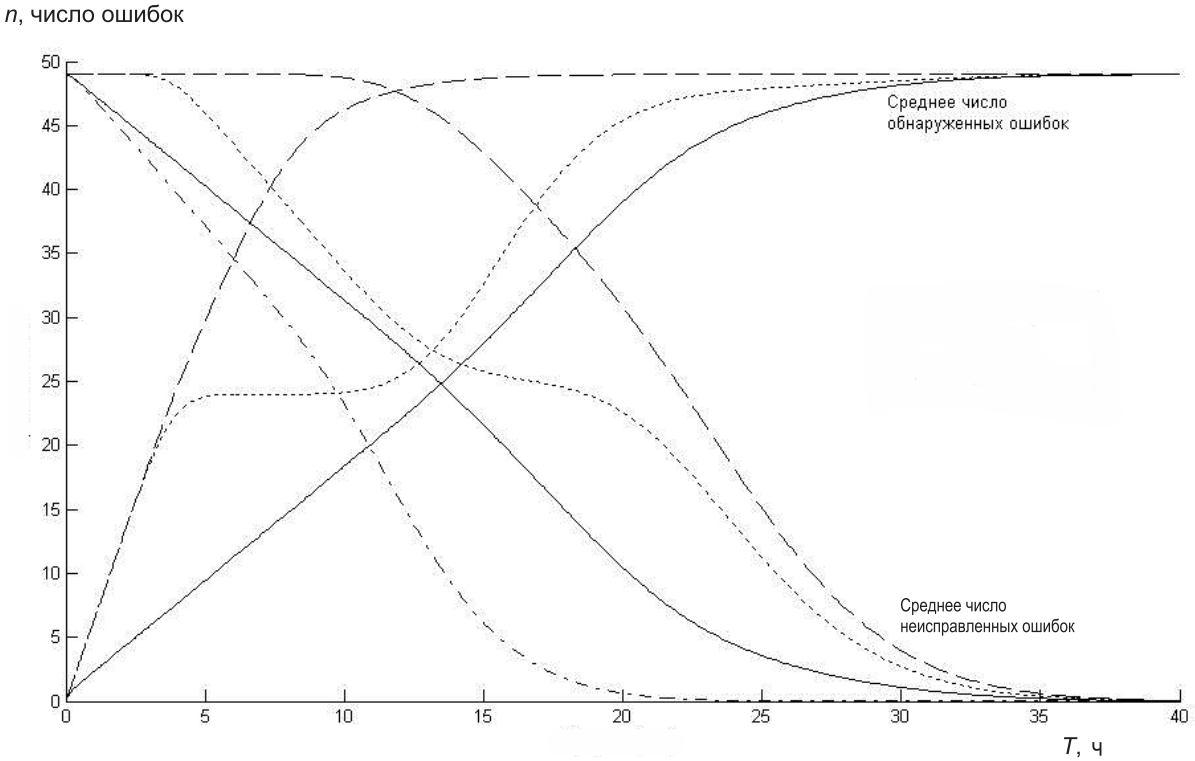


Рис. 3. Графики среднего числа обнаруженных ошибок и неисправленных ошибок
(— – —) Стратегия 0; (———) Стратегия 1; (— —) Стратегия 2; (- - - - - - -) Стратегия 3 (k=24)

Таблица 2

Расчёт числа ошибок, не исправленных при отладке

Время τ, ч	Среднее число неисправленных ошибок			
	Стратегия 0	Стратегия 1	Стратегия 2	Стратегия 3 (k=10)
10	23,1	31,2	48,7	33,5
15	6,0	21,4	42,8	25,7
20	0,6	10,4	30,6	22,5
25	0,0	3,5	14,8	11,1
30	0,0	1,1	3,9	2,6
35	0,0	0,2	0,6	0,4

Таблица 3

Расчёт времени отладки по вероятности отсутствия ошибок

Вероятность P_{TP} отсутствия ошибок	Требуемое время отладки τ_{TP}, ч
0,8	34,3
0,9	36,3
0,95	38,1
0,99	40,4

Таблица 4

Расчёт времени отладки по допустимому числу ошибок

Количество оставшихся ошибок (N–N_{TP})	Время отладки τ_{TP}, ч			
	Стратегия 0	Стратегия 1	Стратегия 2	Стратегия 3 (k=10)
5	18,1	26,4	33,3	32,1
3	19,7	29,6	34,9	33,6
1	22,2	35,6	36,9	35,6

среднего числа обнаруженных ошибок для стратегий 0 и 2 совпадают.

Приведённые графики могут быть использованы для расчёта числа остающихся в программе ошибок к моменту времени τ с момента начала отладки. Для этого в качестве исходных данных должна использоваться достаточно полная статистика, собранная в процессе разработки большого числа проектов. При этом наличие для ряда программных проектов статистики по длительности интервалов обнаружения и устранения ошибок позволяет для аналогичных программных проектов использовать предположение о схожем характере динамики изменения интенсивностей выявления и устранения ошибок. В частности, можно говорить об одинаковом распределении отношений интенсивностей обнаружения и устранения ошибок в случае, если программные проекты являются сопоставимыми по объёму кода, квалификации разработчиков, используемым технологиям и инструментальным средствам и т. д.

Пример такого расчёта для системы, *аналогичной описанной выше*, приведён в табл. 2.

Предложенная модель позволяет найти функции $F_i(t)$ распределения времени устранения с помощью соотношения вида:

$$F_i(t) = \sum_{l=i}^{N} P_i(t),\ i = \overline{0,N}. \qquad (13)$$

Это даёт возможность оценить время отладки $T_{N_{TP},P_{TP}}$, которое требуется для исправления N_{TP} ошибок с заданной вероятностью P_{TP} как

$$T_{N_{TP},P_{TP}} = t : F_{N_{TP}}(t) \geq P_{TP}. \qquad (14)$$

Время $T_{N,P_{TP}}$ исправления всех программных ошибок не зависит от выбора стратегии отладки. Пример оценки времени $T_{N,P_{TP}}$ для системы $M(i)/M(j)/N$, описанной выше, приведён в табл. 3.

Пример оценки требуемого времени отладки $T_{N_{TP},P_{TP}}$ при P_{TP} = 0,95 для разного числа ошибок N_{TP}, выполненный с помощью предлагаемой модели надёжности $M(i)/M(j)/N$, приведён в табл. 4.

Представленные результаты дают наглядную численную картину того, как соотносятся между

собой рассмотренные стратегии отладки ПС по приведённым характеристикам (см. табл. 2–4).

В статье предложена нестационарная модель оценивания роста надёжности программ на этапе отладки. По сравнению с разработанными ранее экспоненциальными вероятностными моделями надёжности снимается предположение о виде зависимости интенсивности обнаружения ошибок от текущего номера обнаруженной ошибки.

Предложенная модель позволяет рассчитать для различных стратегий отладки:

численные значения среднего числа обнаруженных ошибок и среднего числа неисправленных ошибок;

функцию распределения времени обнаружения и устранения заданного числа ошибок;

время отладки по заданной вероятности отсутствия ошибок или по допустимому числу ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Software Reliability Engineering. McGraw Hill, 1996.

2. **Уткин Л.В., Шубинский И.Б.** Нетрадиционные методы оценки надежности информационных систем. СПб.: Любавич, 2000.

3. **Половко А.М., Гуров С.В.** Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.

4. **Смагин В.А.** Техническая синергетика. Вероятностные модели сложных систем. СПб., 2004.

5. **Тырва А.В., Хомоненко А.Д.** Метод планирования тестирования сложных программных комплексов на этапах проектирования и разработки / Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. № 4 (82). С. 125–131.

6. **Huang C.-Y., Huang W.-C.** Software Reliability Analysis and Measurement Using Finite and Infinite Server Queuing Models / IEEE Transactions on Reliability. 2008. Vol. 57. № 1. P. 192–203.

7. **Бубнов В.П., Сафонов В.И.** Разработка динамических моделей нестационарных систем обслуживания. СПб.: Лань, 1999.

8. **El-Emam K., Melo W., Machado J.C.** The prediction of faulty classes using object-oriented design metrics / Journal of Systems and Software. 2001. Vol. 56. № 1. P 63–75.

9. **Chidamber S.R., Kemerer C.F.** A metrics suite for object oriented design / IEEE Transactions on Software Engineering. 1994. Vol. 20. Iss. 6. P. 476–493.

10. **Basili V.R., Briand L.C., Melo W.L.** A validation of object-oriented design metrics as quality indicators / IEEE Transactions on Software Engineering. 1996. Vol. 22. Iss. 10. P. 451–761.

УДК 662.642:621.926.7

К.В. Спорягин

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС НАСТРОЙКИ ТИПОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

В сфере промышленной автоматизации наибольшее распространение получили так называемые типовые законы регулирования [1, 2], однако существующие методы расчёта их параметров мало применяются на практике [3]. Одна из основных причин того, что в большинстве случаев регуляторы настраиваются «методом тыка», состоит в недостатке инженерных методик и программ, охватывающих многосвязные объекты управления и учитывающих влияние контуров регулирования друг на друга. Данная статья посвящена описанию структуры программного комплекса (ПК) настройки типовых регуляторов для многосвязных объектов управления произвольной размерности – «MIMO Master» Рассматриваемый ПК призван стать простым средством настройки параметров и имитационного моделирования многоконтурных систем управления технологическими процессами и предназначен для инженеров-разработчиков АСУТП и наладчиков промышленных систем.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу настройки многомерного регулятора, предназначенного для стабилизации многосвязного объекта с l выходными переменными и $m \le l$ управляющими воздействиями. Полагая, что каждое управляющее воздействие оказывает влияние на каждую выходную переменную, будем рассматривать линейную динамическую модель объекта управления:

$$y_i = \sum_{j=1}^{m} h_{ij}(p)u_j + n_i,\ i = \overline{1,l},\ j = \overline{1,l}. \quad (1)$$

Смысл задачи управления состоит в поддержании выходных переменных $y_i(t)$ на заданных уровнях y_i^* в условиях неконтролируемых возмущающих воздействий $n_i(t)$. Будем также считать, что каждое управляющее воздействие формируется с учётом отклонений от задания каждой из выходных переменных по правилу:

$$u_j = \sum_{i=1}^{l} w_{ji}(p)(y_i^* - y_i),\ i = \overline{1,l},\ j = \overline{1,l}. \quad (2)$$

Тогда уравнения системы «объект – регулятор», записанные в векторно-матричной форме, приобретут вид:

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{H}(p)\,\boldsymbol{u} + \boldsymbol{n},\quad \boldsymbol{u} = \boldsymbol{W}(p)\,(\boldsymbol{y}^* - \boldsymbol{y}), \quad (3)$$

что соответствует блок-схеме, приведённой на рис. 1.

Далее конкретизируем задачу, приняв, что динамика по каналам передачи управляющих воздействий описывается наиболее распространённой в промышленной автоматике моделью с запаздыванием:

$$\boldsymbol{H}(p) = [h_{ij}(p)],\ h_{ij}(p) = \widetilde{h}_{ij}(p)e^{-p\tau_{ij}},\ i = \overline{1,l},\ j = \overline{1,l}, \quad (4)$$

где h_{ij} и τ_{ij} – соответственно устойчивые передаточные функции и запаздывания, определяющие динамическую модель управляемого процесса.

Будем полагать, что для управления по отклонению используются ПИД-регуляторы:

$$\boldsymbol{W}(p) = [w_{ij}(p)],\ w_{ij}(p) = a_{ji} + b_{ji}/p + c_{ji}p,\ i = \overline{1,l},\ j = \overline{1,m}, \quad (5)$$

Задача состоит в настройке их параметров a_{ji}, b_{ji}, c_{ji}. Если интересует применение ПИ-регуляторов, то настройке подлежат параметры a_{ji} и b_{ji}, а параметры c_{ji} полагаются равными нулю. Заметим, что передаточная матрица многомерного типового регулятора может быть представлена в виде:

$$\boldsymbol{W}(p) = \boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}/p + \boldsymbol{C}p, \quad (6)$$

где $\boldsymbol{A} = [a_{ji}]$, $\boldsymbol{B} = [b_{ji}]$, $\boldsymbol{C} = [c_{ji}]$, – матрицы фигурирующих в (5) параметров П, И и Д-составляющих, причем для ПИ-регулятора $\boldsymbol{C} = 0$.

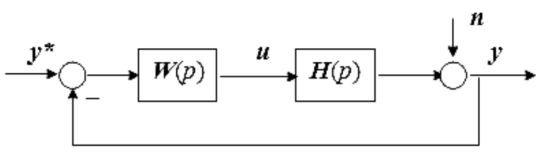


Рис. 1. Блок-схема системы управления

Программный комплекс «MIMO Master». Решить поставленную задачу, т. е. найти матрицы $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$ многомерного регулятора (6), позволяет ПК «MIMO Master». Рассматриваемый ПК является логическим продолжением работы, описанной в [4]. В качестве среды разработки ПК используется стандартное средство анализа и моделирования динамических систем MATLAB & Simulink. Такой выбор помогает качественно и быстро решать множество задач с использованием встроенных функциональных возможностей среды разработки (например, задачи идентификации объекта, реализация поисковых процедур и т. п.). Разработанный интерфейс ПК позволяет пользователю ввести параметры объекта управления (4) или определить их по массивам значений разгонных характеристик, выбрать один или несколько употребительных показателей качества управления, выполнить все необходимые расчёты и процедуры численной оптимизации, увидеть на графиках переходные процессы в замкнутой системе управления, не имея дело непосредственно с универсальной средой проектирования системы.

Основные функции ПК. Рассмотрим функциональные возможности ПК и последовательность действий при работе с ПК на примере расчёта регулятора для управления процессом отделения метанола от воды в дистилляционной колонне. Этот процесс был проанализирован в [1], где для его описания в отклонениях от расчётного режима использовалась динамическая модель с передаточной матрицей:

$$\boldsymbol{H}(p) = \begin{bmatrix} \dfrac{12{,}8e^{-p}}{16{,}7p+1} & \dfrac{-18{,}9e^{-3p}}{21{,}0p+1} \\ \dfrac{6{,}6e^{-7p}}{10{,}9p+1} & \dfrac{-19{,}4e^{-3p}}{14{,}4p+1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Выходными переменными, которые необходимо поддерживать на заданном уровне, являются молярные концентрации метанола в дистилляте и остатке. Управляющие воздействия – верхний рециркуляционный поток и поток пара на входе в по-

догреватель. Максимальные приведённые к выходу возмущения составляют $N_1^{\max} = 0{,}6$ и $N_2^{\max} = 0{,}8$. Применительно к данному объекту в [1] приведены экспериментально найденные настройки двух автономных ПИ-регуляторов:

$$\boldsymbol{W}(p) = \mathrm{diag}\{w_{11}(p), w_{22}(p)\}, \qquad (8)$$

где $w_{11}(p) = 0{,}2 + 0{,}045/p$, $w_{22}(p) = -0{,}04 - 0{,}015/p$. Эти настройки мы в дальнейшем будем использовать для сравнения с расчётными настройками, полученными другими методами.

Функции ПК «MIMO Master»:

1. *Формирование динамической модели объекта управления*. Работа начинается с создания нового или загрузки существующего проекта. Проект содержит всю информацию об объекте, настройках пользователя, результатах расчётов. Динамика многосвязного объекта управления задаётся элементами передаточной матрицы (4). Передаточная матрица может иметь произвольную размерность и быть квадратной ($m=l$) или прямоугольной ($m<l$). Таким образом, ПК позволяет рассчитывать типовые регуляторы для объектов с любым числом управляющих и выходных переменных. Каждый элемент должен представлять собой устойчивую дробно-рациональную передаточную функцию произвольного порядка с запаздыванием. Ввод параметров объекта осуществляется поканально в окне ввода параметров объекта, изображённом на рис. 2.

Если введённая пользователем передаточная функция будет выше первого порядка, то по окончании ввода автоматически запускается подпрограмма, аппроксимирующая введённую пользователем функцию в виде инерционного звена первого порядка с запаздыванием. Для аппроксимации используется стандартная функция MATLAB *pem* [5]. Результаты аппроксимации: параметры аппроксимированного и исходного объекта, графики реакций на ступенчатое воздействие можно посмотреть в окне «Результаты аппроксимации», которое вызывается из меню «Инструменты». Эти данные используются для расчёта многомерного регулятора аналитическим способом, а также для формирования начальных приближений при использовании поисковых процедур.

Если пользователь не знает заранее параметры своего объекта, то он может идентифицировать их по разгонным характеристикам. Для этого с помощью меню «Инструменты» –> «Идентификация объекта» пользователь вызывает окно идентификации, в котором ему предлагается ввести имя файла Excel с массивами разгонных характеристик. Файл должен иметь заданную структуру: первый столбец – массив времени,

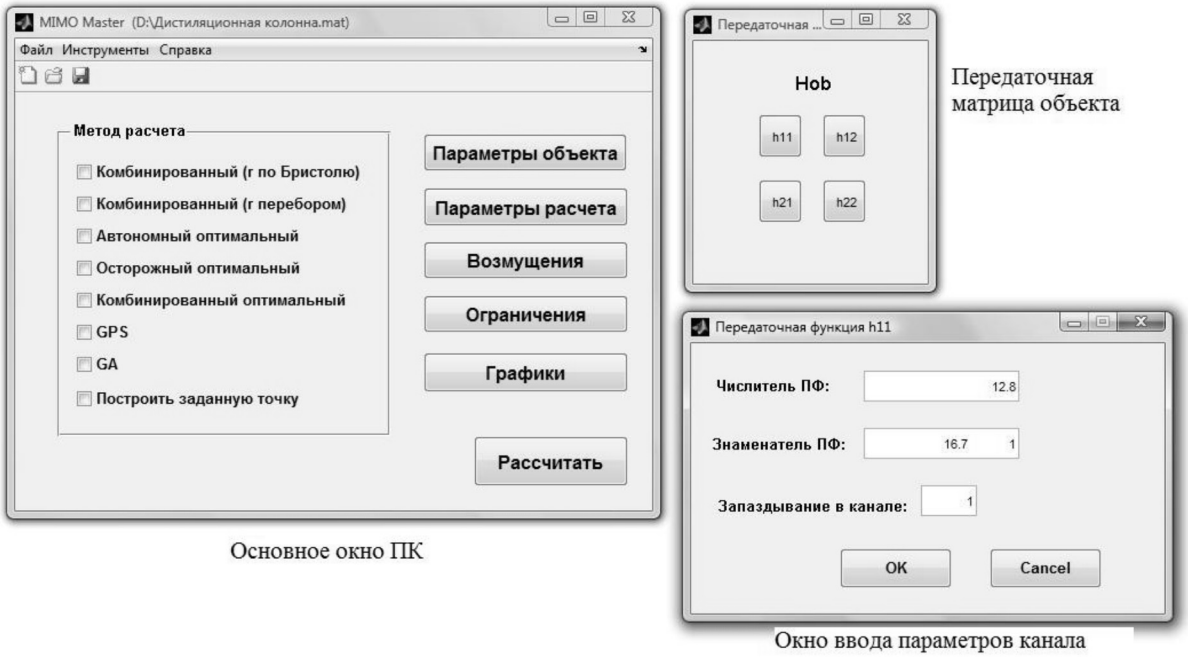


Рис. 2. Основное окно ПК и окна ввода передаточной матрицы объекта

второй – реакция системы на единичное ступенчатое воздействие. Программа автоматически прочитает данные из файла и идентифицирует объект в виде инерционного звена первого порядка с запаздыванием.

2. *Формирование исходных данных для расчётов*. Первое, с чем должен определиться пользователь, – это тип регулятора, а именно: ПИ- или ПИД-регулятор – в соответствии с этим выбором формируются элементы передаточной матрицы многомерного регулятора (6).

При формировании исходных данных для расчёта пользователь выбирает также один из общепринятых показателей качества управления: интегральный квадратичный критерий – ИКК; интегральный квадратичный критерий при ограничениях на показатели перерегулирования и степень затухания колебаний (ограничения на показатели перерегулирования и затухания колебаний приняты соответственно на уровне 15 % и 90 %) – ИККогр; интегральный модульный критерий – ИМК; длительность переходного процесса – Быстродействие. Настраиваются также такие параметры как время моделирования, время контроля системы на устойчивость, параметры поисковых процедур. Окно ввода параметров расчёта представлено на рис. 3.

Для большинства объектов промышленной автоматизации характерны явления инерционности и запаздывания. Преодоление значительной инерционности при компенсации действующих на объект возмущений требует сильных управляющих воздействий, которые могут выходить за допустимые границы. В рассматриваемом ПК (в отличие от большинства существующих методик расчёта параметров законов регулирования с обратной связью), учитываются допуски на величину управляющих воздействий. Они входят в число исходных данных для расчётов.

Результаты расчёта параметров регуляторов могут зависеть от типа возмущений. В ПК предусмотрены два типа возмущающих воздействий:

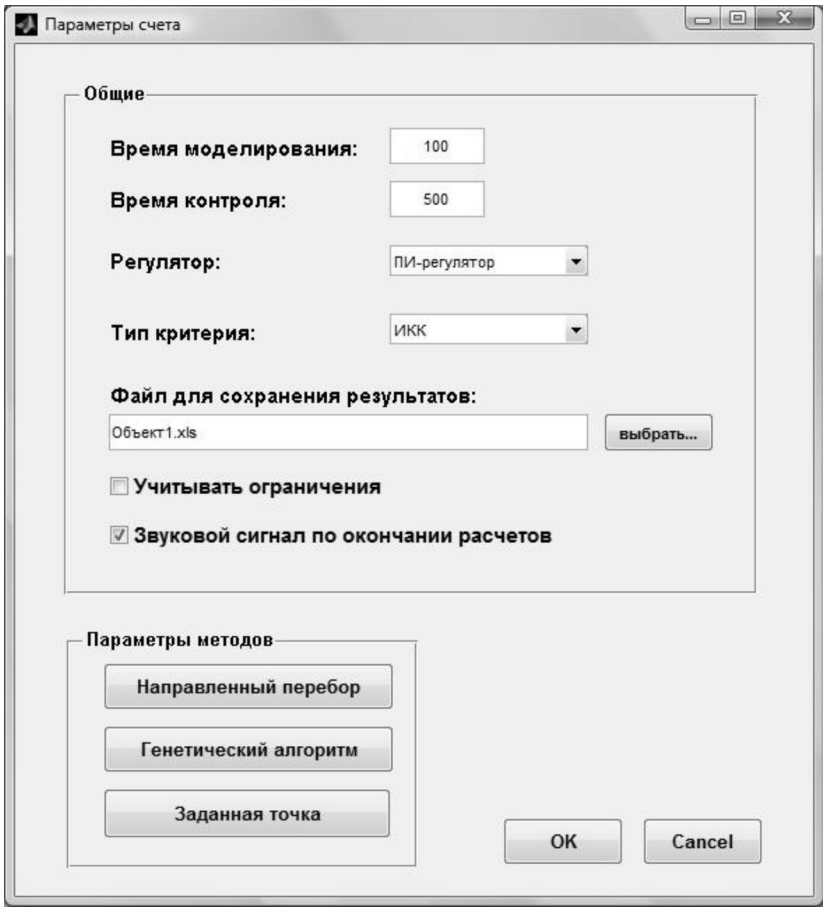


Рис. 3. Окно ввода параметров расчёта

детерминированные ступенчатые и случайные. Для ступенчатых возмущений пользователем указывается их максимальная (по модулю) величина, а для случайных – среднеквадратическое отклонение, параметры передаточной функции формирующего фильтра или время спада корреляции. В многомерном объекте качество управления зависит также и от комбинации знаков ступенчатых возмущений. Всего для вектора ступенчатых возмущений $N = [N_1, N_2, \ldots, N_l]^T$ возможно 2^l сочетаний знаков, однако т. к. для всех инженерных показателей качества J:

$$J(N) = J(-N),$$

то практически целесообразно проанализировать 2^{l-1} вариантов. В программном комплексе предусмотрен режим формирования матрицы всех практически целесообразных комбинаций знаков возмущений. В этом режиме пользователь вводит только амплитуду возмущений по каждому каналу (вектор N), а матрица возмущений формируется автоматически. Сформированная матрица может быть отредактирована пользователем, например, будет убрана технологически невозможная комбинация возмущений. Настройки регуляторов в этом случае определяются по принципу минимаксного подхода, т. е. ищутся настройки, которые дают лучшее значение критерия при самых неблагоприятных знаках возмущений. На рис. 4 представлено интерфейсное окно ввода ступенчатых возмущений и матрица комбинаций возмущений для рассматриваемого объекта.

Говоря о случайных возмущениях, необходимо отметить, что в многомерном объекте возможна взаимная зависимость случайных возмущений, действующих на разные выходы системы, поэтому в дальнейшем предусматривается дополнительно вводить данные о коэффициентах парной корреляции. Получив указанную информацию, ПК автоматически будет рассчитывать параметры многомерного динамического фильтра, формирующего при моделировании случайные сигналы с требуемыми вероятностными характеристиками.

3. *Расчёт параметров многомерных типовых регуляторов*. При расчёте настроек многомерного регулятора пользователю доступны вычислительные процедуры двух типов. К первому типу относятся пять способов расчёта, объединённых общей идеей так называемого «комбинированного метода». Суть данного подхода состоит в том, что вектор управляющих воздействий формируется в каждый момент времени в виде линейной комбинации двух составляющих, каждая из которых представляет собой выход «порождающего» (т. е. соответствующего в той или иной мере упрощённой структуре объекта) многомерного ПИ- или ПИД-регулятора. Настройки первого регулятора соответствуют объекту, полученному из исходного путём пренебрежения перекрестными связями. Второй регулятор настраивается на управление объектом, совпадающим с исходным в статике, но отличающимся поведением в динамике за счёт замены различных по каналам управления динамических операторов единым динамическим

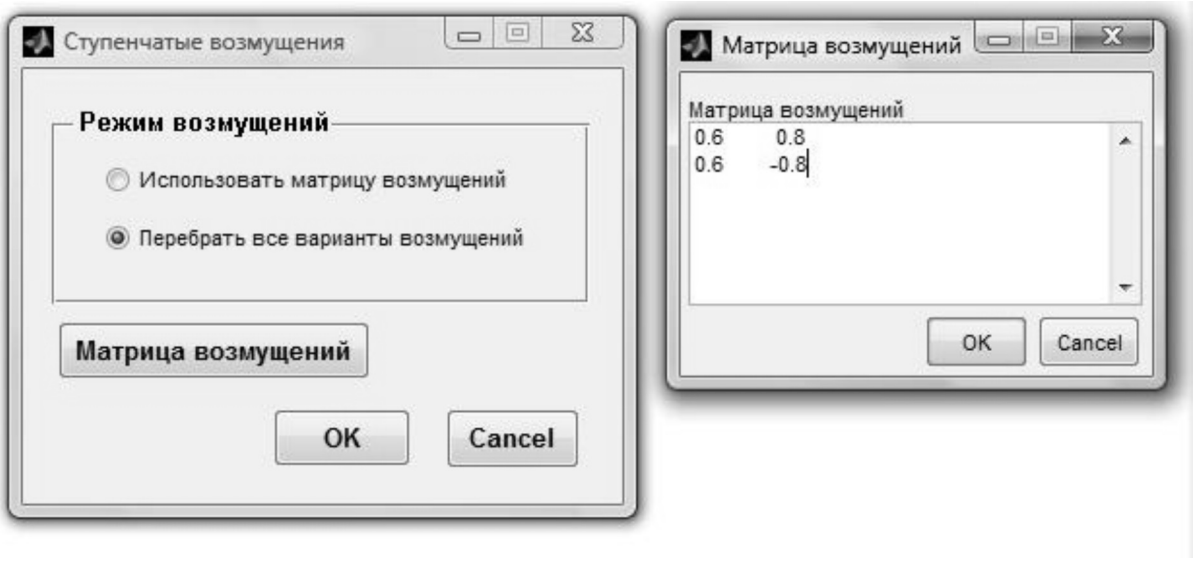


Рис. 4. Окно ввода ступенчатых возмущений

звеном с определённым образом сформированными параметрами. В одном из вариантов все настройки каждого из составляющих регуляторов формируются аналитически на основе метода динамической компенсации. При этом весовой коэффициент, определяющий вклад каждого из вспомогательных регуляторов в комбинированную структуру, определяется с использованием так называемой «матрицы Бристоля», характеризующей относительную интенсивность перекрёстных связей в объекте управления. В другом варианте аналитические способы настройки вспомогательных многомерных регуляторов сочетаются с поисковым способом настройки весового коэффициента, который находится в процессе многократной имитации замкнутой системы управления в среде Simulink из условия минимизации той или иной целевой функции. В остальных вариантах параметры вспомогательных многомерных регуляторов также определяются численно в результате поисковой оптимизации на имитационной модели. Подобная комбинация позволяет сочетать быстроту реакции регулятора первого типа, автономного по каналам управления, с возможностью учёта перекрёстных связей более «осторожным» регулятором второго типа. Простота настройки рассмотренных алгоритмов управления определяется малым числом оптимизируемых параметров, причём для их расчёта не требуются сложные аналитические методы и поисковые процедуры – достаточно схем простого перебора в рамках компьютерного имитационного моделирования. Важным достоинством реализованных в ПК методов настройки является пользовательская возможность выбора одного из ряда наиболее употребительных критериев качества управления, включая важные требования обеспечения необходимого запаса устойчивости системы за счёт соблюдения ограничений на колебательность выходных переменных, а также – ограничений на управляющие воздействия. Подробное изложение сущности комбинированного метода расчёта параметров многомерных ПИ- и ПИД-регуляторов содержится в [6, 7].

Ко второму типу способов настройки регуляторов относятся две вычислительных процедуры, где все параметры многомерных ПИ- или ПИД-законов управления определяются путём поисковой оптимизации по одному из выбранных пользователем инженерных критериев. К поисковым методам относятся: General Pattern Search (GPS), представляющий собой разновидность симплексного метода, и генетический алгоритм (GA). Для первого метода используется стандартная функция MATLAB patternsearch, для второго – стандартная функция ga. Подробное описание этих поисковых процедур дано в [5, 8, 9]. Разумеется, в силу высокой размерности задач поисковой оптимизации алгоритмы настройки, относящиеся к данной группе, обладают существенно меньшим быстродействием, чем варианты комбинированного метода, причём длительность расчётов быстро возрастает с ростом размерности объекта управления. Вместе с тем, в принципиальном плане (при использовании значительных ресурсов времени на поиск настроек) они могут давать лучшие результаты.

4. *Имитационное моделирование*. ПК предусматривает функции имитационного моделирования [10]. Выполнив процедуры по пунктам 1–3, пользователь имеет возможность изменить характеристики возмущающих воздействий, объекта и регулятора и с помощью развитых средств мониторинга проверить работу системы в самых разных условиях. Другое применение функции имитационного моделирования – анализ настроек регуляторов, полученных какими-либо другими методами, например, найденных экспериментальным путём.

5. *Архивация результатов*. У пользователя есть возможность сохранить, полученные результаты в файл Excel. Архивируются такие данные как дата и время расчёта, параметры объекта, метод расчёта, настройки регулятора, значения критериев качества управления, тип и величина возмущений.

Анализ результатов работы ПК. В таблице представлены результаты расчётов для объекта (7) всеми методами, реализованными в ПК «MIMO Master». Выполнен расчёт многомерного ПИ-регулятора, показатель качества – интегральный квадратичный критерий. Методы 1–5 реализуют идею комбинированного подхода в различных модификациях, рассмотренных выше. При этом методы 3 и 4 являются предельными случаями метода 5 (весовой коэффициент $r = 0$ или $r = 1$).

Сравнивая данные таблицы, можно убедиться в преимуществе методов ПК над экспериментальным регулятором как по ИКК, так и по длительности переходных процессов. Характерным исключением является метод 3. Он показывает влияние перекрёстных связей в объекте управле-

Результаты расчётов разными методами

Метод	Минимаксные возмущения	ИКК	Время регулирования, с	A	B	Время расчета, с
1. Комбинированный (*r* по Бристолю)	[0,6 0,8]	0,057	49	$\begin{bmatrix} 0,70 & -0,05 \\ 0,02 & -0,04 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,044 & -0,005 \\ 0,002 & -0,012 \end{bmatrix}$	0,03
2. Комбинированный (r перебором)	[0,6 0,8]	0,047	25	$\begin{bmatrix} 0,43 & -0,12 \\ 0,04 & -0,14 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,029 & -0,011 \\ 0,004 & -0,012 \end{bmatrix}$	23
3. Автономный (оптимальный по каналам) ($r = 0$)	[0,6 0,8]	0,099	>100	$\begin{bmatrix} 0,99 & 0 \\ 0 & -0,19 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,041 & 0 \\ 0 & -0,009 \end{bmatrix}$	18
4. Осторожный оптимальный ($r = 1$)	[0,6 –0,8]	0,053	45	$\begin{bmatrix} 0,43 & -0,42 \\ 0,15 & -0,28 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,028 & -0,027 \\ 0,009 & -0,018 \end{bmatrix}$	43
5. Комбинированный оптимальный	[0,6 0,8]	0,045	22	$\begin{bmatrix} 0,52 & -0,34 \\ 0,12 & -0,27 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,030 & -0,023 \\ 0,008 & -0,017 \end{bmatrix}$	97
6. GPS	[0,6 –0,8]	0,043	53	$\begin{bmatrix} 0,45 & -0,15 \\ 0,04 & -0,16 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,052 & -0,013 \\ 0,019 & -0,012 \end{bmatrix}$	116
7. GA	[0,6 0,8]	0,048	37	$\begin{bmatrix} 0,44 & -0,16 \\ 0,01 & -0,16 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,044 & -0,005 \\ 0,019 & -0,012 \end{bmatrix}$	559
8. Экспериментальный регулятор	[0,6 0,8]	0,093	74	$\begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & -0,04 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,045 & 0 \\ 0 & -0,015 \end{bmatrix}$	-

ния на качество переходных процессов в системе с регулятором, настроенным оптимально для управления своим каналом, без учёта перекрёстных связей в объекте. Также видно, что использование поисковых процедур 6 и 7 не привело к значительному улучшению качества управления. Вместе с тем, они затрачивают значительное время для расчёта настроек. К тому же, это время быстро возрастает с ростом размерности объекта, в то время как для комбинированных методов оно остаётся практически неизменным.

После расчёта пользователь имеет возможность изучить вид переходных процессов по графикам. На рис. 5 показано окно просмотра графиков. Переходные процессы для регулятора, найденного экспериментальным путём (2), обозначены серой линией, для регулятора, рассчитанного методом 2, – черной линией.

Перспективы развития программного комплекса. В настоящий момент программный комплекс работает в среде MATLAB & Simulink, а также требует наличия следующих опций MATLAB: System Identification Toolbox, Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox, Control System Toolbox.

MathWorks предоставляет опцию MATLAB Compiler, которая позволяет компилировать исполняемый файл из исходных *m*-файлов, написанных на MATLAB. Предполагается в будущем сделать независимое приложение, которым можно будет пользоваться, не приобретая ППП MATLAB.

Разработанный ПК является мощным инструментом для исследования и настройки регуляторов многосвязных управляемых технологических процессов произвольной размерности. Алгоритмы, положенные в основу ПК, позволяют рассчитывать настройки регулятора не только с учётом ограничений на выходные переменные (перерегулирование и степень затухания колебаний), но и на величину управляющих воздействий. Учи-

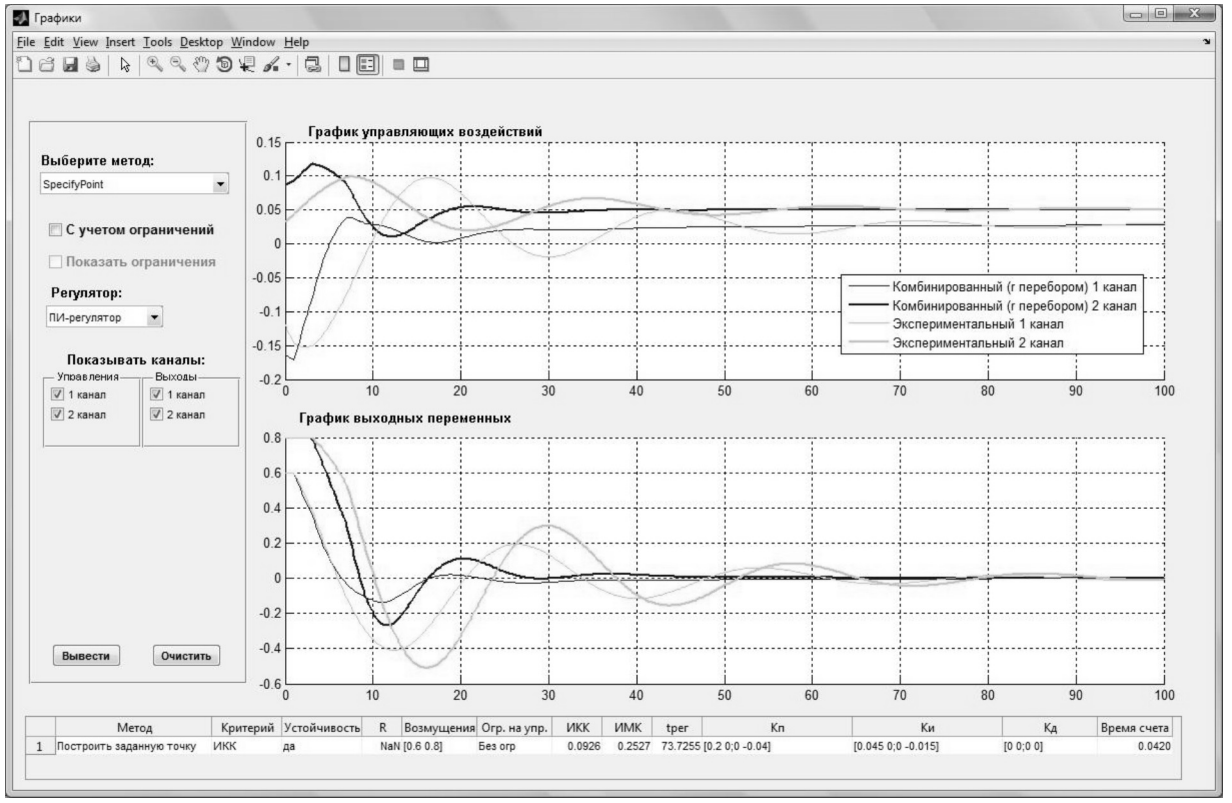


Рис. 5. Окно просмотра графиков

тывая, что ППП MATLAB и его опции, известные автору, не обеспечивают решение задачи настройки многомерных *типовых* регуляторов для многосвязных динамических объектов с запаздыванием, данный ПК может найти широкое применение в области промышленной автоматизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рей У.** Методы управления технологическими процессами М.: Мир, 1983. 368 с.

2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 400 с.

3. **Штейнберг Ш.Е., Сережин Л.П. и др.** Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 7. С. 1–7.

4. **Спорягин К.В., Панов В.С., Яковис Л.М.** Программный комплекс настройки типовых регуляторов для многосвязных объектов управления // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ. Ч. V. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009.

5. Официальный сайт MathWorks. URL: http://www.mathworks.com

6. **Яковис Л.М., Спорягин К.В.** Настройка типовых регуляторов для многосвязных объектов управления // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2009. № 6. С. 55–63.

7. **Яковис Л.М., Спорягин К.В.** Расчет регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием // Автоматизация в промышленности. 2009. № 12. С. 21–25.

8. **Audet Ch., Dennis Jr. J.E.** Analysis of Generalized Pattern Searches // SIAM Journal on Optimization. 2003. Vol. 13. № 3. P. 889–903.

9. **Goldberg D.E.** Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning. Addison-Wesley, 1989.

10. **Яковис Л.М.** Имитационное моделирование – ключ к решению задач управления сложными технологическими процессами // Автоматизация в промышленности. 2006. № 7. С. 25–30.

УДК 004.72, 004.772

Д.С. Садаков, С.Э. Сараджишвили

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ПРОТОКОЛ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ФАЙЛООБМЕННОЙ СЕТИ

Человечеству стали доступны ранее немыслимые объёмы цифровой информации. В год создаётся больше одного эксабайта (10^{18} байт) информации и прослеживается экспоненциальный рост [11]. Справиться с таким информационным взрывом помогают информационно-поисковые системы (ИПС) и рекомендательные системы. Из всей доступной информации они выбирают наиболее релевантную по запросу с ключевыми словами и по заранее известным предпочтениям пользователя. Эти системы предполагают единый пункт со всей информацией о доступных ресурсах, например, в кластерных центрах Google, Yandex, и Amazon. Но на сегодняшний день по количеству передаваемых данных доминируют децентрализованные файлообменные сети, лишённые центрального пункта с информацией о ресурсах сети, и без налаженных поисковых и рекомендательных систем.

Исследования по улучшению качества поиска в децентрализованных сетях остаются достаточно ограниченными по сравнению с аналогичными трудами для централизованных сетей, но активно продолжаются в работе над пятым поколением P2P-сетей.

Компьютерные сети, основанные на равноправии участников (P2P – peer-to-peer), стали самым популярным транспортным средством для обмена файлами в сети Интернет [1]. В отличие от неравноправных сетей (например, архитектура клиент-сервер), в децентрализованных сетях каждый узел является как клиентом, так и сервером, что позволяет сохранять работоспособность сети при любом количестве и любом сочетании доступных узлов. Информация передаётся напрямую от узла к узлу, что делает сеть более масштабируемой, устойчивой и эффективной.

Как показали исследования мирового трафика IPOQUE за 2009 г. [2], почти три четверти всей передаваемой информации в мире передаётся по протоколам P2P (69 %). Затем следуют веб-протоколы 16 % и потоковые протоколы (7%). Исследования в области улучшения качества и возможностей P2P-сетей, в т. ч. и децентрализо-

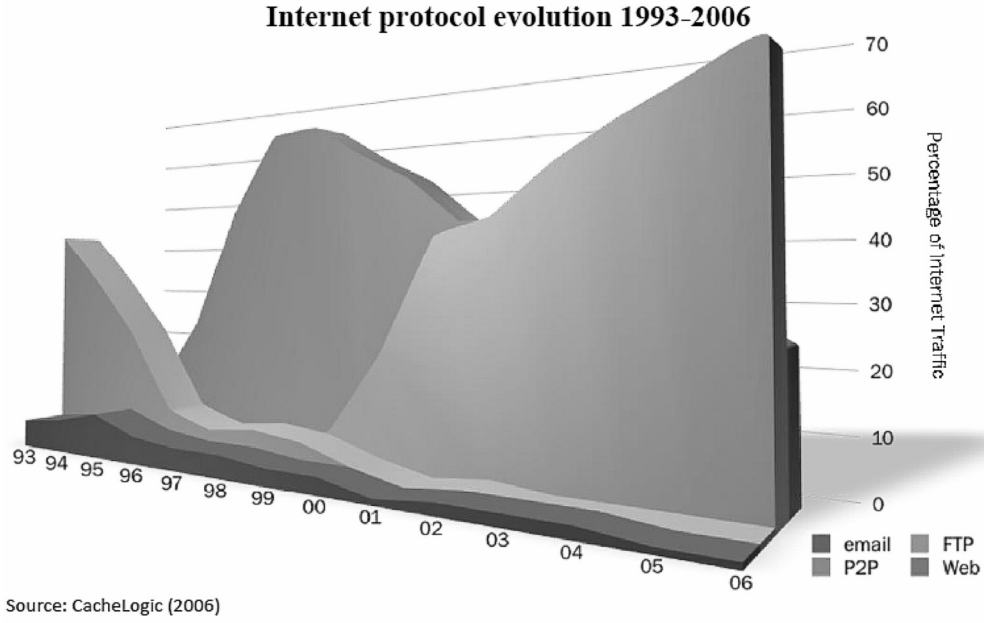


Рис. 1. Эволюция протоколов по передачи информации в сети Интернет с 1993-го по 2006-й г.

ванных рекомендательных протоколов, является актуальной исследовательской задачей.

На рис. 1 виден рост процента трафика P2P-сетей [1].

В данной статье описаны текущие рекомендательные протоколы для децентрализованных сетей (ДС), выявлены требования и предложен улучшенный протокол для создания современной и компетентной децентрализованной рекомендательной системы ДС.

Существующие децентрализованные рекомендательные протоколы. Протокол BitTorrent перевернул область передачи крупных файлов из-за грамотной архитектуры протокола: масштабируемого, эффективного и надёжного протокола P2P [1]. Восемьдесят процентов всего передаваемого P2P-трафика протекает по протоколу BitTorrent [2]. В основе протокола лежит взаимовыгодный обмен файлами на принципе эффективности по Парето. Однако протокол не включает в себя механизмы поиска, ранжирования, оценивания или передачу метаданных о файлах.

Без этих компонентов протокол можно использовать только для передачи файлов вслепую, не зная ничего о содержимом. На практике пользователи обходят эту проблему централизованными сайтами раздачи .torrent-файлов, необходимыми для начала передачи файлов, а исследователи активно изучают улучшения к протоколу.

В истории возникновении P2P-сетей можно выделить пять их поколений [12], чётко проследить развитие поисковых возможностей и понять, почему рекомендательные протоколы являются наилучшим потенциальным расширением P2P-сетей.

В первом поколении P2P-сети имели один централизованный сервер, где хранилась информация об узлах сети и доступных файлах. Примером P2P-сети первого поколения является Napster. Несмотря на одноранговость всех пользователей сети, которые занимаются файловым обменом, сеть зависит от одного центрального сервера. В случае остановки центрального сервера становится невозможным поиск файлов внутри сети, она распадается. Так произошло с сетью Napster в 2001 г., когда закрытие центрального сервера привело к разрушению сети из миллионов узлов.

Второе поколение P2P-сетей, примером которой служит Gnutella, потомок Napster, является полностью децентрализованным, с принципиальным отсутствием центрального сервера. Информация об имеющихся в сети файлах хранится распределённо на её узлах, поиск производится по технологии gPulp, где запросы на поиск выполняются по собственной схеме маршрутизации GBFS с ограничением по глубине поиска и количеству возвращаемых результатов. Но сеть плохо защищена от поддельных узлов и файлов, что привело в конечном итоге к сомнительной приемлемости результатов поиска.

Третье поколение P2P – это компромисс между централизованными и децентрализованными подходами, примером является eDonkey2000. Вместо централизованных серверов используются узлы самой сети, т. н. серверные узлы, предназначенные для поиска и индексации файлов, которые могут обмениваться этой информацией между собой. На практике это работало с ограниченным успехом, т. к. при отключении серверных узлов возникает сегментация сети.

Четвёртое поколение P2P-сетей получило наибольшее распространение в виде самого распространенного сегодня протокола BitTorrent, созданного Брэмом Коэном [5]. Основано на сегментировании P2P-сети. Сеть BitTorrent представляет собой набор обособленных сегментов, каждый из которых повторяет во многом сети первого поколения и состоит из одного или многих серверов. За счёт грамотной архитектуры узлов протокол поддерживает высокие скорости обмена между ними. Но сильная зависимость от центральных серверов является недостатком: отключение центрального сервера приводит к остановке работы сегмента сети. Протокол не имеет механизмов поиска и индексации файлов, он предназначен только для эффективной передачи файлов между узлами сети.

В пятом поколении P2P-сетей для устранения недостатков в сетях третьего и четвёртого поколения были внедрены вспомогательные, так называемые «оверлейные сети». Оверлейная сеть – это новая виртуальная децентрализованная сеть, созданная поверх существующей P2P-сети. Внутри оверлейной сети узлы получают адреса, не связанные с географическим или топологическим расположением узлов в рамках несущей сети. Примерами являются BitTorrent DHT, Kademlia и BuddyCast. Последний из них находится в активной разработке и открыт для изменений (open source).

Информационный поиск в P2P-сетях. Свойства децентрализованных файлообменных

сетей усложняют применение опыта в реализации информационных поисковых систем и рекомендательных систем, ориентированных на централизованные сети. В рекомендательных системах используются алгоритмы коллаборативной фильтрации (CF – collaborative filtering) для анализа различных мнений и пожеланий пользователей и для выработки персональных рекомендаций. Особенности децентрализованных компьютерных файлообменных сетей также мешает перенос разработанных алгоритмов CF. Всё это ведёт к ухудшению качества поиска и рекомендаций в децентрализованных сетях. Для переноса существующих ИПС и рекомендательных систем в децентрализованные сети необходимо преодолеть следующие несоответствия между ними:

Бинарные файлы. Традиционные ИПС ориентированы на текстовые файлы. Поисковые системы могут использовать векторы ключевых слов и семантические онтологии, чтобы найти нужный файл по содержащемуся в нём тексту на естественном языке. Децентрализованные сети чаще всего содержат в себе бинарные файлы, где содержимое описывает аудио- и видеопотоки, изображения. Определять содержимое файла можно по метаданным и по дескриптору файла (по названию и директории), которые чаще всего короткие и неточные. Чаще всего P2P-клиенты передают видеоинформацию и фильмы (70 %), ПО и игры (15 %,) и аудиозаписи (15 %) (см. рис. 2).

Отсутствие центрального индекса. Традиционные ИПС зависят от центрального индекса. Используя индекс, документ можно квалифицировать и идентифицировать, а затем ранжировать по релевантности к запросу пользователя. В децентрализованных сетях отсутствует такой индекс. Индивидуальные узлы имеют только малую долю файлов, что осложняет процессы идентификации нужных файлов и их ранжирование по релевантности.

Взвешивание терминов запроса. В традиционных системах часто применяются алгоритмы взвешивания терминов запроса, что улучшает поиск и релевантность результата. С отсутствием центрального индекса сложно определить уникальность и ценность термина в запросе.

Размер передаваемых файлов. По исследованиям [1] больше 50 % файлов, передаваемых в P2P-сетях, больше 1 Гб, в Азии – больше 2,5 Гб. Это резко отличается от традиционных ИПС, в которых конечный результат поиска – страница с подробной информацией.

Клиент Tribler реализует оверлейную сеть для рекомендаций и поиска, где для обмена внутри сети используется рекомендательный протокол BuddyCast, работающий следующим образом.

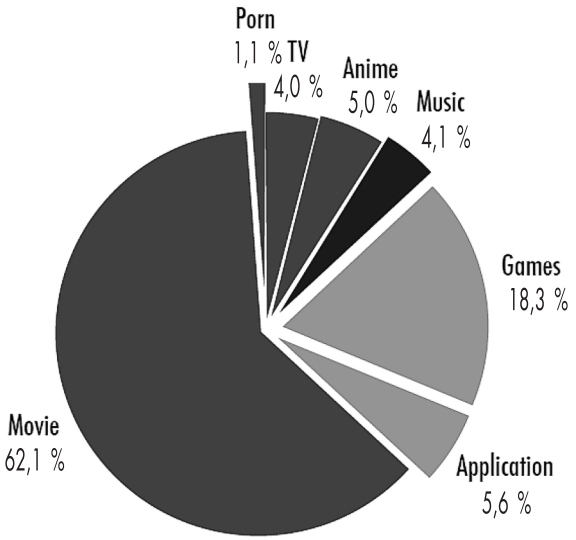


Рис. 2. Тип передаваемой информации в 2009 г. [2]
Video 72 %; Softvare 24 %; Audio 4 %

Каждый клиент сети хранит два списка: список N клиентов сети с наиболее схожими вкусами (по формуле 1) с их историей скачиваний, и список случайных клиентов сети без их истории скачиваний. Периодически клиент соединяется с клиентом либо из первого списка для обмена информацией о социальных связях и для получения обновлённой истории скачивания, либо из второго списка, со случайным клиентом, для изучения потенциальных более выгодных связей. Выполняя периодические обновления и исследования, клиент всегда осведомлён о схожих по вкусам клиентах, даже если они новые в сети.

Протокол BuddyCast помимо передачи значения SHA1 от передаваемых файлов в истории скачивания, будет передавать и ключевые слова, по которым найден .torrent-файл, позиция в результатах поиска и полное имя .torrent-файла, также будет передаваться свежая информация о количестве пользователей в раздаче. В итоге протокол позволит собрать и выявить список самых интересных узлов сети по нескольким метрикам: схожесть по вкусам, расстояние по сети, скорость отдачи данных, склонность раздавать файлы (альтруизм), социальное расстояние, надёжность и накопленная история совместной передачи файлов.

Предлагаемый рекомендательный протокол для P2P-сетей. Рекомендательный протокол для клиента Tribler предлагается расширить следующим образом:

1. Сделать привязку PermID к набору идентификаторов из внешних социальных сетей пользователя. Это позволит рекомендовать файлы по социальному графу этих сетей, что повысит качество рекомендаций.

2. Сохранять информацию об объёме раздачи и рекомендовать краткосрочные раздачи первыми.

3. Использовать стандарт APML для описания и обмена интересов.

4. Позволить пользователю вручную выставлять рекомендации в истории скачивания.

Привязка PermID к идентификаторам из внешних социальных сетей. Социальные сети Facebook (320 млн), MySpace (130 млн), vkontakte (65 млн), Twitter (75 млн), Google, Microsoft Live ID (120 млн) и др. содержат миллионы пользователей. Социальные иерархии этих сетей предоставлены протоколами FaceBook Connect, Google Friends Connect и др. Многие социальные сети реализуют протокол авторизации OAuth и OpenId идентификации, предоставляют специализированные API для получения информации о социальном графе конкретного пользователя.

Идентификатор клиента, используемый в протоколе BuddyCast, называется PermID и содержит публичной ключ, полученный алгоритмом из семейства эллиптической криптографии. Клиенты, зная публичные ключи по идентификатору PermID, авторизуются по стандартному протоколу ISO/IEC 9798-3 (challenge/response). В такой схеме идентификатор PermID привязан только к одному адресу IP и порту, что ограничивает оверлейную социальную сеть.

Предлагается реализовать связку PermID ко многим социальным идентификаторам внешних социальных сетей. В качестве идентификаторов социальной сети можно выбрать один из распространённых протоколов децентрализованной авторизации. Достаточную популярность приобрёл протокол децентрализованной авторизации OpenID, разработанный Брэдом Фицпатриком. Позднее он предложил другой, более проработанный и расширяемый протокол получения социальных идентификаторов в социальных сетях по адресу электронной почты, WebFinger, в одном XML файле в формате XRD. Многие сервисы предлагают социальный граф в формате FOAF для автоматического построения социального графа децентрализованным клиентом.

Используя эти протоколы и привязку PermID к идентификатору человека во внешних социальных сетях можно (1) автоматически получить социальные идентификаторы его друзей в реальном мире, (2) автоматически найти их внутри социальной сети по протоколам DHT и Kademlia и (3) сгенерировать более релевантные выборки файлов РП по интересам пользователей. Как показывает опыт исследователей социальных оверлейных сетей [10], клиенты ведут себя более щедро, раздавая файлы своим знакомым и друзьям. Также чётко прослеживается тенденция, что схожие по интересам люди находятся ближе в социальном графе и имеют больше общих социальных связей. Люди тяготеют друг к другу либо по социальному графу из социальных сетей, либо по схожести файлов из истории скачивания. Чем ближе клиенты находятся по социальному графу, тем больше вероятности построить взаимовыгодные социальные контакты для P2P-сети.

В итоге протокол BuddyCast будет поддерживать не только схожесть по файлам, но и автоматическую выдачу рекомендации по социаль-

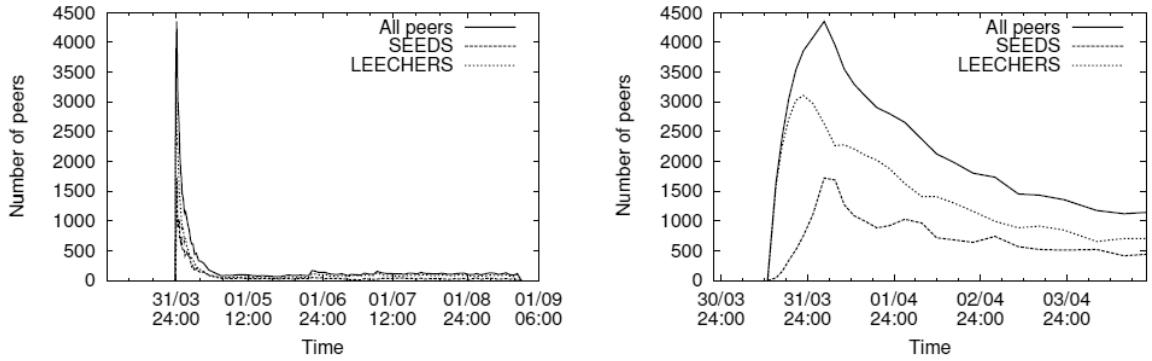


Рис. 3. Экспоненциальный спад скорости P2P BitTorrent

ной иерархии из внешних социальных сетей. Для этого необходимо расширить вызов SOCIAL_OVERLAP (ID 239), передавая не только имя пользователя и его картинку, но и набор строковых идентификаторов внешних социальных сетей в формате XRD.

Экспоненциальный спад раздач. Временные распределения файлов внутри P2P-сетей являются другой проблемой, с которой сталкиваются децентрализованные рекомендательные системы. Исследования показывают [8], что скорость раздачи файлов внутри P2P-сетей экспоненциально уменьшается со временем. Это видно на рис. 3.

Экспоненциальный спад скорости более характерен для некоторых типов раздач, таких как телевизионные трансляции телешоу, обновлений ПО и др. Для улучшения качества рекомендательной системы предлагается создать метрику, по которой можно определять раздачи более характерные для падения скорости и отделить их в результатах от более стабильных, размеренных раздач. Это можно сделать, дополнив запись в списке истории скачивания количеством раздающих узлов в разное время, как в таблице, что даст достаточно информации для определения инертности раздачи в результатах рекомендательной системы.

Для предоставления этой исторической информации предлагается расширить вызовы BUDDYCAST (ID 249) и GET_METADATA (ID 248), в которых передаётся список истории скачивания. Для каждого элемента в списке нужно хранить не только имя файла, поисковые термины, но и количество раздающих файл узлов сети в разные моменты времени.

Стандартизированный формат интересов пользователя APML. Также предлагается стандартизировать формат обмена интересами, используя известные и принятые микроформаты, например «язык разметки профилирования внимания» APML (APML – Attention Profiling Markup Language), в котором собираются характеристики пользователя и его иерархия интересов в формате XML. Информацию об интересах пользователя можно собрать из истории скачивания, так же как и со списка запросов в поисковой системе. Эту информацию предлагается сохранить в формат APML с вычисленными коэффициентами для каждого интереса. Например, имея список файлов и поисковых запросов можно семантически определить расположенность пользователя к телешоу и выставить высокий коэффициент интереса в файле APML.

Сжатый APML файл можно передавать по сообщению BUDDYCAST (ID 249), либо, что предпочтительнее, в отдельном вызове GET_APML, что делается только для новых или при обновлении старых узлов из списка.

Результирующий рекомендательный протокол. При выполнении указанных выше требо-

Предлагаемый механизм сохранения истории популярности раздачи файла

Время начала раздачи T, ч	+00	+2	+4	+8	+16	+32	+64
# раздающих	123	2345	3456	3452	500	200	100

ваний рекомендательный протокол будет годен для рекомендательной системы, в которой будут поддерживаться:

рекомендации файлов от известных человеку людей из внешних социальных сетей;

фильтрация дублирующихся рекомендаций от похожих узлов, но с одинаковыми социальными идентификаторами из внешних социальных сетей;

ранжирование результирующего списка рекомендованных файлов по скорости убывания числа узлов на раздаче;

более стандартизированный обмен данными (APML), что позволит в будущем встраивать другие рекомендательные системы в один протокол, не заменяя протокол общения между узлами.

Таким образом, предложен протокол, на основе которого можно создать современную децентрализованную рекомендательную систему ДС поверх существующих P2P-сетей Tribler и BitTorrent DHT.

В статье выделены текущие проблемы в рекомендательных протоколах децентрализованных сетей. Описан набор необходимых свойств нового рекомендательного протокола для ДФС, включающий необходимые элементы для улучшения качества рекомендательной системы. Рассмотрены механизмы интеграции социальных сетей и децентрализованной социальной оверлейной сети и места расширений протокола BuddyCast, для реализации требуемого РП. Описанный протокол позволит получать более релевантную выборку рекомендации при сохранении свойств автоматического создания P2P-сети.

Для получения количественных оценок об улучшении рекомендаций необходимо провести лабораторные испытания с прототипом, основанным на клиенте P2P Tribler в сети с большим количеством узлов (больше 100 000 узлов). К недостаткам можно отнести возрастание количества передаваемой информации протоколом, что может негативно повлиять на скорость сети.

Перспективными направлениями исследований рекомендательных протоколов для ДФС являются также: выявление ограничений и возможностей языка описания интересов APML в ранжировании для рекомендательных систем и выявление метрик для определения наиболее вероятных поисковых запросов из истории запросов других пользователей ДФС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Parker A.** Cache Logic Research «P2P in 2005», 2006 P2P Media Summit. URL: http://www.dcia.info/activities/p2pmswdc2006/ferguson.pdf

2. Исследовательская группа IPOQUE, Internet Study 2008/2009, 2009. URL: http://portal.ipoque.com/downloads/index/study

3. **Nguyen L., Jia D., Yee W.G., and Frieder O.** Analysis of Query Logs in Gnutella Peer-to-Peer Network / ACM, 30-я конф. исследований и разработок в информ. поиске (SIGIR). Амстердам, Голландия, июль 2007.

4. **Rahman R., Hales D., Meulpolder M.** et al. Robust vote sampling in a P2P media distribution system / IEEE Intern. Symp. on Parallel&Distributed Processing, 2009, P. 1–8.

5. **Cohen B.** Incentives build robustness in BitTorrent. In Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems. Berkley, USA, May 2003. URL: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.14.1911&rep=rep1&type=pdf

6. **Wong B., Vigfusson Y. and Sirer E.G.** Hyperspaces for Object Clustering and Ap-proximate Matching in Peer-to-Peer Overlays. In HotOS Workshop, 2007. URL: http://www.cs.cornell.edu/People/egs/papers/hyperspaces.pdf

7. **Wong B., Vigfusson Y. and Sirer E.G.** Approximate Matching for Peer-to-Peer Over-lays with Cubit. Cornell University, 2008. URL: http://www.cs.cornell.edu/~bwong/cubit/tr-cubit.pdf

8. **Izal M., Urvoy-Keller G., Biersack E.W. et al**. Dissecting BitTorrent: Five Months in a Torrent's Lifetime. In PAM, 2004. URL: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.76.7615 &rep=rep1&type=pdf

9. **Garbacki P., Iosup A., Doumen J. et al**. TRIBLER PROTOCOL SPECIFICATION http://svn.tribler.org/bt2-design/proto-spec-unified/trunk/proto-spec-current.pdf

10. **Koolen S.D.** Creating and Maintaining Relationships in Social Peer-to-Peer Networks. Delft University of Technology, 2007.

11. **Prete C.D., McArthur J.T., Villars R.L. et al**. Industry developments and models / Disruptive Innovation in Enterprise Computing: storage. IDC, Feb. 2003.

12. **Сеппель Е.** История и развитие пиринговых сетей. СПбГУ, ММФ, 2008.

УДК 004.02; 004.9

Р.И. Ивановский

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КАК НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Роль математического и имитационного моделирования в современной жизни трудно переоценить. Моделирование в качестве практически безальтернативного средства поддержки принятия решений продолжает расширять сферы своего применения. Одной из важнейших областей, в которых моделирование особенно востребовано, является энергетика. Трудно представить решение таких задач, как управление динамикой процессов в режимах нормального функционирования оборудования и в аварийных ситуациях, принятие решений в целях обеспечения живучести системы без моделирования. Для решения этих задач необходимо знать динамические свойства объектов управления, которые должны трансформироваться в соответствующие математические и/или имитационные модели.

Наряду с аналитическими подходами к построению моделей широкое распространение получили методы, опирающиеся на натурные испытания. Результаты подобных испытаний требуют соответствующей обработки, которую можно условно подразделить на первичную и вторичную. На этапе первичной обработки осуществляется получение информации, связанной с особенностями используемых датчиков, погрешностями фиксации данных испытаний, динамическими ошибками записывающих устройств. На этапе вторичной обработки полученная информация используется для формирования моделей исследуемых объектов. Эти модели, в свою очередь, используются для выявления свойств объектов, синтеза или коррекции систем управления.

От достоверности данных, полученных в результате первичной обработки, в сильной степени зависит качество тех выводов и решений, которые принимаются на этапе вторичной обработки. Первичной обработке уделяется недостаточное внимание, несмотря на важность, а, зачастую, и сложность используемых процедур.

Особенности процедур первичной обработки рассматриваются применительно к реальным экспериментам с дизельгенератором судовой энергетической системы, в процессе которых выявлялись динамические свойства системы управления числом оборотов вала. Показывается рациональность и необходимость использования систем компьютерной математики (СКМ) для формирования и апробации типовых процедур первичной обработки.

Виды экспериментов. Эксперименты, которые проводятся в целях построения математических моделей динамических систем можно подразделить на активные и пассивные [1].

При активных экспериментах на вход динамического звена (или динамической системы) в его исходном установившемся состоянии подаётся стандартный сигнал (например, ступенчатый) и снимается реакция звена на это воздействие. После вторичной обработки, связанной, например, с получением и аппроксимацией переходной характеристики, формируется математическое описание (модель) звена. Необходимыми условиями активных экспериментов служат: возможность автономной работы исследуемого звена в процессе эксперимента; наличие точек воздействия на звено и точек съёма данных в реальной (или экспериментальной) установке. Ряд динамических звеньев в составе исследуемого объекта (например, механический регулятор паровой или гидротурбины, дизельгенератора) не всегда можно выделить в качестве автономной части, активные эксперименты в таких случаях используются для построения укрупнённых моделей, в которых в качестве объекта может выступать совокупность нескольких динамических звеньев или даже замкнутая модернизируемая система в целом. Пассивные эксперименты не требуют активного воздействия на элементы динамической системы и заключаются в пассивном измерении входного и выходного сигналов исследуемого звена (системы) в переходном режиме. Результаты подобных экспериментов обрабатываются алгоритмами решения так называемой задачи «черного ящика».

Технология построения математических моделей путём решения этой задачи описана в [2]. Необходимым условием пассивных экспериментов служит наличие точек съёма входных и выходных сигналов звена.

Эксперименты с моделями объектов (систем) позволяют осуществлять более глубокий анализ свойств режимов, например, на основе имитации случайных воздействий и усреднений по множеству «прогонов» модели. При этом может проводиться анализ как нормальных, так и аварийных режимов, исследование которых и их последствий в натурных условиях невозможен по очевидным причинам. Рассмотрим в качестве примера особенности одного из натурных экспериментов.

Процедуры обработки. Рассматриваемый эксперимент проводился в целях изучения свойств системы регулирования числа оборотов вала дизельгенератора при вариациях нагрузки. В экспериментах фиксировались: параметры исходного установившегося режима, вариация нагрузки, сигналы датчика числа оборотов вала. Датчик имел зубчатое колесо, закреплённое на валу и электромагнит; выходной сигнал датчика в процессе вращения вала колебался с частотой, пропорциональной числу зубцов колеса. Фрагмент таких колебаний представлен на рис. 1. Одному обороту вала соответствует число периодов колебаний, равное числу зубцов датчика. Точному определению числа периодов выходного сигнала датчика мешает наличие помех, хорошо заметное на рисунке. Поэтому определение точек пересечения гармонической функции (см. рис. 1) с осью абсцисс проводилось с применением регрессионного анализа. Учитывая практически линейный характер гармонического процесса в малой окрестности вокруг каждой точки пересечения, для одного из вариантов выделения полезной информации из измеренных данных можно использовать процедуру построения простой линейной регрессии [4].

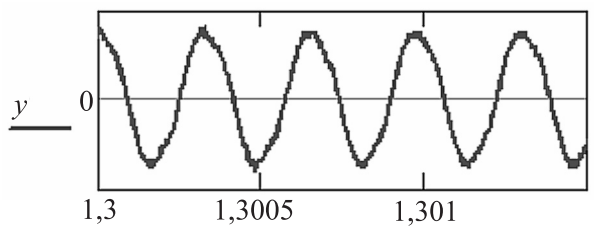


Рис. 1. Выходной сигнал датчика числа оборотов

Прототип программы, позволяющей решать задачи рассмотренного типа, составлен в среде Mathcad, иллюстрации здесь и далее приведены в виде копий фрагментов Mathcad (xmcd-файлов). Процедура первичной обработки для этого этапа предполагает: выделение информативной части массивов результирующих данных; определение точек пересечения процессом оси абсцисс путём решения задачи регрессии; определение периодов колебаний и пересчёт их в числа оборотов вала n; построение переходного процесса $n(t)$, возникающего в результате изменения нагрузки, и его фильтрация. Кратко проиллюстрируем эту процедуру и наметим основы её реализации.

Определение периодов высокочастотных колебаний. На этом этапе определяются точки пересечения процесса (рис. 1) с осью абсцисс. Разработанная циклическая процедура последовательно фиксирует моменты смены знаков процесса, выделяет для каждого из них координаты нескольких точек до и после перехода, строит простую регрессию по этим точкам. Результат для каждого момента времени, в который происходит пересечение, вычисляется по уравнению регрессионной прямой.

На рис. 2, *а* представлен фрагмент xmcd-файла, иллюстрирующий пример определения точки пересечения (точки Z). Регрессия в данном примере строится по четырём точкам, ординаты которых содержатся в первом столбце матрицы **z**, а соответствующие абсциссы – в третьем столбце той же матрицы. Два последних столбца матрицы **z** – матрица **A** системы четырёх линейных алгебраических уравнений. Два параметра (объединённые вектором **r**) регрессии вычисляются алгоритмом метода наименьших квадратов (выделен заливкой в рамке). Отношение этих параметров даёт точку пересечения Z линии регрессии с осью абсцисс.

Рассмотренная процедура с небольшими изменениями (предусмотрен выбор требуемого числа точек и вида регрессионного соотношения – полиномы второго и третьего порядков) использована для получения периодов колебаний процесса (см. рис. 1) в переходном режиме, после вариации нагрузки. На рис. 2, *б* представлены графики изменения периодов выходного сигнала датчика (левый график) и соответствующих значений числа оборотов вала $n(t)$ при набросе нагрузки (справа, в отн. ед.). На правом графике маркерами указаны начальный и установившийся уровни экспериментального процесса изменения числа оборотов вала, которые свидетельствуют о

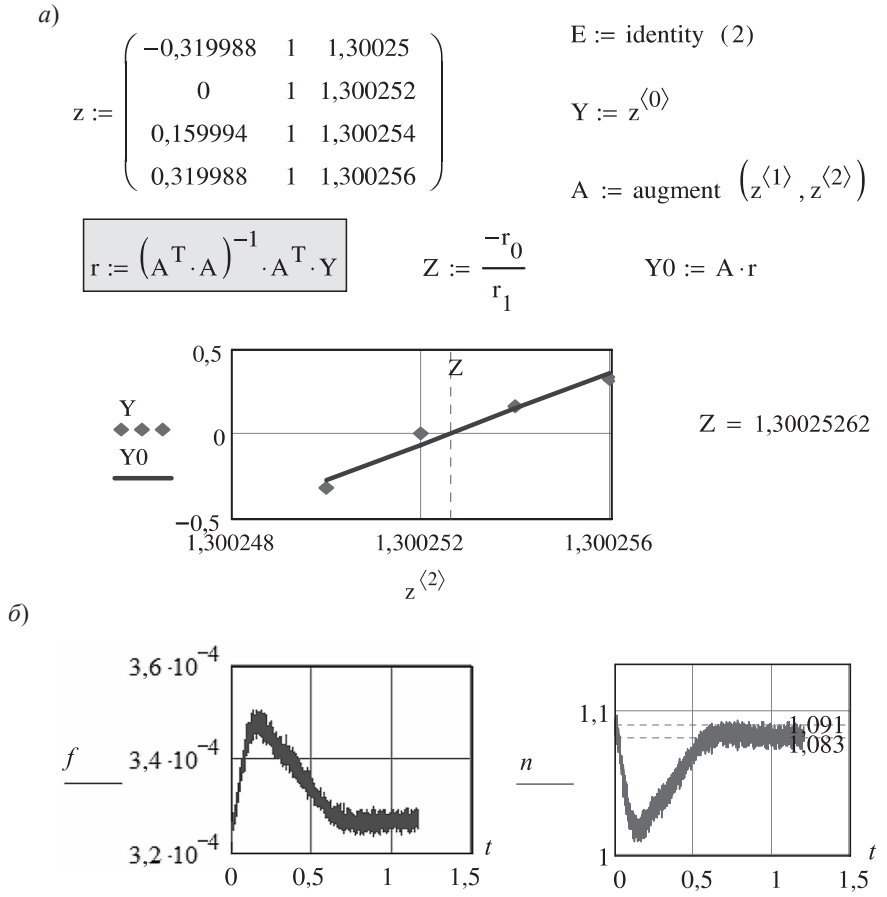


Рис. 2. Пример определения точки Z (*а*) и результаты обработки (*б*)

наличии статизма у системы регулирования используемой в объекте.

Фильтрация процесса *n*(*t*). Наличие помех в процессе (см. рис. 2, *б,* справа) уменьшает достоверность информации. Для снижения уровня помех может быть использовано несколько подходов, среди которых: фильтрация с использованием классических фильтров Баттерворта, Бесселя, Чебышева [3]; фильтрация на основе элементарных фильтров первого и второго порядков; искусственное преобразование (коррекция) спектра.

Синтез классических фильтров характеризуется высокой сложностью из-за большого числа определяемых параметров. Анализ показал, что применительно к рассматриваемым задачам первичной обработки экспериментальных данных влияние помех может быть успешно парировано применением последних двух подходов. При этом синтез фильтров первого и второго порядков может быть проведён в рамках экстремальной задачи, а при коррекции спектра потребуется лишь применение прямого и обратного преобразования Фурье. Кратко прокомментируем эти два подхода с иллюстрацией их качества относительно процесса *n*(*t*).

Из графика процесса *n*(*t*) (см. рис. 2, *б,* справа) следует, что выделяемый полезный сигнал имеет низкочастотный характер; помеха высокочастотная. На рис. 3 приведены результаты прямого (слева) и обратного (справа) Фурье-преобразования исследуемого процесса.

Левый график (спектр процесса) позволяет разделить диапазоны частот полезного сигнала (низкочастотная составляющая процесса) и помех (высокочастотные составляющие). Так, правая граница низкочастотной составляющей $f0 \approx 1$ Гц; левая граница высокочастотных помех $f1 \approx 50$ Гц. Эти границы будут учтены при настройке фильтров и коррекции спектра.

Определение параметров фильтров. Рассмотрим простейшие фильтры первого и второго порядков с передаточными функциями:

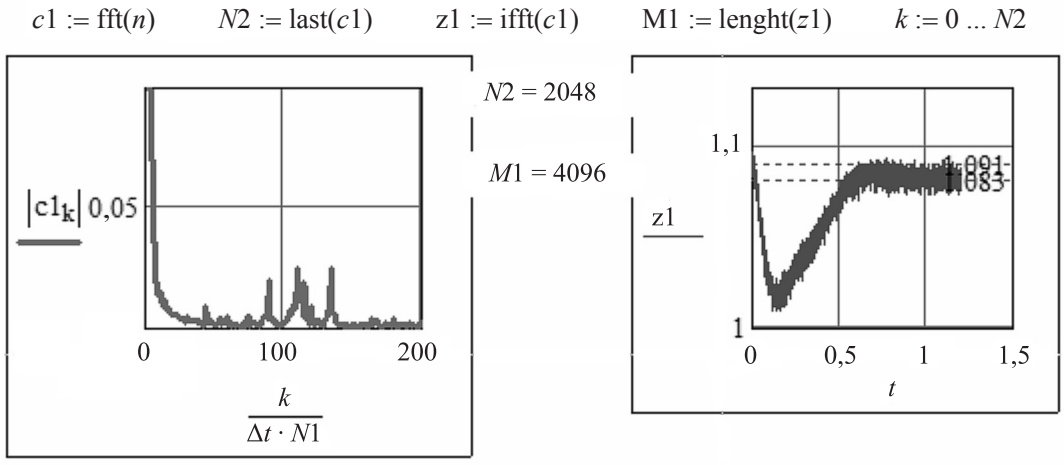


Рис. 3. Спектр процесса $n(t)$ и восстановленный процесс

$$W_1(p) = 1/(Tp + 1);\ W_2(p) = 1/(T^2p^2 + 2T\zeta p + 1). \quad (1)$$

Определение параметров этих фильтров требует решения экстремальной задачи. Опишем один из вариантов такой задачи для рассматриваемого процесса. Для каждого из фильтров (1) могут быть построены амплитудно- и фазочастотные характеристики (АЧХ и ФЧХ), обозначенные ниже $M(r, \omega)$ и $F(r, \omega)$; $r = T$ для $W_1(p)$; $r = \mathbf{r} = |\mathrm{T}\ ,\ \zeta|^T$ для $W_2(p)$. В качестве минимизируемой функции выберем АЧХ на левой границе высокочастотной области спектра, т. е. $M(r, \omega 1)$; $\omega 1 = 2\pi f 1 = 314$.

В низкочастотном диапазоне фильтр практически не должен искажать полезный сигнал по амплитуде и обеспечивать допустимый сдвиг по фазе. Поэтому ограничениями в данной задаче могут служить, например, требования $M(r,\omega 0)>0{,}99; F(r,\omega 0)>-0{,}06$. Здесь $\omega 0=2\pi f 0=6{,}28$. Выбранный порог для ФЧХ соответствует сдвигу фазы – 3,438 град или, для частоты $f0 = 1$ Гц – запаздыванию полезного сигнала на выходе фильтра, равному 0,00956 с, что представляется допустимым.

Следует отметить, что при определении параметров фильтров второго порядка дополнительно к указанным ограничениям полезно добавлять ограничения, сформированные модулями вещественной или мнимой частей полюсов $W_2(p)$: $\lambda_{1,2} = -(T/\zeta) \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}\,/T;\ T > 0,\ 0 < \zeta \le 1$. Так, значение модуля мнимой части $b = \sqrt{1-\zeta^2}\,/T$ может служить приближенной оценкой резонансной частоты этого фильтра [5], значение которой следует сдвигать вправо для обеспечения требования $M(r, \omega 0) \cong 1$.

В этих условиях были найдены параметры фильтров (1) сформированы дифференциальные уравнения и, путём решения задачи Коши, были получены выходные сигналы $s(t)$ фильтров при входном сигнале $n(t)$. Иллюстрации выполненных процедур занимают значительное место, поэтому ниже проводится лишь краткое их описание.

На рис. 4 приведены основные фрагменты xmcd-файлов с решением задач поиска параметров фильтра первого (рис. 4, *а*) и второго (рис. 4, *б*) порядков с применением встроенной фунции *minimize*. Найденные значения параметров: $\mathrm{T} \cong 0{,}00957$ для фильтра с передаточной функцией $W_1(p)$ в (1); $T \cong 0{,}00691$, $\zeta \cong 0{,}691$ для фильтра $W_2(p)$. В нижней части каждого из двух фрагментов (см. рис. 4) приведены значения АЧХ для граничных частот (1 Гц, 50 Гц) и ФЧХ (в градусах) на частоте 1 Гц. Из приведённых данных следует, что фильтр $W_2(p)$, по сравнению с фильтром первого порядка, обеспечивает более сильное подавление помех в высокочастотной области, оставляя при этом процесс в низкочастотном диапазоне ($f \le 1$ Гц) без амплитудных искажений.

Вид АЧХ фильтров (1) с найденными параметрами, подтверждающий отмеченное качество, приведён на рис. 5 (*а*: левый и правый графики относятся к $W_1(p)$ и $W_2(p)$; *б*: результаты моделирования – прохождения исходного процесса $n(t)$ (обозначен на графиках как *n*) через фильтры $W_1(p)$ и $W_2(p)$ (слева и справа соответственно)). Выходные сигналы $s(t)$ каждого фильтра обозначены на графиках как *s* и приведены на фоне исходного процесса $n(t)$. Графики выходов филь-

а)

$T := 0{,}001 \qquad \omega 0 := 6{,}28 \quad \omega 1 := 314 \quad V(T) := M(T, \omega 1)$

Given $\quad T > 0 \qquad F(T, \omega 0) > -0{,}06 \qquad M(T, \omega 0) > 0{,}99$

$T0 := \text{minimize}(V, T) \qquad T0 = 9{,}566 \times 10^{-3}$

$M(T0, \omega 0) = 0{,}998 \quad M(T0, \omega 1) = 0{,}31589 \quad F(T0, \omega 0) = -3{,}438\,\text{deg}$

б)

$r := (0{,}1 \;\; 0{,}7)^{T}$ Given $\qquad V(r) := M(r, 314) \qquad \omega 0 := 6{,}28$

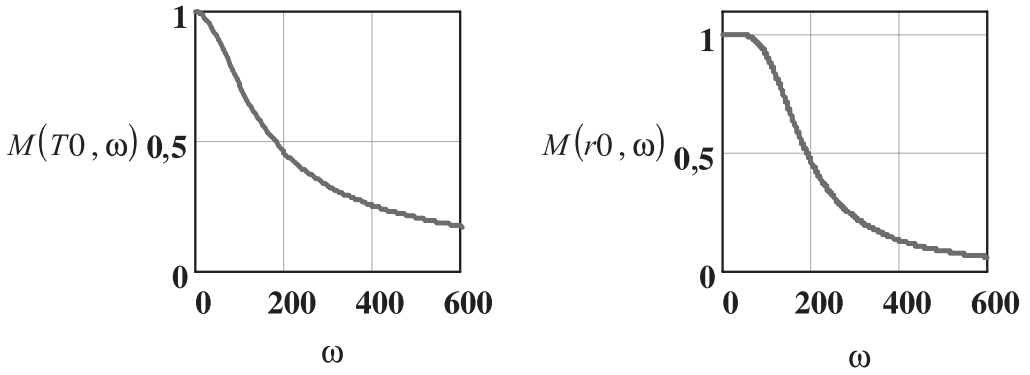
$\frac{r_1}{r_0} > 100 \qquad F(r, \omega 0) > -0{,}06 \qquad r_0 > 0 \qquad r_1 > 1$

$r0 := \text{minimize}(V, r) \qquad r0 = \begin{pmatrix} 0{,}0069092 \\ 0{,}6909242 \end{pmatrix}$

$M(r0, \omega 0) = 1 \qquad M(r0, 314) = 0{,}20976 \qquad F(r0, \omega 0) = -3{,}438\text{deg}$

Рис. 4. Определение параметров фильтров

а)



б)

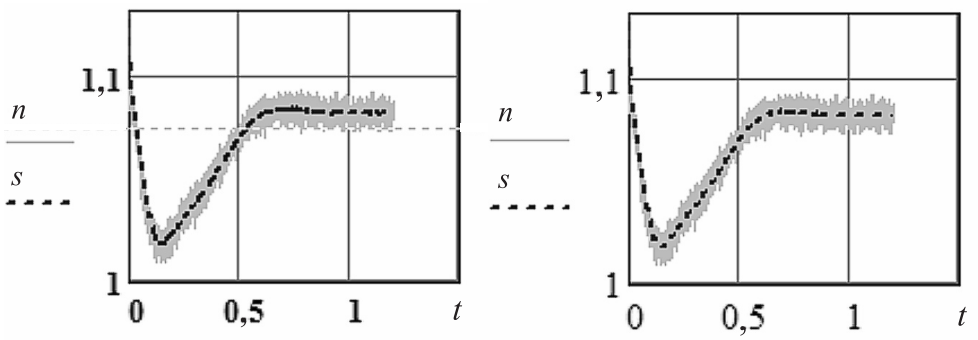


Рис. 5. АЧХ (*а*) и результаты моделирования (*б*) фильтров (1)

$c1 := \text{fft}(n)$ $N2 := \text{last}(c1)$ $m := 45...2048$ $c1_m := 0$

$z1 := \text{ifft}(c1)$ $M1 := \text{length}(z1)$ $k := 0 ... N2$ $N2 = 2048$ $M1 = 4096$

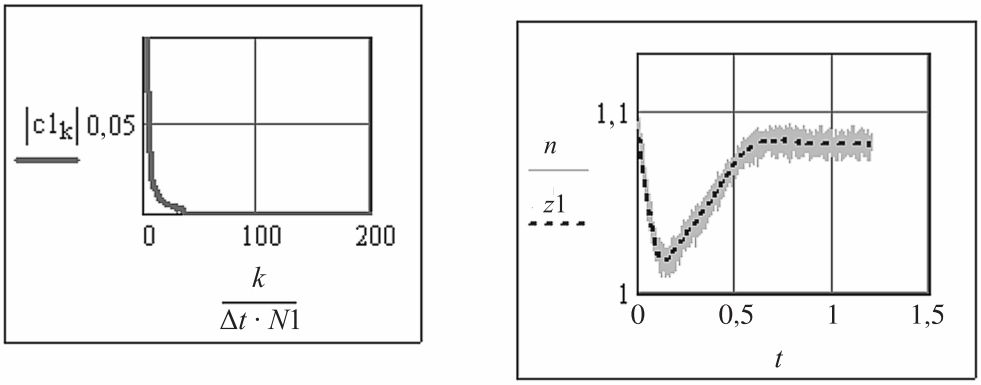


Рис. 6. Коррекция спектра и результат восстановления процесса

тров (сигналы *s*, см. рис. 5, *б*) визуально практически неразличимы. Для сопоставительного анализа вариантов необходимы количественные характеристики, однако при этом нельзя воспользоваться обычными статистическими оценками в виде остаточной суммы квадратов или остаточной дисперсии, поскольку их значения не будут отражать качество фильтрации. Для оценки этого качества можно использовать простой критерий δ_B в виде выборочного среднего для вектора разностей $\delta_j = [n(t_j) - s(t_j)]$, $j = 0, .., 4095$. По результатам вычислений для рассматриваемого примера получено: $\delta_B = -4{,}24 \cdot 10^{-4}$ для фильтра $W_1(p)$; $\delta_B = -4{,}04 \cdot 10^{-4}$ для фильтра $W_2(p)$, что свидетельствует о некотором преимуществе фильтра второго порядка, обеспечивающего фильтрацию сигнала $n(t)$ без амплитудных искажений.

Коррекция спектра. Ещё одна возможность подавления помех при выделении полезного сигнала на этапе первичной обработки связана с искусственным обнулением высокочастотного диапазона спектра, полученного Фурье-преобразованием. Этот способ, строго говоря, нельзя отнести к фильтрации, поскольку он не связан с пропусканием исследуемого процесса через какой-либо физически реализуемый фильтр. Однако он может послужить основой некоторой процедуры обработки, в результате которой из $n(t)$ может быть выделен полезный сигнал.

При обсуждении спектра процесса $n(t)$ (см. рис. 3, слева), была выделена его высокочастотная часть с левой границей $f1 \approx 50$ Гц. Образуем скорректированный спектр рассматриваемого процесса, обнуляя в векторе **c1**, полученном Фурье-преобразованием процесса $n(t)$, элементы, соответствующие частотам $f \geq f1$; после чего для скорректированного таким образом вектора **c1** осуществим обратное Фурье-преобразование, получив в результате процесс без высокочастотных составляющих (вектор **z1**). Рис. 6 представляет копию xmcd-файла с описанной процедурой и содержит результаты такого преобразования.

Скорректированный спектр изображен на рис. 6, слева. Результирующий процесс (вектор **z1**), как и ранее, представлен на фоне исходного процесса $n(t)$. Значение критерия качества, использованного в предыдущих случаях, для этого способа составляет $\delta_B = 0$, что свидетельствует о практическом отсутствии искажений полезного сигнала и позволяет считать этот способ перспективным для решения описанных задач.

Анализ данных экспериментов с системой управления числом оборотов вращения вала дизельгенератора судовой энергетической системы позволил выявить ряд типовых задач первичной обработки, свойственных объектам энергосистем общего назначения, и предложить разработанные и апробированные процедуры предварительной обработки данных. Рассмотренные вопросы, конечно, не исчерпывают множество практических проблем, сопряженных с обработкой экспериментальных данных. Процедуры, которые сопровождают такую обработку, могут иметь достаточно высокую сложность и требовать больших объёмов вычислений, что оправдывает усилия по созданию соответствующего программного обеспечения (ПО) для автоматизации обработки.

На этапе формирования и апробации такого ПО большую помощь оказывают современные системы компьютерной математики, позволяющие сократить время разработки процедур и обеспечить их сопоставительный анализ.

Материал подготовлен при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы», грант № 2.1.2/5534.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ивановский Р.И.** Первичная обработка результатов испытаний энергетических объектов / Сб. избр. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные технологии и ИТ-образование». М.: МГУ, ВМиК, 2009. С. 583–588

2. **Ивановский Р.И.** Компьютерные технологии в науке и образовании. Практика применения систем Mathcad. М.: Высш. шк., 2003. 432 с.

3. **Зюко А.Г. и др.** Теория передачи сигналов: Учеб. для вузов. М.: Радио и связь, 1994. 304 с.

4. **Ивановский Р.И.** Теория вероятностей и математической статистики. Основы, прикладные аспекты с примерами и задачами в среде Mathcad. СПб.: БХВ, 2008. 528 с.

5. URL: http://mas.exponenta.ru/mas/worksheets/Control_Theory/elemUnit/F_mas.xmcd

Ю.В. Новоселов

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ КОГНИТИВНЫХ ОБРАЗОВ

Когнитивные образы (КО), с помощью которых решаются задачи в различных предметных областях, можно разделить на четыре класса: статические, статические анимационные, динамические, динамические анимационные.

Статические КО предусматривают отображение одной и той же информации с помощью статического изображения. Статические анимационные отображают одну и ту же информацию с помощью анимированного изображения. Динамические позволяют сопоставлять различные статические изображения различным наборам значений параметров решаемой задачи, т. е. динамическим параметрам решаемой задачи [1]. Динамические анимационные КО позволяют сопоставлять с различными наборами и значениями параметров решаемой задачи различные анимированные изображения.

В настоящее время не существует общепризнанной формальной модели описания КО [2]. При рассмотрении наиболее распространённых моделей представления знаний, к которым относятся продукционная, фреймовая, логическая, объектная, онтологическая модели, можно сделать вывод, что наиболее ориентированной на формальное описание графических изображений, входящих в состав КО, является онтологическая модель. Данная модель – расширение сетевой модели представления знаний. Важной составляющей онтологической модели является функция интерпретации, которая позволяет задавать правила означивания концептов конкретными понятиями предметной области. Модель обладает необходимой степенью выразительности для того, что бы на её основе базировалось представление формального описания когнитивных образов. Формат описания КО определяется типом одного из концептов онтологии, описывающего предметную область когнитивной графики. Имеется в виду тип концепта – динамический анимационный КО, т. к. типы концептов, описывающих другие разновидности КО, являются частными случаями.

Рассмотрим тип концепта – динамический анимационный КО. На предварительном этапе создания КО необходимо выделить параметры решаемой задачи:

$$O = <P_1, \ldots, P_n, P_{n+1}, \ldots, P_{n+m}, P_{n+m+1}, \ldots, P_Q>, \quad (1)$$

где O – решаемая задача; P_i – параметры решае-

мой задачи; Q – количество параметров решаемой задачи; параметрам P_1, …, P_n соответствуют значения параметров n входных переменных формального описания задачи; параметрам P_{n+1}, …, P_{n+m} – значения параметров m внутренних текущих переменных; параметрам P_{n+m+1}, …, P_Q – значения k выходных переменных [3].

Тип концепта – динамический анимационный КО, определяющий формат формального описания динамического анимационного КО, представлен в следующем виде:

$$CI = < \{X^i\}^{i \in [1, K]} > , \quad (2)$$

где CI – тип концепта – динамический анимационный КО; X^i – тип концепта – слайд (кадр КО), $1 \le i \le K$; K – количество полей типа концепт–слайд (количество кадров, необходимых для отображения динамического анимационного КО).

Каждый концепт–слайд (кадр КО) имеет вид:

$$X^i = < \{X_j^{\,i}\}_{j \in [1, N]}, Sh_0^{\,i}, T_0^{\,i} >, \quad (3)$$

где $X_j^{\,i}$ – тип концепта – характеристика, экземпляр данного типа отвечает за отображение j-го параметра решаемой задачи на i-м кадре, $1 \le j \le N$, $1 \le i \le K$; N – количество полей типа концепт–характеристик (количество характеристик, содержащихся в i-м кадре); $Sh_0^{\,i}$ – тип концепта – шаблон (хранит фрагмент изображения слайда, которому не сопоставлены параметры решаемой задачи); $T_0^{\,i}$ – тип концепта – временной интервал (время визуальной доступности пользователю i-го кадра). Каждая характеристика $X_j^{\,i}$ имеет вид:

$$X_j^{\,i} = < F_j^i(P_j^{i1}, P_j^{i2}, \ldots, P_j^{im}, t_j^i), V_j^i, Sh_j^i, Pos_j^{\,i} >, \quad (4)$$

где $1 \le j \le N$, $1 \le i \le K$, $1 \le im \le Q$; F – прототип функции интерпретации с набором параметров решаемой задачи P_j^{i1}, P_j^{i2}, …, P_j^{im}; функция интерпретации предназначена для задания соответствия параметров решаемой задачи фрагментам графического изображения, результатом работы функции интерпретации является обновлённый фрагмент изображения когнитивного образа; im – количество отображаемых параметров решаемой задачи $1 \le im \le Q$; t_j^i – период времени, в течение которого данный фрагмент визуально доступен лицу, принимающему решения; V_j^i – тип концепта – представление (задаёт набор свойств изображения, которые могут изменяться характеристикой); Sh_j^i – тип концепта – шаблон (хранит фрагмент изображения слайда, которому сопоставлены параметры решаемой задачи); $Pos_j^{\,i}$ – тип концепта – позиция шаблона изображения:

$$Pos_j^{\,i} = <PosX_j^i, PosY_j^i, PosZ_j^i>, \quad (5)$$

где $PosX_j^i$ – тип концепта – позиция по горизонтальной оси; $PosY_j^i$ – тип концепта – позиция по вертикальной оси; $PosZ_j^i$ – тип концепта – позиция по оси глубины, $1 \le j \le N$, $1 \le i \le K$.

Поскольку существуют различные варианты отображения изменения значений параметров решаемой задачи, то тип концепта–представления V_j^i определяется следующим образом:

$$V_j^i = \{L_j^i, Cs_j^i, Ts_j^i, Tp_j^i\}, \text{ где } 1 \le j \le N, 1 \le i \le K \quad (6)$$

L_j^i – тип концепта – дефрагментация, экземпляр концепта – дефрагментация описывает представление характеристики в виде совокупности из R характеристик путём разбиения шаблона изображения характеристики на R подфрагментов:

$$L_j^i = < \{X_{j,r}^{\,i}\}_{r \in [1, R]} >, \quad (7)$$

где R – количество подфрагментов, на которые разбивается шаблон изображения рассматриваемой характеристики.

Cs_j^i – тип концепта – цвет фрагмента изображения имеет три составляющие цвета: красный, зеленый, синий и определяется следующей тройкой:

$$Cs_j^i = < R_j^i, G_j^i, B_j^i >, \quad (8)$$

где $0 \le R_j^i \le 255$ – тип концепта – красная составляющая цвета фрагмента КО; $0 \le G_j^i \le 255$ – тип концепта – зелёная составляющая цвета фрагмента КО; $0 \le B_j^i \le 255$ – тип концепта – синяя составляющая цвета фрагмента КО, $1 \le j \le N$, $1 \le i \le K$.

Ts_j^i – тип концепта – изменение формы фрагмента изображения. Данный параметр определяется следующим образом:

$$Ts_j^i = < Tsx_j^i, Tsy_j^i, Tsz_j^i >, \quad (9)$$

где $-100 \le Tsx_j^i \le 100$ – тип концепта – процентное соотношение сжатия или растяжения образа по горизонтальной оси; $-100 \le Tsy_j^i \le 100$ – тип концепта – процентное соотношение сжатия или растяжения образа по вертикальной оси; $-100 \le Tsz_j^i \le 100$ – тип концепта – процентное соотношение сжатия или растяжения образа по оси глубины, $1 \le j \le N$, $1 \le i \le K$.

Tp_j^i – тип концепта – изменение местоположения фрагмента изображения. Параметр имеет вид:

$$Tp_j^i = < Tpx_j^i, Tpy_j^i, Tpz_j^i >, \quad (10)$$

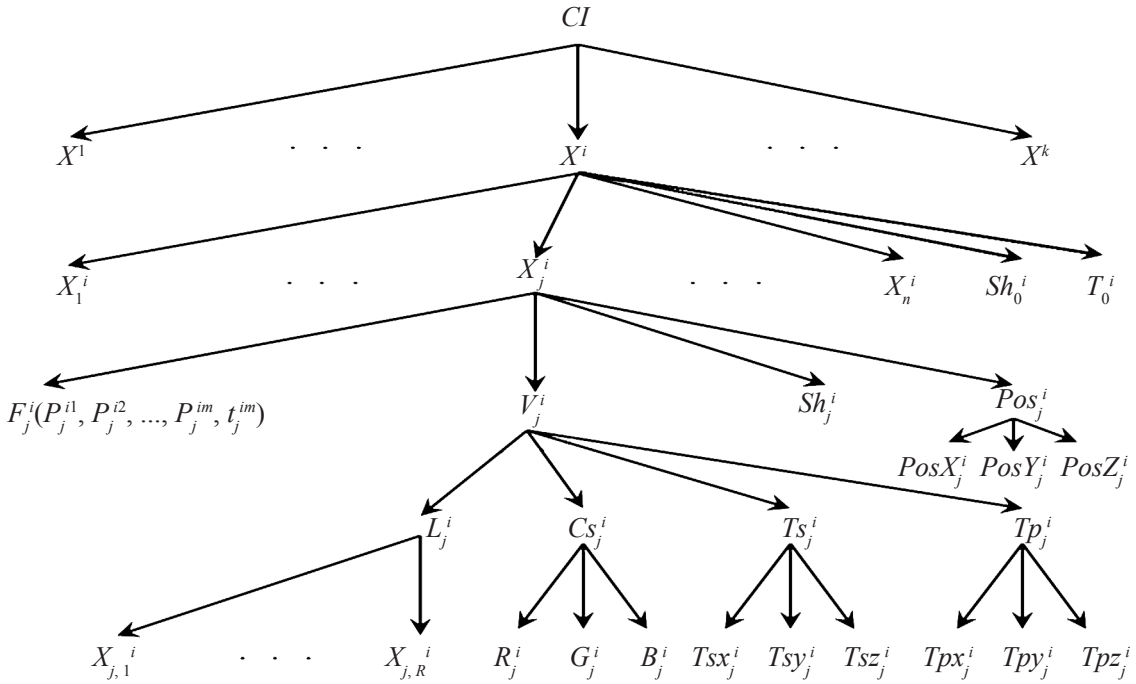


Рис.1. Графическое представление типа концепта – динамический анимационный когнитивный образ

где Tpx_j^i – тип концепта – смещение фрагмента КО по горизонтальной оси; Tpy_j^i – тип концепта – смещение фрагмента КО по вертикальной оси; Tpz_j^i – тип концепта – смещение фрагмента КО по оси глубины, $1 \le j \le N$, $1 \le i \le K$.

Рассмотренный выше тип концепта – динамический анимационный КО представлен в графическом виде на рис. 1.

Формальное описание КО в предложенном формате позволит упростить процесс интеграции созданного независимыми разработчиками КО в любой программный продукт независимо от среды его разработки.

Необходимо отметить, что в процессе разработки КО немаловажную роль играет инструментальная среда, использующаяся для создания когнитивных изображений [4]. Такое программное средство должно регламентировать процесс разработки графического изображения и его контекстного описания в соответствии с выбранным форматом формального описания КО. С точки зрения разработки КО и его формального описания в вышерассмотренном формате наиболее подходящей является компьютерная программная среда Cognitive Developer Studio, позволяющая разрабатывать динамические анимационные КО и создавать их формальное описание. Динамика КО формируется с помощью последовательности кадров. Статический КО определяется одним кадром. Каждый кадр визуально доступен лицу, принимающему решения, в течение определённого временного интервала.

Кадр состоит из набора контролируемых характеристик и базисного шаблона. Шаблон предназначен для построения фоновой части изображения, т. е. фрагментов КО, не предназначенных для отображения параметров решаемой задачи. Каждая контролируемая характеристика из набора контролируемых характеристик позволяет произвести описание соответствия между параметрами решаемой задачи и фрагментом КО, который предназначен для графического представления значений данных параметров. Среда предоставляет возможность видоизменения фрагментов когнитивного изображения, если того требуют принципы решаемой задачи. Например, фрагмент изображения может видоизменяться при изменении значений параметров решаемой задачи для отображения которых он предназначен. Видоизменение фрагментов изображения может происходить несколькими способами: с помощью изменения цвета, формы, местоположения или разбиения рассматриваемого фрагмента на более мелкие. Возможность дефрагментации фрагментов КО позволяет работать с когнитивным изображением на разных слоях детализации. Изменение фрагмента изображения описывается

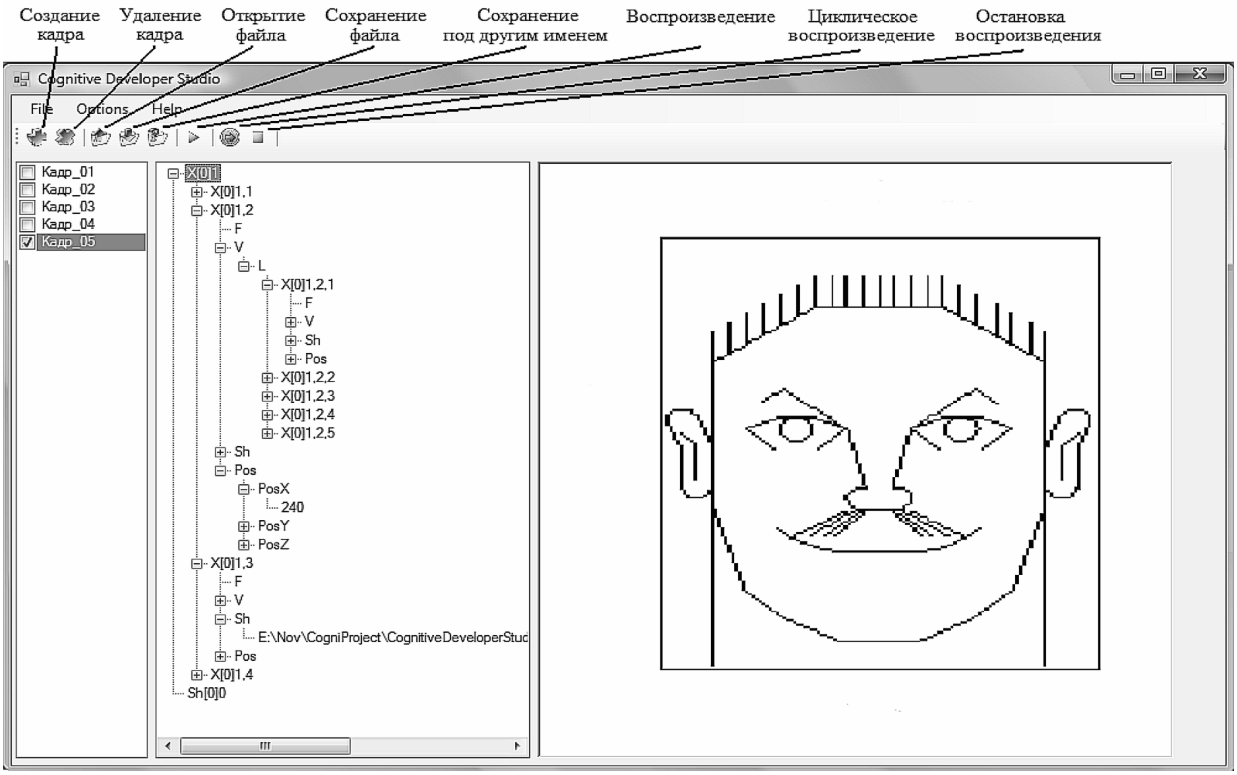


Рис. 2. Интерфейс среды разработки когнитивных образов

функцией интерпретации, которая входит в состав каждой контролируемой характеристики. Исходные тексты функции интерпретации создаются инженером по программному обеспечению на языке C++. С этой целью может быть использован встроенный в компьютерную программную среду редактор исходного кода. Также пользователь может использовать любую внешнюю среду разработки программ на C++.

Таким образом, формируется каждый кадр КО. После создания КО с ним можно продолжать работу в пользовательском режиме, позволяющем тестировать КО в том виде, в котором он будет использоваться практически. Формальное описание КО в вышеприведённом формате сохраняется в виде xml-файла, что позволяет обеспечить интеграцию созданного КО с программными продуктами, независимо от того в какой программной среде они разрабатываются. На рис. 2 представлен интерфейс компьютерной программной среды Cognitive Developer Studio. В левой части интерфейса расположен список активных кадров, совокупность которых образует КО. Пользователь может исключить кадр из состава когнитивного образа, сняв галочку около его названия.

В центральной части интерфейса инструментальной среды располагается древовидное представление формального описания активного кадра КО. Добавляя и удаляя узлы данной древовидной структуры, пользователь может изменять количество контролируемых характеристик, входящих в состав активного кадра, а также создавать отдельную функцию интерпретации для каждой контролируемой характеристики. В правой части интерфейса располагается планшет, предназначенный для создания и отображения графического изображения входящего в состав КО.

Таким образом, в статье изложены проблемы формального описания когнитивных образов на основе онтологического подхода представления знаний и рассмотрена программная компьютерная среда построения когнитивных образов, позволяющей сохранять разработанные в ней образы в формате предложенной модели.

Программа дальнейших исследований будет включать в себя создание когнитивных образов с помощью разработанного инструментария для решения конкретных практических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Поспелов Д.А.** Когнитивная графика – окно в новый мир // Программные продукты и системы. 1992. № 2. С. 4–6.

2. **Зенкин А.А.** Когнитивная компьютерная графика: некоторые вопросы методологии применения в интеллектуальных системах // В сб. науч. тр. Национал. конф. с Междунар. участием «Искусственный интеллект-94» (КИИ-94). Рыбинск, 1994. С. 100–105.

3. **Новоселов Ю.В.** Формальная модель представления когнитивного образа для системы поддержки принятия решений в задаче диагностики объекта / Вестник МЭИ. Изд-во МЭИ, 2009. С. 183–187.

4. **Новоселов Ю.В.** Когнитивная графика в системах поддержки принятия решений по анализу расхода тепловой энергии: Ученые записки. Изд-во РГСУ, 2007. Т.1. С. 101–108.

УДК 656.7

А.Д. Припадчев

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ СИМПЛЕКС–МЕТОДА

Авиапредприятия нуждаются в современных воздушных судах (ВС). Устаревший парк и изменение требований к лётно-техническим характеристикам являются основанием для использования методов системного анализа и исследования операций [3].

Задача заключается в том, чтобы определить потребное количество ВС, обеспечивающих выполнение объёмов пассажирских перевозок в установленные сроки, а также определить экономически выгодное ВС для каждого маршрута. Решение этой задачи даёт ответ на следующие вопросы:

какой тип ВС экономически эффективен на конкретном маршруте в процессе пассажирских перевозок (под процессом пассажирских перевозок понимается транспортировка пассажиров, выполняемая авиапредприятием на ВС за установленную плату в соответствии с условиями договора);

какое количество ВС необходимо иметь для выполнения перевозки пассажиров на конкретном маршруте.

Сущность и особенность предлагаемого метода оптимизации на основе критерия производственных расходов ВС в следующем.

Задача заключается в определении потребного парка ВС при перевозке из определённого пункта A пассажиров по n маршрутам. Целевой функцией является общая сумма расходов на все рейсы для всех маршрутов при сохранении (увеличении) показателя дохода. При выполнении системы ограничений–равенств, получаем задачу линейного программирования, которую решаем симплекс-методом [4]. Методы решения задач линейного программирования хорошо развиты и известны. Но наряду с простотой данных методов, они имеют существенные недостатки: не гарантируют устойчивости получаемых решений (неустойчивое решение не пригодно для практического использования) и не позволяют решать задачи большой размерности.

Переменными являются n – количество маршрутов и m – тип ВС. Ограничениями выступает система ограничений–равенств для всех маршрутов.

Процесс решения задачи линейного программирования симплекс–методом носит итерационный характер, т. е. однотипные вычислительные процедуры в определённой последовательности повторяются до тех пор, пока не будет получено оптимальное решение.

Для решения задачи линейного программирования математическая модель структуры парка ВС представлена в стандартной форме линейных оптимизационных моделей. При этом:

все ограничения записываются в виде равенства с неотрицательной правой частью;

значения всех переменных модели неотрицательны;

целевая функция подлежит минимизации.

В процессе построения математической модели для решения данной задачи необходимо чётко представлять:

для определения каких величин должна быть построена математическая модель;

какие ограничения должны быть наложены на переменные, чтобы выполнялись условия, характерные для моделирующего процесса пассажирских перевозок;

в чём состоит цель, для достижения которой из всех допустимых значений переменных необходимо выбрать те, которые соответствуют оптимальному решению задачи.

Трудность построения математической модели заключается в идентификации переменных и последующем представлении цели и ограничений в виде математических функций этих переменных. В рассматриваемом случае мы имеем следующее.

Маршруты обслуживают типы ВС 1, 2, …, m, где m – тип ВС. Известно количество авиапассажиров, которых необходимо перевести по каждому маршруту за определённый промежуток времени – за неделю, за месяц и т. д. Это количество перевозимых авиапассажиров обозначим как: b_1 – количество перевозимых авиапассажиров по первому маршруту; b_2 – по второму маршруту; b_n – количество перевозимых авиапассажиров по n-му маршруту.

Количество рейсов, совершаемых на первом маршруте ВС первого типа, обозначим $X_{1,1}$. Количество рейсов, совершаемых на втором маршруте ВС первого типа, обозначим $X_{1,2}$. Соответственно, количество рейсов, совершаемых на i-м маршруте ВС j-го типа, обозначим $X_{i,j}$, где $i = 1, 2, \ldots, n$; $j = 1, 2, \ldots, m$.

Количество пассажиров, перевозимых за один рейс на i-м маршруте ВС j-го типа, обозначим $a_{i,j}$, где $i = 1, 2, \ldots, n$; $j = 1, 2, \ldots, m$.

Расходы на один рейс на i-м маршруте ВС j-го типа обозначим $c_{i,j}$, где $i = 1, 2, \ldots, n$; $j = 1, 2, \ldots, m$.

Каждый маршрут обслуживают ВС всех типов, имеющихся на авиапредприятии 1, 2, …, m. Тогда для первого маршрута количество перевозимых пассажиров вычисляем по формуле:

$$b_1 = a_{1,1}X_{1,1} + a_{1,2}X_{1,2} + a_{1,m}X_{1,m}. \quad (1)$$

Для второго маршрута:

$$b_2 = a_{2,1}X_{2,1} + a_{2,2}X_{2,2} + a_{2,m}X_{2,m}. \quad (2)$$

Окончательно для всех маршрутов составляем систему ограничений–равенств:

$$\begin{cases} b_1 = a_{1,1}X_{1,1} + a_{1,2}X_{1,2} + \ldots + a_{1,m}X_{1,m} \\ b_2 = a_{2,1}X_{2,1} + a_{2,2}X_{2,2} + \ldots + a_{2,m}X_{2,m} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ b_n = a_{n,1}X_{n,1} + a_{n,2}X_{n,2} + \ldots + a_{n,m}X_{n,m} \end{cases}, \quad (3)$$

где $a_{i,j}$ – известные величины, $i = \overline{1,n}$, $i = \overline{1,m}$; b_i – известные величины, $i = \overline{1,n}$; $X_{i,j}$ – неизвестные величины, $i = \overline{1,n}$, $i = \overline{1,m}$.

Общую сумму расходов на все рейсы всех маршрутов вычисляем:

$$z = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}X_{ij} \to \min. \quad (4)$$

Если необходимо минимизировать общую сумму расходов по формуле (4) при выполнении системы ограничений–равенств (3), то получаем задачу линейного программирования, т. е. этим методом находят $X_{i,j}$, где $i = \overline{1,n}$; $i = \overline{1,m}$.

После определения $X_{i,j}$, при $i = \overline{1,n}$, $i = \overline{1,m}$, зная расстояние и скорость, определяем потребный парк ВС для узла перевозок A.

Если к системе ограничений–равенств добавить систему ограничений–равенств (неравенств) по количеству рейсов ВС каждого типа, в результате получим общее количество рейсов (K) на всех маршрутах ВС первого типа:

$$K_1 = \sum_{i=1}^{n} X_{i1}. \quad (5)$$

Общее количество рейсов на всех маршрутах ВС второго типа:

$$K_2 = \sum_{i=1}^{n} X_{i2}. \quad (6)$$

Окончательно систему ограничений равенств по общему количеству рейсов на всех маршрутах для каждого типа ВС:

$$K_j = \sum_{i=1}^{n} X_{ij}. \quad (7)$$

Добавляя к системе ограничений (1) систему ограничений (7), можно минимизировать общую сумму расходов (4). В результате опять получаем задачу линейного программирования, которую решаем симплекс-методом. Для решения необходимо задать b_i, a_{ij}, c_{ij}, K_j, $i = \overline{1,n}$, $i = \overline{1,m}$.

В связи с тем, что модель содержит только две переменные, задачу можно решить графически. Использование графического метода заключается в геометрическом представлении допустимых решений, т. е. построении области (допустимых) решений, в которой одновременно удовлетворяются все ограничения модели. В каждой точке, принадлежащей внутренней области, все ограничения выполняются, поэтому решения, соответствующие этим точкам, являются допустимыми. Пространство решений содержит бесконечное число таких точек, но, несмотря на это, можно найти потребное решение.

Потребное количество ВС в парке авиапредприятия определяем из условия что пассажирские перевозки осуществлены в полном объёме и в установленные сроки. Количество ВС ($n_{\text{потр}}$) для авиапредприятия вычисляем по формуле:

$$n_{\text{потр}} = Q/A, \quad (8)$$

где Q – количество перевезенных пассажиров в месяц; A – производительность ВС.

Предлагаемый подход позволяет определить потребный парк ВС как по отдельным авиапредприятиям, по федеральным округам, так и по стране в целом. Приведём пример расчёта потребной структуры парка ВС для авиапредприятия ФГУП «Оренбургские авиалинии».

С учётом введённых выше обозначений количества рейсов в месяц для рассматриваемых типов ВС на всех маршрутах и с учётом цен одного рейса для каждого типа ВС на рассматриваемых маршрутах, целевая функция суммарных расходов на все рейсы для всех маршрутов ФГУП «Оренбургские авиалинии» предлагается в виде:

$$\begin{aligned} z = {} & 236{,}2X_1 + 335X_2 + 407{,}3X_3 + 101{,}2X_4 + \\ & + 265{,}3X_5 + 145X_6 + 78{,}8X_7 + 50X_8 + 113X_9 + \\ & + 175{,}5X_{10} + 110{,}5X_{11} + 251X_{12} + 67{,}5X_{13} + \\ & + 42{,}5X_{14} + 96{,}5X_{15} + 50{,}6X_{16} + 32X_{17} + \\ & + 87{,}3X_{18} + 50{,}6X_{19} + 32X_{20} + 43{,}6X_{21}. \end{aligned} \quad (9)$$

В целевой функции (9) коэффициенты при неизвестных есть цены определённого типа воздушного судна на определённом маршруте.

Значение цен в целевой функции уменьшены в 10^5 раз для реализации более точных расчётов. Соответственно для определения реального значения целевой функции её расчётное значение необходимо умножить на 10^5.

Для целевой функции (9) система ограничений–равенств в соответствии с уравнениями (3) представлена в виде:

$$\begin{cases} 240X_1 + 152X_2 + 340X_3 = 61488 \\ 240X_4 + 152X_5 + 340X_6 = 11712 \\ 240X_7 + 152X_8 + 340X_9 = 5856 \\ 240X_{10} + 152X_{11} + 340X_{12} = 5856 \\ 240X_{13} + 152X_{14} + 340X_{15} = 2928 \\ 240X_{16} + 152X_{17} + 340X_{18} = 11712 \\ 240X_{19} + 152X_{20} + 340X_{21} = 8784 \end{cases}. \quad (10)$$

При системе ограничений–равенств (10) и целевой функции (9) – суммарные расходы по всем маршрутам, необходимо найти такие значения неизвестных $X_1, X_2, \ldots, X_{21}$, при которых значение целевой функции (9) будет минимальным. Это задача линейного программирования, которую, как говорилось выше, решаем симплекс-методом. Минимальное значение целевой функции (в руб.) равно:

$$\min(z) = 76043{,}7 \cdot 10^5. \quad (11)$$

На основании полученных результатов расчёта можно сделать вывод:

1) на трёх маршрутах, а именно: Оренбург–Москва–Оренбург, Оренбург–Санкт-Петербург–Оренбург и Оренбург–Сочи–Оренбург, экономически эффективно использовать ВС типа Boeing 737;

2) на трёх маршрутах, а именно: Оренбург–Анапа–Оренбург, Оренбург–Душанбе–Оренбург и Оренбург–Дюссельдорф–Оренбург, экономически эффективно использовать ВС типа Ту–134. Но в связи с тем, что на ВС этого типа установлена устаревшая авионика, в города Евросоюза осуществляет полёт ВС типа Boeing 737;

3) на маршруте Оренбург–Худжанд–Оренбург экономически эффективно использовать ВС типа Ту–154.

Потребное количество ВС в парке авиапредприятия определяем из условия что пассажирские перевозки осуществлены в полном объёме и в установленные сроки. Количество ВС для авиапредприятия ФГУП «Оренбургские авиалинии» на маршруте Оренбург–Москва–Оренбург вычисляем по формуле (8). Аналогичный расчёт повторяем для каждого типа ВС на маршруте, что позволяет сформировать потребный парк ВС, составляющий его структуру. После определения оптимального ВС на маршруте необходимо определить их количество. Полученные результаты по оптимальному ВС на маршруте и их количество для авиапредприятия ФГУП «Оренбургские авиалинии» представлено в таблице.

Всё вышеизложенное позволяет выделить следующие отличительные особенности рассмотренного подхода, реализация которого предоставляет новые возможности при решении задач по управлению парком ВС авиапредприятий.

1) Информация, получаемая с помощью симплекс-метода, не ограничивается только значениями переменных. Это означает, что метод даёт экономическую интерпретацию полученного решения.

2) В результате решения уравнения (4) с системой ограничений (3) и (7) при помощи программного средства [1, 2] выбираем наилучший тип ВС из имеющегося парка ВС авиапредприятия на конкретном маршруте.

3) Парк ВС должен состоять из типов с часовым расходом топлива от 2,2 до 3,0 т/ч при средней вместимости 140 пассажиров.

Оптимизация структуры парка ВС для авиапредприятия ФГУП «Оренбургские авиалинии»

Маршрут	Тип ВС			Оптимальное количество ВС
	Б737	Ту–134	Ту–154	
Оренбург–Москва–Оренбург	+	-	-	2,4
Оренбург–Санкт-Петербург–Оренбург	+	-	-	0,7
Оренбург–Сочи–Оренбург	+	-	-	0,5
Оренбург–Анапа–Оренбург	-	+	-	0,7
Оренбург–Дюссельдорф–Оренбург	-	+	-	0,3
Оренбург–Душанбе–Оренбург	-	+	-	1,6
Оренбург–Худжанд–Оренбург	-	-	+	0,5
Итого	3,6 (4)	2,6 (3)	0,5 (1)	6,7 (8)

4) Математическое моделирование структуры парка ВС можно осуществить с помощью программного средства для ЭВМ как по отдельным авиапредприятиям, так и по федеральным округам.

Работа выполнена при поддержке госконтракта № П295 от 24.07.2009 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Припадчев А.Д., Султанов Н.З., Чеховский А.В.** Программа для оптимизации парка воздушных судов. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2010611242. Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 12. 02. 2010 / М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2010. 1 с.

2. **Припадчев А.Д., Султанов Н.З.** Оптимизация парка воздушных судов авиапредприятий: Научно-метод. рекоменд. Оренбург: ОГУ, 2010. 65 с.

3. Федеральная целевая программа «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002–2012 годы и на период до 2015 года» / СПС «Консультант +».

4. **Хэмди А. Таха.** Введение в исследование операций / Таха А. Хэмди. М.; СПб.; Киев: Изд. дом «Вильямс», 2001. 256 с.

УДК 519.217

Б.В. Корнейчук, Т.Г. Максимова

СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МАРКОВСКОГО ТИПА

Статья посвящена проблемам моделирования стохастических социальных процессов марковского типа. Актуальность темы обусловлена рядом обстоятельств. Во-первых, современные работы по моделированию стохастических социальных процессов до сих пор слабо учитывают динамичную сущность рыночной экономики, в которой фактор случайности играет существенно более важную роль по сравнению с директивной экономикой. Во-вторых, разные авторы стохастических моделей однотипных социальных процессов обычно используют различный математический аппарат, что препятствует формированию единого методологического подхода к исследованию соответствующего класса схожих явлений. В-третьих, существующие стохастические модели социальных процессов обычно оперируют некоторыми абстрактными переменными, которые не могут быть рассчитаны с необходимой степенью надёжности, что снижает практическую ценность создаваемых моделей. В-четвёртых, в условиях динамичных изменений социально-

экономической обстановки усиливается потребность в разработке научно-обоснованных долгосрочных прогнозов, что требует создания надёжных и в то же время инструментальных стохастических моделей, применимых на практике. В-пятых, многие значимые социальные процессы марковского типа (например, движение экономического населения и карьерный рост) до сих пор не были описаны стохастическими моделями и не исследованы на основе анализа фактических данных официальной статистики.

В статье рассмотрен комплекс стохастических моделей, которые описывают разнообразные массовые события в обществе: миграцию, безработицу, рождаемость и смертность, карьерный рост, выживание онкологических больных. В отличие от ранее публиковавшихся работ по моделированию данных явлений, предложенные модели используют единый математический аппарат и основаны на ряде общих допущений. Во-первых, члены общества разделены на несколько социальных групп, численность которых изменяется под воздействием массовых событий. Во-вторых, известны вероятности перехода из одной группы в другую в течение фиксированного периода времени, причём они достаточно стабильны во времени. В-третьих, вероятность перехода общества из одного состояния в другое не зависит от того, каким образом общество оказалось в исходном состоянии. В-четвёртых, вероятности перехода могут быть рассчитаны на основе статистических данных, которые доступны и постоянно обновляются, т. е. возможен мониторинг массовых событий в социуме.

Определим базовые понятия. Под состоянием социума (X) мы понимаем вектор, элементами которого служат численности социальных групп, а под структурой социума (Y) – вектор, элементами которого служат удельные веса численности социальных групп в общей численности социума. Начальное состояние мы обозначаем через X_0, прогнозируемое состояние через k периодов времени – через X_k, а прогнозируемое состояние в долгосрочном периоде – через X_∞. Под переходной матрицей (A) мы понимаем матрицу, элемент которой a_{ij} равен вероятности перехода представителя i-й группы в j-ю группу в течение единичного периода времени ($i, j = 1, 2, ..., n$, где n – количество социальных групп). Переходной матрицей k-го порядка мы называем соответствующую степень переходной матрицы (A^k), её элемент $a_{ij}^{(k)}$ равен вероятности перехода представителя i-й группы в j-ю группу через k периодов времени. Если k-я степень переходной матрицы имеет предел, причём все её элементы не больше единицы, то её мы называем предельной переходной матрицей и обозначаем через A^∞. Основное соотношение, связывающее текущее состояние социума с переходной матрицей, имеет вид:

$$X_k = X_0 \times A^k. \quad (1)$$

Если существует A^∞, то выполняется также соотношение:

$$X_\infty = X_0 \times A^\infty. \quad (2)$$

Для оценки степени мобильности социальных процессов мы используем показатели α и β. Первый из них используется в системах без иерархии, а второй учитывает иерархию социальных групп:

$$\alpha = 1 - \sum y_i^\infty a_{ii}, \quad (3)$$

$$\beta = 1/(n-1) \times \sum y_i^\infty \sum a_{ij}|i-j|. \quad (4)$$

Основные результаты исследования заключаются в разработке и анализе пяти стохастических моделей. Опишем их.

1. Модель межрегиональной миграции. Исследуется динамика распределения населения России по федеральным округам, причём состояние социума описывается численностью населения округов, а значение a_{ij} равно вероятности переезда жителя i-го округа в j-й округ в течение года. Смертность здесь не учитывается, поэтому сумма элементов каждой строки переходной матрицы равна единице. Отсюда следует, что всегда существует A^∞, причём сумма элементов каждой её строки равна единице. В силу того, что здесь рождаемость и смертность не учитываются, прогноз численности населения не является достоверным, а поэтому следует составлять прогноз структуры численности населения. Основу расчётов составляют соотношения:

$$Y_k = Y_0 \times A^k, \quad (5)$$

$$Y_\infty = Y_0 \times A^\infty, \quad (6)$$

где Y_0 – начальная структура распределения населения по округам; Y_k – она же через k лет; Y_∞ – она же в долгосрочной перспективе. В табл.1 представлены переходная матрица и начальная структура распределения населения по округам.

Формула (5) позволяет прогнозировать структуру распределения численности населения по округам. Так, Y_{2022} = (27,0; 9,6; 16,0; 21,0; 8,6; 13,4; 4,3), Y_{2057} = (28,8; 9,8; 16,0; 20,3; 8,5; 12,7; 3,4), где

Таблица 1

Переходная матрица межрегиональной миграции и численность населения регионов России в 2007 г.*

Федеральный округ	Центральный	Северо-Западный	Южный	Приволжский	Уральский	Сибирский	Дальне-восточный
Центральный	99,829	0,0415	0,0485	0,0379	0,0161	0,0159	0,0108
Северо-Западный	0,1766	99,647	0,0634	0,0612	0,0193	0,0205	0,0122
Южный	0,1467	0,0457	99,668	0,0446	0,0527	0,0261	0,0166
Приволжский	0,1263	0,0396	0,0477	99,665	0,0905	0,0197	0,0114
Уральский	0,1171	0,0409	0,1086	0,1851	99,443	0,0629	0,0123
Сибирский	0,1036	0,0378	0,0711	0,0443	0,0624	99,638	0,0424
Дальневосточный	0,2247	0,0766	0,1301	0,0826	0,0399	0,1578	99,288
НАСЕЛЕНИЕ, %	26,169	9,527	16,015	21,337	8,600	13,774	4,577

удельные веса выражены в процентах. Было установлено, что все строки матрицы A^{∞} одинаковы, а долгосрочная структура распределения населения по округам совпадает с данной строкой: Y_{∞} = (44,1; 10,8; 15,3; 14,2; 6,7; 6,9; 2,0). Таким образом, долгосрочная структура не зависит от начальной структуры.

Определим миграционную привлекательность федерального округа как удельный вес численности населения округа в общей численности населения страны в долгосрочной перспективе. Под *k*-м приближенным значением этого показателя мы понимаем среднее значение элементов столбца переходной матрицы, соответствующего данному округу:

$$f_j^k = \sum a_{ij}^{(k)}/n \to y_i = f_j \text{ при } k \to \infty,$$

где f_j^k – *k*-е приближение показателя миграционной привлекательности *j*-го округа, f_j – его миграционная привлекательность, *n* – число округов.

Модель позволяет определить относительную роль двух основных факторов миграционной привлекательности региона: уровня заработной платы и условий жизни (совокупности нематериальных факторов привлекательности). Оценка условий жизни была рассчитана как разность ранга привлекательности региона и ранга заработной платы. Для показателей «привлекательность» и «зарплата» коэффициент ранговой корреляции оказался отрицательным (– 0,18), а для показателей «привлекательность» и «условия жизни» – положительным (+ 0,84). Таким образом, важнейшим фактором миграционной привлекательности служат условия жизни, а заработная плата не играет существенной роли. Из (3) следует β = 0,072, т. е. степень межрегиональной миграции является весьма низкой.

2. Модель движения экономически активного населения (модель безработицы). Рассматриваются четыре группы экономически активного населения: занятые в экономике, безработные с непрерывным стажем безработицы до 6 мес., безработные со стажем 6-12 мес. и безработные со стажем свыше 12 мес. Состояние социума здесь описывается численностью этих групп, а значение a_{ij} равно вероятности для представителя *i*-й группы перейти в *j*-ю группу в течение 6 мес. В данной модели состав экономически активного населения полагается неизменным (не учитывается обмен с экономически неактивным населением и смертность), а поэтому сумма элементов каждой строки переходной матрицы равна единице (табл. 2). Её ненулевыми элементами являются элементы первого столбца (вероятность трудоустройства), элементы над главной диагональю (вероятность перейти в следующую группу) и последний элемент последней строки (вероятность остаться в «наихудшей» группе безработных).

Процесс движения экономически активного населения назовём *стационарным*, если с течением времени структура не изменяется. Обозначим неизменную структуру экономически активного населения через *Y*, тогда согласно формуле (5) условие стационарности имеет вид:

$$Y = Y \times A. \qquad (7)$$

Данное соотношение мы трактуем как систему уравнений относительно a_{ij} при заданном векторе *Y*, который определяется на основе статистических данных. Система имеет бесконечно

* Вероятности переходов выражены в процентах. *Источник*: Российский статистический ежегодник. М.: Росстат, 2008. С. 84, 125.

Таблица 2

Переходная матрица стационарного процесса движения экономически активного населения*

Группа	Переходная матрица A, общий вид				Переходная матрица, Россия, 2006 г.			
Занятые	$1-a_{12}$	a_{12}	0	0	0,971	0,029	0,000	0,000
Безработные, до 6 мес.	$1-a_{23}$	0	a_{23}	0	0,507	0,000	0,493	0,000
Безработные, 6-12 мес.	$1-a_{34}$	0	0	a_{34}	0,420	0,000	0,000	0,580
Безработные, свыше 12 мес.	$1-a_{44}$	0	0	a_{44}	0,285	0,000	0,000	0,715

много решений, она сводится к трём линейно независимым уравнениям:

$$a_{12} = y_2/y_1, \quad (8)$$

$$a_{23} = y_3/y_2, \quad (9)$$

$$a_{34} = (y_4/y_3) \times a_{41}. \quad (10)$$

Отсюда следует ряд выводов. Во-первых, при заданной структуре экономически активного населения имеется бесконечное множество стационарных процессов. Во-вторых, переходная матрица зависит от стационарной структуры экономически активного населения. В-третьих, при стационарном процессе движения экономически активного населения численность безработных с большим стажем безработицы должна быть меньше численности безработных с меньшим стажем безработицы за исключением последней группы безработных. Определим значение a_{14} как среднее арифметическое его нижней и верхней допустимых границ. Поскольку с увеличением стажа безработицы вероятность трудоустройства снижается, данный элемент меньше a_{31}. Тогда, согласно формуле (10) имеем:

$$a_{41} < 1/(1 + y_4/y_3). \quad (11)$$

Поскольку с увеличением стажа безработицы вероятность остаться безработным увеличивается, a_{34} больше чем a_{23}, отсюда:

$$a_{41} < 1/(1 + y_4/y_3). \quad (12)$$

Переходная матрица стационарного процесса движения экономически активного населения России в 2006 г. рассчитана с использованием формул (8)–(12) и статистических данных о численности занятых и безработных (табл. 2). Очевидно, что у матрицы A^{∞} все строки совпадают с заданной стационарной структурой. Таким образом, при стационарном процессе движения экономически активного населения вероятность оказаться в той или иной группе в долгосрочном периоде одинакова для представителей всех групп и определяется стационарной структурой экономически активного населения.

Систему рассматриваемых социальных групп можно определить как однородную и как иерархическую. В первом случае из (3) следует $\beta\alpha = 0{,}75$. Во втором случае занятые составляют верхний уровень, безработные с наименьшим стажем безработицы – более низкий уровень и т. д. Из (4) следует $\beta = 0{,}096$. В обоих случаях отмечается низкая мобильность экономически активного населения, т. е. устойчивая занятость.

3. Модель естественного движения населения (модель рождаемости / смертности). Рассматриваются 18 возрастных групп населения (0–4 года, 5–9 лет и т. д.) и исследуется процесс изменения численности этих групп. Фактор миграции не учитывается, поэтому процесс определяется лишь рождаемостью и смертностью. Коэффициент смертности (дожития) характеризует вероятность перейти в следующую возрастную группу, т. е. прожить один год. Коэффициент рождаемости характеризует вероятность родить одного ребенка в течение года, при этом рождение ребенка трактуется здесь как «переход» родителя в первую возрастную группу. Если этот коэффициент положителен, то группу называют фертильной. Состояние социума здесь описывается численностью возрастных групп, а значение a_{ij} равно вероятности перехода члена i-й возрастной группы в j-ю возрастную группу в течение года. Ненулевыми элементами переходной матрицы являются элементы первого столбца, отвечающие фертильным возрастным группам (рождаемость), элементы над главной диагональю (смертность), а также последний элемент последней строки (смерт-

* *Источник*: Труд и занятость в России. М.: Росстат, 2007. С. 62, 149.

ность в «старейшей» группе) [3]. Сумма элементов каждой строки матрицы здесь может быть как меньше единицы, так и больше её. Проблема существования A^{∞} остаётся открытой, а её решение зависит от соотношения между коэффициентами рождаемости и смертности. Если она нулевая, то в долгосрочном периоде социум вырождается. В противном случае матрица задаёт распределение численности населения по возрастным группам в долгосрочном периоде, которое не зависит от начальной возрастной структуры населения.

Используя (1), мы получили прогноз численности населения Санкт-Петербурга: в 2016 г. – 4224 тыс. человек, в 2021 г. – 3737, в 2026 г. – 3461 и т. д. [3]. Процесс естественного движения населения назовём стационарным, если численность каждой возрастной группы не изменяется. Обозначим стационарное состояние через X, тогда условие стационарности имеет вид:

$$X = X \times A. \qquad (13)$$

Равенство (13) мы трактуем как систему уравнений относительно x_i при заданных элементах a_{ij}. Она имеет бесконечно много решений, поэтому численность младшей группы (x_1) можно считать произвольной. Численность остальных групп рассчитывается по формулам:

$$x_i = x_1 \times m_1 \times ... \times m_{i-1},\ i = 2, 3, ..., n-1, \qquad (14)$$

$$x_n = x_1 \times m_1 \times ... \times m_{n-1}/(1 - m_n). \qquad (15)$$

Из системы (13) также следует, что необходимым условием стационарности служит следующее соотношение:

$$m_1 \times ... \times m_{s-1} \times (f_s + m_s \times f_{s+1} + ... + m_s \times ... \times m_{s+t-1} \times f_{s+t}) = 1, \qquad (16)$$

где s – номер младшей фертильной группы; $s + t$ – номер старшей фертильной группы. Отсюда следует ряд выводов. Во-первых, численность населения страны уменьшается, если левая часть равенства меньше единицы. Например, сумма коэффициентов рождаемости меньше единицы. В России в 2000 г. она составляла 0,485, что говорит о сокращении численности населения [3]. Во-вторых, численность населения увеличивается, если левая часть больше единицы. Например, сумма коэффициентов рождаемости больше величины, обратной произведению коэффициентов дожития, отвечающих дофертильным и фертильным возрастным группам (за исключением старшей фертильной группы). Таким образом, необходимое условие стационарности:

$$1 < \sum f_i < 1/\Pi т_j, \text{ где } i = 1, 2, ..., s + t,\ j = 1, 2, ..., s + t - 1. \qquad (17)$$

Процесс естественного движения населения мы называем *стабильным*, если переходная матрица удовлетворяет условию (17). Чем ближе к единице левая часть (16), тем ближе предельная возрастная структура населения к стационарной структуре Y_{∞}, задаваемой формулами (14)–(15). В табл. 3 показан стабильный процесс естественного движения населения. В качестве начальной структуры принят вектор Y_0 с равной численностью групп. Из таблицы видно, что возрастная структура населения стремится к стационарной структуре. Систему возрастных групп мы рассматриваем как неиерархическую, тогда из (3) следует $\alpha = 0{,}997$. Если учитываются возрастные группы всех возможных диапазонов, т. е. отсутствует группа «свыше 85 лет», тогда $\alpha = 1$. Таким образом, процесс естественного движения населения характеризуется абсолютной мобильностью.

4. Модель карьерного роста. Рассматриваются уровни служебной иерархии в высшей школе: 1 – преподаватели (ассистенты, старшие преподаватели), 2 – доценты, 3 – профессора, 4 – руководители (заведующие кафедрами, деканы, проректоры, ректоры). Предполагается, что все новые работники, поступающие впервые в систему высшего образования, принимаются только на низший уровень; выход из системы возможен

Таблица 3

Стабильный процесс естественного движения населения (условный пример)

Группа	Y_{∞}	A				Y_0	Y_1	Y_2	Y_3
Младшая	0,26	0,0	0,9	0,0	0,0	0,25	0,28	0,25	0,26
Фертильная младшая	0,23	0,7	0,0	0,8	0,0	0,25	0,21	0,26	0,23
Фертильная старшая	0,18	0,5	0,0	0,0	0,7	0,25	0,19	0,17	0,20
Старшая	0,33	0,0	0,0	0,0	0,6	0,25	0,32	0,32	0,31

Таблица 4

Стационарный процесс карьерного роста в иерархической системе (Россия, 2006/07 уч. год)*

Группа	X , тыс. чел.	Переходная матрица A				$(E-A)^{-1}$			
Преподаватели	135,7	0,909	0,091	0,000	0,000	11,0	10,3	2,6	3,0
Доценты	127,8	0,000	0,903	0,097	0,000	0,0	10,3	2,6	3,0
Профессора	32,7	0,000	0,000	0,621	0,379	0,0	0,0	2,6	3,0
Руководители	37,8	0,000	0,000	0,000	0,672	0,0	0,0	0,0	3,0

только с высшего уровня; невозможен переход работника на более низкий уровень; невозможен пропуск работником уровня иерархии. Исследуется карьерный рост работников, т. е. их переходы на более высокие уровни иерархии.

Значение a_{ij} равно вероятности перехода с i-го уровня на j-й уровень в течение года. Свойства матрицы A: её ненулевые элементы находятся на главной диагонали и над ней (работник либо остаётся на данном уровне, либо получает повышение); сумма элементов каждой строки, за исключением последней, равна единице. Пусть b – число работников, которые впервые приняты на низший уровень иерархии за год, тогда приток новых работников в систему задаётся вектором $B = (b, 0, 0, ..., 0)$. Процесс карьерного роста назовём *стационарным*, если с учётом новых работников численность всех уровней иерархии (вектор X) за год не изменяется:

$$X \times A + B = X. \qquad (18)$$

Решим полученную систему уравнений относительно элементов матрицы A, считая векторы X и B заданными. Получим:

$$a_{ij} = 1 - b/x_i. \qquad (19)$$

Отсюда следует, что процесс карьерного роста является стационарным при необходимом условии, что число впервые принятых работников меньше численности работников на каждом уровне иерархии.

Число вновь принятых преподавателей низшего уровня можно установить лишь приближенно. Так, в 2006 г. численность принятых работников составила 18,3 % общей численности работников отрасли. Предполагая, что лишь каждый второй работник, принятый на низший уровень, вошел в систему впервые, получим оценку численности новых работников: $b = 135{,}7 \times 0{,}183 \times 0{,}5 = 12{,}4$ тыс. чел. Далее по формулам (19) рассчитаны элементы матрицы A (табл. 4).

Элементы матрицы $(E-A)^{-1}$ показывают распределение общего срока службы «среднего» работника по уровням иерархической системы [1, с. 82]. Следовательно, вновь принятый работник проведёт в среднем на низших преподавательских должностях 11 лет, в должности доцента – 10,3 года, профессора – 2,6 лет, руководителя – 3 года. Степень мобильности в системе определим на основе (4) с учётом вида переходной матрицы (табл. 4): $\beta = b/x$, где x – стационарная численность работников. Подставим фактические значения за 2006/07 уч. год: $\beta = 0{,}037$. Таким образом, процессы карьерного роста в системе высшего образования имеют наименьшую мобильность.

5. Модель выживания онкологических больных. Рассматриваются четыре социальные группы: больные раком, умершие от рака, здоровые люди, умершие не от рака. Предполагается, что больные раком умирают только от рака, а здоровые – по иной причине. Здесь исследуется смертность населения от двух названных причин, поэтому в начальной структуре Y_0 нулевую численность имеют вторая и четвёртая группы (живые), а в долгосрочной структуре Y_∞ – первая и третья группы (умершие). Таким образом, процесс выживания онкологических больных является заведомо нестационарным. Свойства матрицы A : 1) сумма элементов каждой строки равна единице; 2) во второй и четвёртой строках диагональные элементы равны единице, остальные – нулю; 3) четвёртый элемент первой строки и второй элемент третьей строки равны нулю. Возьмём некоторую произвольную структуру Y_0. Учитывая вид A и равенство (6), получим соотношение:

$$y_1^0 \times (a_{12}^{\infty} - a_{32}^{\infty}) + a_{32}^{\infty} = y_2^{\infty}.$$

* *Источник*: Труд и занятость в России. М.: Росстат, 2007. С. 267, 272.

Поскольку данное равенство должно выполняться при любой начальной структуре, имеем:

$$a_{12}^{\infty} = a_{32}^{\infty} = y_2^{\infty}.$$

Иными словами, первая и третья строки матрицы A^{∞} равны между собой и совпадают с долгосрочной структурой. Нами рассчитана переходная матрица процесса выживания онкологических больных для России (2007 г.) на основе статистических данных об общей численности населения, численности онкологических заболеваний с впервые установленным диагнозом, численности зарегистрированных онкологических больных, численности умерших от рака и по другим причинам. Численность лиц, выздоровевших от рака, рассчитана в предположении, что число онкологических больных неизменно, а тогда число новых онкологических больных равно сумме умерших от рака и излечившихся от него. Вектор Y_{∞} рассчитан на основе формулы [1, с.148]:

$$y_2^{\infty}/y_4^{\infty} = (1 + a_{31}/a_{34}) \times a_{12}/a_{13}.$$

Из расчётов следует $y_2^{\infty} = 0{,}66$, $y_4^{\infty} = 0{,}34$, т. е. при любом соотношении больных и здоровых в перспективе от рака умрут 66 % населения. Здесь $\alpha = 1$, т. е. имеет место абсолютная мобильность, как и в родственной модели естественного движения населения.

Итак, предложенный метод моделирования стохастических социальных процессов является научно-обоснованным, универсальным и применимым на практике. Введённое нами понятие предельной переходной матрицы может успешно использоваться для описания наиболее общих тенденций исследуемых социальных процессов, а понятие стационарного процесса описывает важный класс социальных явлений, для которых переходная матрица может быть рассчитана наиболее точно на основе данных официальной статистики. Относительная простота предложенного метода позволяет успешно использовать его при обучении студентов экономического профиля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт № 02.740.11.0437 на выполнение НИР)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бартоломью Д.Д.** Стохастические модели социальных процессов. М.: Финансы и статистика, 1985.

2. **Верзилин Д.Н., Максимова Т.Г.** Эконометрика. Принятие управленческих решений на основе статистических данных: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.

3. **Корнейчук Б.В.** Прогнозирование и регулирование демографических процессов в Санкт-Петербурге с использованием статистических моделей // Рынок труда в Санкт-Петербурге: проблемы и перспективы. Сб. науч. тр. / Под ред. Б.В. Корнейчука. СПб.: Нестор, 2003. С. 6–19.

4. **Корнейчук Б.В.** Рынок труда: Учеб. пособие. М.: Гардарика, 2007.

УДК 004.942; 336.71

О.В. Носова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА СТРАХОВОГО ТАРИФА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ АПК С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Создание страхового продукта, его реализация и предоставление услуг – сложный и долгий путь, состоящий из разных цепочек действий и решений, требующих огромного числа различных материальных, трудовых и финансовых ресурсов. Для эффективного управления страховой компанией необходимо иметь возможность получения информации о состоянии и движении материальных и финансовых потоков в оперативном режиме. Такая проблема может быть решена только с помощью автоматизации работы страховых компаний.

Существующие IT-решения на российском и зарубежном рынках в основном предлагают программные продукты для ведения страховой деятельности. Данные программные средства не нацелены на реализацию возможности проведения анализа данных, полученных экспериментальным способом.

В настоящее время существует достаточное количество методик для определения оптимальных условий страхования рисков объектов, а также приведено большое количество примеров решения задач в области страхования, но все они решаются аналитически. Автору данной статьи не удалось найти работы, в которых в качестве предмета исследования рассматривались риски объектов агропромышленного комплекса.

В статье изучается задача определения размера страхового тарифа при страховании рисков объектов агропромышленного комплекса в условиях равенства ожидаемых доходов и потерь от сделки для страховщика и страхователя. При поиске баланса интересов страховщика и страхователя учитываются параметры финансово-экономических показателей страховой компании в результате работы её основной деятельности, а также стоимость объектов АПК. Решение задачи производится с помощью разработанной автором имитационной модели «Оценка и управление основной деятельностью страховой компании».

Механизм работы страховой компании

Деятельность страховой компании можно представить в виде набора основных и обеспечивающих бизнес-процессов, объединённых в функциональные области. Основной деятельностью страховой компании является заключение и ведение договоров страхования (прямого страхования, сострахования, перестрахования).

Ведение договоров прямого страхования, сострахования и входящего перестрахования предусматривает следующие бизнес-процессы:

1) выплата убытков по договорам страхования;

2) получение страховой премии по договорам страхования;

3) расторжение договоров страхования.

Управление основной деятельностью страховой компании является трудоёмким процессом. Качество и эффективность управления влияют на финансовую устойчивость компании. Для страховщиков обеспечение денежной стойкости является предметом их непосредственной деятельности. Выбор правильной тактики и инструментов управления денежной устойчивостью страховой компании при заданной стратегии является важной и очень сложной задачей.

Основными инструментами управления денежной устойчивостью страховой компании являются [4]:

1) сбалансированность страхового портфеля;

2) тарифная политика;

3) количество заключённых договоров;

4) политика управления затратами.

Тарифной политикой страховой компании определяются размеры поступающей страховой премии, задаётся плановая рентабельность работы.

Оценка эффективности страхования

Специфика страховой защиты состоит в возмещении ущерба при осуществлении страхового случая. Ключевым фактором в решении вопроса об эффективности страхования является вопрос о приемлемости величины страхового тарифа на данный вид страхования с точки зрения страхователя. Страхователю приходится соотносить выгоды, которые он получает от страхования, с убытками, которые он терпит при уплате страховой премии [1].

В литературе определено следующее понятие «эффективности» применительно к страховому процессу: «Под эффективностью страхования, на наш взгляд, нужно понимать ситуацию, когда обе участвующие в процессе стороны – страхователь и страховщик – получают экономическую выгоду от заключения страхового договора по сравнению с ситуацией, когда такой договор не был заключен» [2].

Экономическая выгода страховщика заключается в том, что полученных им при подписании договора страховых взносов должно оказаться достаточно, чтобы обеспечить формирование необходимых страховых фондов, окупить затраты на ведение дела и получить прибыль.

Экономическая выгода страхователя заключается в том, чтобы обеспечить себе дополнительный источник денежных средств для компенсации убытков в случае возникновения непредвиденной ситуации и в то же время не отвлечь значительные

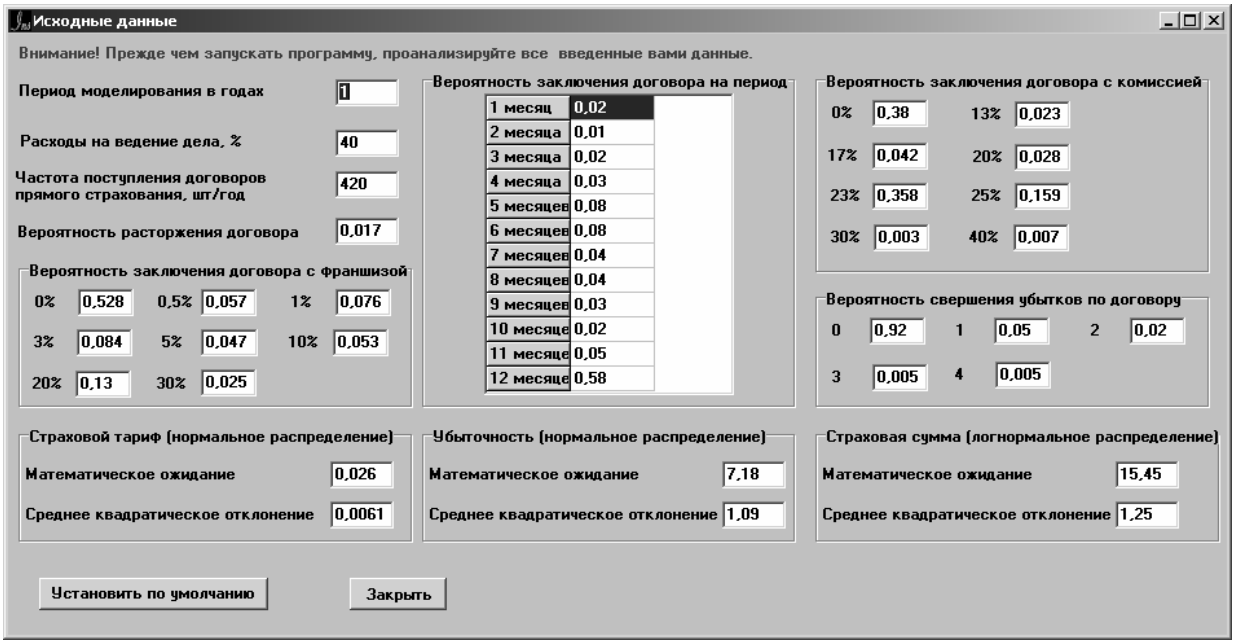


Рис. 1. Входные параметры имитационной модели

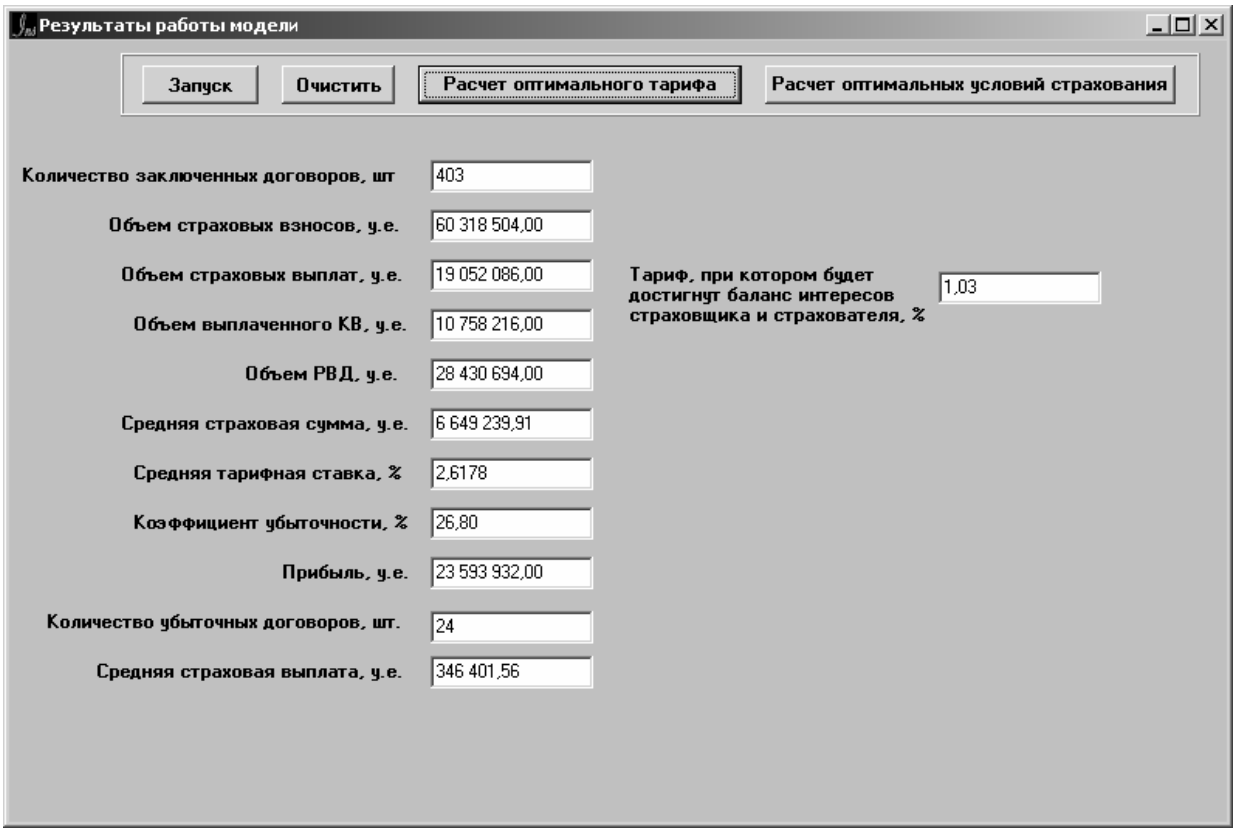


Рис. 2. Выходные параметры имитационной модели

средства на уплату страховых взносов, поскольку при этом снижается оборот фондов и прибыльность бизнеса [1].

Взаимосвязь моделей страхового риска и страховой сделки

Возможны два пути развития отношений страховой компании и страхователя после вступления договора страхования в силу в зависимости от наличия и отсутствия страховых случаев [3]:

1. Отсутствие страхового случая: страховщик приобретает, а страхователь теряет страховой взнос.

2. Наличие страхового случая: страховщик теряет, а страхователь приобретает страховое возмещение.

Адекватной данному описанию математической моделью сделки является совокупность двух случайных величин следующего вида:

1. Исход сделки для страховщика $IS = -(IC - IP)$ с вероятностью наступления страхового случая P, где IC – сумма страховой премии; IP – сумма страхового возмещения; $IS = IP$ с вероятностью ненаступления страхового случая $(1 - P)$.

2. Исход сделки для страхователя $IS = (IC - IP)$ с вероятностью наступления страхового случая P и $IS = -IP$ с вероятностью ненаступления страхового случая $(1 - P)$.

Баланс интересов страховщика и страхователя имеет место при равенстве ожидаемых доходов и потерь от сделки:

$$IP\,(1 - P) = (IC - IP)\,P.$$

Предположим теперь, что величина страхового возмещения принимается равной произведению страховой стоимости объекта на величину математического ожидания относительного ущерба по объекту при наступлении страхового случая. Тогда имеем:

$$IC = IA \cdot MU,$$

где IA – страховая стоимость объекта страхования; MU – математическое ожидание относительного ущерба по объекту страхования; $IP = IA \cdot MU \cdot P$. Так как $IP = IA \cdot T$, где Т – страховой тариф – это цена страхового риска и других расходов, адекватное денежное выражение обязательств страховщика по заключенному договору страхования [1], $T = MU \cdot P$.

Имитационная модель

Имитационная модель «Оценка и управление основной деятельностью страховой компании» разработана автором в программной среде Borland C++ Builder и представляет собой модель функционирования страховой компании в части её основной деятельности. Процесс функционирования страховой компании в модели представлен в виде моделирующего алгоритма, построенного по принципу особых состояний и учитывающий ряд правил и ограничений.

Имитационная модель «Оценка и управление основной деятельностью страховой компании» позволяет рассчитывать финансово-экономические показатели основной деятельности страховой компании, условия страхования и размер страхового тарифа, при котором достигается баланс интересов страховщика и страхователя.

Имитация основана на использовании генераторов случайных чисел с определёнными распределениями для генерации большого числа значений случайной величины [5–7]. Для определения параметров модели была проанализирована статистика данных, накопленных за период с 01.01.2006 г. по 31.10.2009 г. одной из крупных страховой компании по договорам страхования со следующими видами страхования, относящимися к агропромышленному комплексу, на которые рассматриваемая страховая компания имеет лицензии:

1) страхование сельскохозяйственных культур и многолетних насаждений;

2) страхование урожая сельскохозяйственных культур с государственной поддержкой.

На основе проведённого анализа реальных данных действующей страховой компании для каждой характеристики модели была определена закономерность её распределения. В имитационной модели используются следующие законы распределения:

1) экспоненциальный с заданной частотой;

2) логнормальный с заданным математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением;

3) нормальный с заданным математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением;

4) равномерный с заданными вероятностями.

Определение размера страхового тарифа при балансе интересов страховщика и страхователя

Для расчёта размера страхового тарифа, вероятности наступления страхового случая, математического ожидания относительного ущерба по

объекту страхования в форме исходных данных имитационной модели «Оценка и управление основной деятельностью страховой компании» необходимо задать значения входных параметров. Форма с исходными данными представлена на рис. 1

Значение размера страхового тарифа, при котором достигается баланс страховщика и страхователя при указанных значениях входных параметров равно 1,03 %, что представлено на рис. 2. При этом средняя тарифная ставка, используемая страховой компанией при страховании рисков объектов агропромышленного комплекса, по результатам моделирования составляет 2,6178 %.

Страховые тарифы, используемые страховой компанией, являются завышенными. Для увеличения количества заключаемых договоров страхования рисков объектов агропромышленного комплекса, а также для получения лучших значений финансово-экономических показателей целесообразно снизить размер страховых тарифов.

Стоит отметить, что полезность программного обеспечения «Оценка и управление основной деятельностью страховой компании» заключается не только в определении размера страхового тарифа, при котором достигается баланс интересов страхователя и страховщика, но и в определении условий страхования при заданной стратегии. Важным является то, что модель может быть использована при страховании рисков объектов любого происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грищенко Н.Б.** Основы страховой деятельности: Учеб. пособие. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2001.

2. **Хохлов Н.В.** Прогнозирование эффективности страхования с точки зрения предпринимателя // Страховое дело. 1998. № 7. С 41–49.

3. **Цветкова Л.** Концепция трактовки понятия «страховой риск» как атрибута страхового продукта // Страховое дело. 2000. № 3. С. 48–51.

4. **Орланюк-Малицкая Л.А.** Платежеспособность страховой организации. М.: Анкил, 1994. С. 31–33.

5. **Карпов В.И., Мышенков К.С.** Моделирование систем: Курс лекций. М.: Издат. комплекс МГУПП, 2004.

6. **Емельянов А.А., Власова Е.А., Дума Р.В.** Имитационное моделирование экономических процессов // Под ред. А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2002.

7. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем // Под ред. Е.К. Масловского. М.: Мир, 1978.

УДК 519.632.4

А.В. Пашковский

МЕТОД СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАСЧЁТЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Результаты численных экспериментов, полученные в [1]–[3] для модельных краевых задач, подтвердили высокую эффективность разрабатываемого автором метода стандартных элементов на основе рядов Фурье (МСЭФ). Метод показал высокую точность расчётов и стабильность при варьировании структуры кусочно-однородной среды (КОС), наличии в ней узких включений, особенностей решения в угловых точках среды, варьировании её магнитных характеристик и осцилляции решения. Однако до сих пор не были оценены эффективность и точность метода в прикладных расчётах. В связи с этим исследуем МСЭФ на примере задачи полевого расчёта линейного двигателя (ЛД) с постоянными магнитами асинхронного тягово-подъёмного устройства.

Одной из краевых задач, которая может быть эффективно решена МСЭФ, является задача расчёта магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами Ω_2 с намагниченностью $\boldsymbol{M}$, расположенными в области Ω_0 с проницаемостью μ_0, в присутствии ферромагнитных тел Ω_1 (рис. 1). Использование прямоугольных СЭ, введённых в [4], при линейной зависимости $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{H})$ тел Ω_1, позволяет применить МСЭФ для ЛД без его комбинирования с другими численными методами. При этом, сложность структуры расчётной области, количество СЭ, пропорции в соотношении количеств ферромагнитных и неферромагнитных СЭ, их взаимное расположение не играют определяющей роли.

Рассмотрим плоскопараллельное магнитное поле в области Ω_1 магнитных систем, в области Ω_2 постоянных магнитов и во внешней области Ω_0. Пусть свойства стали в каждой точке магнитной системы Ω_1 и области постоянных магнитов Ω_2, задаются материальными операторами $\boldsymbol{H} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{B})$ и $\boldsymbol{H} = \boldsymbol{F}_{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{B})$ соответственно. Магнитное поле при этом описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} &\mathrm{rot}\ \boldsymbol{H} = 0,\ \boldsymbol{H} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{B}) && \text{в } \Omega_1,\\ &\mathrm{rot}\ \boldsymbol{H} = 0,\ \boldsymbol{H} = \boldsymbol{F}_{\boldsymbol{M}}(\boldsymbol{B}) - \boldsymbol{M} && \text{в } \Omega_2,\\ &\mathrm{rot}\,\boldsymbol{H} = 0,\ \boldsymbol{B} = \mu_0 \boldsymbol{H} && \text{в } \Omega_0,\\ &\mathrm{div}\,\boldsymbol{B} = 0 && \text{в } \Omega_0 \cup \Omega_1 \cup \Omega_2. \end{aligned} \qquad (1)$$

На границе $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ раздела сред выполняются условия:

$$B_n^+\big|_\Gamma = B_n^-\big|_\Gamma,\ H_\tau^+\big|_\Gamma = H_\tau^-\big|_\Gamma. \qquad (2)$$

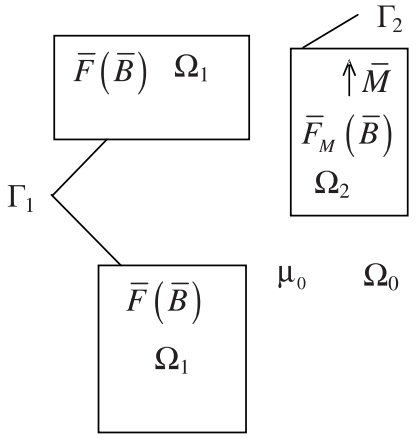


Рис.1. К постановке задачи расчёта магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами

Вводя векторные потенциалы $\boldsymbol{A} = (x,y)\boldsymbol{e}_z$ равенством $\boldsymbol{B} = \mathrm{rot}\,\boldsymbol{A}$ для поля магнитной индукции $\boldsymbol{B}$ и $\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{M}} = \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{M}}(x,y)\boldsymbol{e}_z$ равенством $\boldsymbol{M} = \mathrm{rot}\,\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{M}}$ для поля намагниченности постоянного магнита $\boldsymbol{M}$, из (1) имеем:

$$\begin{aligned} &\Delta A = 0 && \text{в } \Omega_0,\\ &\mathrm{rot}_z\,\boldsymbol{F} = 0 && \text{в } \Omega_1,\\ &\mathrm{rot}_z\,\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{M}} - \Delta A_{\boldsymbol{M}} = 0 && \text{в } \Omega_2. \end{aligned} \qquad (3)$$

Из условий (2) следует:

$$A^+\big|_\Gamma = A^-\big|_\Gamma,$$

$$F_\tau\left(\frac{\partial A^+}{\partial y}; -\frac{\partial A^+}{\partial x}\right)\Big|_{\Gamma 1} = -\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial A^-}{\partial n}\Big|_{\Gamma 1}, \qquad (4)$$

$$F_{M\tau}\left(\frac{\partial A^+}{\partial y}; -\frac{\partial A^+}{\partial x}\right)\Big|_{\Gamma 2} - \frac{1}{\mu}\frac{\partial A_M{}^+}{\partial n}\Big|_{\Gamma 2} = -\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial A^-}{\partial n}\Big|_{\Gamma 2},$$

где Γ_1 и Γ_2 – границы раздела областей Ω_1 и Ω_2 соответственно. Потенциал поля намагниченности $\boldsymbol{A}_{\boldsymbol{M}}$ определён только в области Ω_2 и на её границе.

С точки зрения (3) и (4), рассмотрим *SERECD*1234*m* – стандартный элемент в виде прямоугольника, с условиями Дирихле на границах (рис. 2), представляющий собой постоянный магнит с намагниченностью $\boldsymbol{M}$. Аналогично [5], в качестве допущения, примем, что постоянные магниты имеют $\mu_M = \mathrm{const}$ и равномерную намагниченность. Тогда плоскопараллельное магнитное поле непосредственно в СЭ – постоянном магните, с учётом (3) описывается уравнением:

$$1/\mu\Delta A = \Delta A_M. \qquad (5)$$

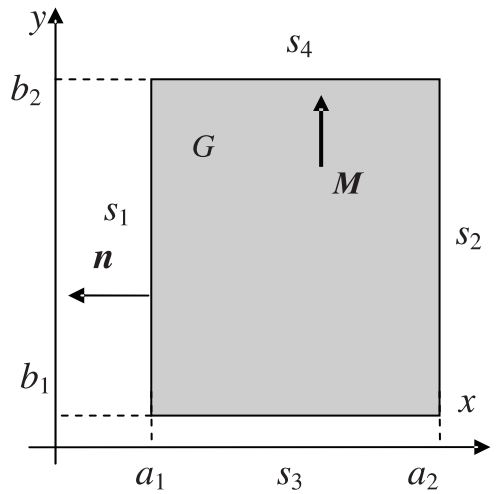


Рис. 2. Стандартный элемент – постоянный магнит

Рассмотрим $\mathrm{rot}\,\boldsymbol{A}_M = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \partial/\partial x & \partial/\partial y & \partial/\partial z \\ A_x & A_L & A_M \end{vmatrix} = \frac{\partial A_M}{\partial y}\bar{i} - \frac{\partial A_M}{\partial x}\bar{j} + (\frac{\partial A_L}{\partial x} - \frac{\partial A_K}{\partial y})\bar{k}$.

В силу решения плоскопараллельной задачи считаем: $\frac{\partial A_L}{\partial x} - \frac{\partial A_K}{\partial y} = 0$, и $\mathrm{rot}\,\boldsymbol{A}_M = \frac{\partial A_M}{\partial y}\bar{i} - \frac{\partial A_M}{\partial x}\bar{j}$. Если считать, что вектор намагничивания $\boldsymbol{M} = m_1\bar{i} + m_2\bar{j}$ постоянный, то $\boldsymbol{M} = \mathrm{rot}\,\boldsymbol{A}_M = \frac{\partial A_M}{\partial y}\bar{i} - \frac{\partial A_M}{\partial x}\bar{j}$, то $\frac{\partial A_M}{\partial y} = m_1$, $\frac{\partial A_M}{\partial x} = -m_2$ и $A_M = -m_2x + m_1y + c$. Учитывая, что вектор намагничивания параллелен той или иной координатной оси, что обычно следует из расположения магнитов, например, оси oy, получим: $m_1 = 0$. Окончательно запишем:

$$A_M = -m_2x + c.$$

Таким образом, уравнение (5) примет вид:

$$1/\mu\Delta A = 0.$$

С учётом (6), можно заключить:

1. Производная $\frac{\partial A_M}{\partial n}$ отлична от нуля только на боковых частях магнита.

2. Постоянная m_2 выбирается из учёта численного значения вектора намагничивания $\boldsymbol{M}$.

Вернёмся к рассмотрению выражения, полученного в [4], определяющего алгоритм построения матриц системы уравнений относительно коэффициентов Фурье функции решения в методике МСЭФ на основе формулы Грина:

$$b_{\text{норм } s_2}(n) =$$

$$= \frac{1}{(b_2-b_1)\cdot sh(n\pi(a_2-a_1)/(b_2-b_1))}\times$$

$$\times[\sqrt{2}cf_{10}(1-(-1)^n) + \sum_{k=1}^{nkf} 2cf_1(k)\frac{(1-(-1)^{(n+k)})}{(1-k^2/n^2)}] -$$

$$- \frac{1}{(b_2-b_1)\cdot th(n\pi(a_2-a_1)/(b_2-b_1))}\times$$

$$\times[\sqrt{2}cf_{20}(1-(-1)^n) + \sum_{k=1}^{nkf} 2cf_2(k)\frac{(1-(-1)^{(n+k)})}{(1-k^2/n^2)}] -$$

$$- \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{b_2-b_1}\cdot\sqrt{a_2-a_1}\,sh(n\pi(a_2-a_1)/(b_2-b_1))}\times$$

$$\times(ch(n\pi(a_2-a_1)/(b_2-b_1))-1)cf_{30} +$$

$$+ \frac{n\pi}{(b_2-b_1)\cdot\sqrt{b_2-b_1}\,sh(n\pi(a_2-a_1)/(b_2-b_1))}\times$$

$$\times\sum_{k=1}^{nkf} csh(k,n)cf_3(k) -$$

$$- \frac{(-1)^n\sqrt{2}}{\sqrt{b_2-b_1}\cdot\sqrt{a_2-a_1}\,sh(n\pi(a_2-a_1)/(b_2-b_1))}\times$$

$$\times(ch(n\pi(a_2-a_1)/(b_2-b_1))-1)cf_{40} -$$

$$- \frac{(-1)^n n\pi}{(b_2-b_1)\cdot\sqrt{b_2-b_1}\,sh(n\pi(a_2-a_1)/(b_2-b_1))}\times$$

$$\times\sum_{k=1}^{nkf} csh(k,n)cf_4(k)\,. \qquad (8)$$

Отметим, что левая часть выражения (8) представляет собой коэффициенты разложения нормальной производной потенциала A на стороне s_2 СЭ в ряд Фурье по синусам. Для постоянного магнита, с учётом представления (4) нормальной производной функции A на соответствующей его границе, получим:

$$b_{\text{норм } s_2}(n) = 2/\sqrt{b_2-b_1}\int_{G12}(\frac{\partial A^+}{\partial n}|_{s_2} - \frac{\partial A_M^+}{\partial n}|_{s_2})\sin(n\pi y/(b_2-b_1))dy\,,$$

т. е. для учёта намагниченности, в выражение, определяющее алгоритм построения матриц системы уравнений краевой задачи при рассмотрении сторон «склейки» СЭ-постоянных магнитов, вводится лишь добавочное слагаемое $\frac{\partial A_M^+}{\partial n}|_{\Gamma_2}$.

Таким образом, МСЭФ на основе формулы Грина с использованием коэффициентов Фурье может быть применен к расчёту магнитного поля в СЭ как постоянных магнитов, т. к.:

1. Введённая в ранних работах постановка задачи Дирихле для уравнения Лапласа имеет место в постановке (4), (7).

2. Условия «склейки» для склеиваемых немагнитных СЭ не претерпевают изменений.

3. Для учёта намагниченности в выражение (8), определяющее алгоритм построения матриц системы уравнений краевой задачи при рассмотрении сторон «склейки» СЭ-постоянных магнитов, вводится добавочное слагаемое $\partial A_M^+/\partial n\,|_{\Gamma_2}$.

С целью сравнительной оценки точности МСЭФ на примере расчёта магнитного поля ли-

нейного двигателя (ЛД) с постоянными магнитами тягово-подъёмного модуля проведём:

1. Расчёт магнитного поля ЛД с помощью пакета *FEMM*, реализующего МКЭ, при количестве конечных элементов – 1487.

2. «Эталонный» расчёт магнитного поля ЛД с помощью пакета *FEMM*, реализующего МКЭ при обычно не используемой высокой степени дискретизации области (444 414 конечных элементов).

3. Расчёт магнитного поля ЛД с помощью оригинального программного пакета *SEMF*, реализующего МСЭФ при количестве СЭ равном 120.

Рассмотрим оценку точности численных методов на примере расчёта плоскопараллельного магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами линейного двигателя (ЛД) (рис. 3). Магнитопровод рассматриваемого ЛД состоит из шести пар противостоящих постоянных магнитов (область Ω_2), закреплённых на двух стальных пластинах (область Ω_1). Между этими пластинами в области Ω_0 с магнитной проницаемостью μ_0 расположена трёхфазная обмотка двигателя. Пластины магнитопровода выполнены из стали 1020, а постоянные магниты имеют остаточную индукцию B_γ = 1,1 Тл. Максимальные значения плотности тока проводников обмотки не превышают 11 А/мм^2, а частота питающего напряжения не превосходит 200 Гц. В этом случае магнитное поле проводников обмотки при номинальном значении тока по своей величине пренебрежимо мало по сравнению с полем, создаваемым постоянными магнитами. Пренебрежём вихревыми токами, индуцированными в стальных пластинах магнитопровода переменной составляющей поля. Геометрические размеры ЛД (соотношение высоты магнитов к расстоянию между противостоящими магнитами, равное 5:1) позволяют считать магнитное поле плоскопараллельным. Отступим непосредственно от границ линейного двигателя по горизонтали (на треть его длины) и по вертикали (на половину его ширины) и зададим нулевые условия на внешней границе расчётной области ($A\big|_\Gamma = 0$). Расчётная область G имеет следующий вид (рис. 3).

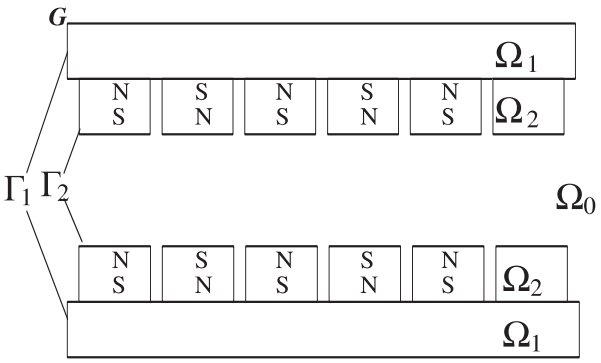


Рис.3. Геометрия расчётной области

Расчёт магнитного поля в G проведён методом конечных элементов с помощью пакета *FEMM*, при количестве конечных элементов в области равном 1448 (рис. 4). Для контроля и сопоставления точности методов в расчёте магнитного поля

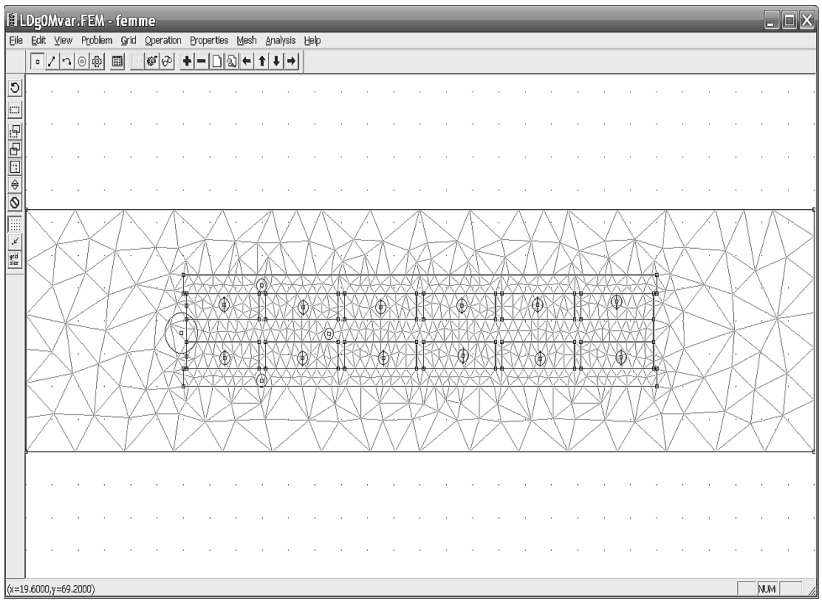


Рис. 4. Конечно-элементная сетка пакета *FEMM* (1448 КЭ)

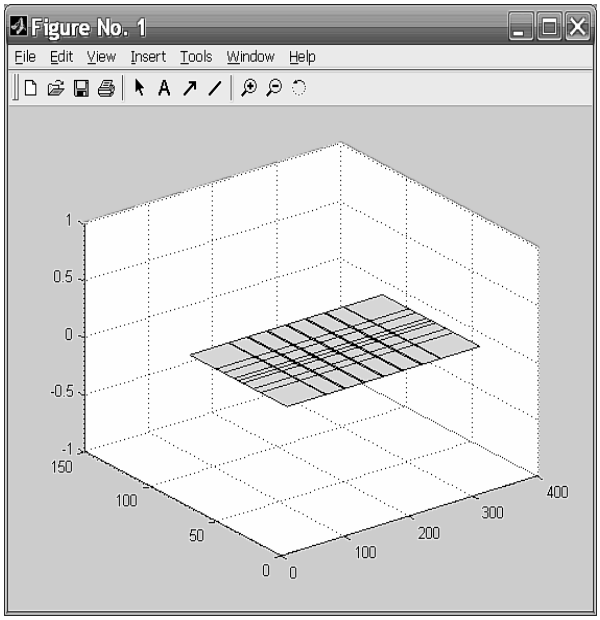


Рис. 5. Программная реализация заполнения расчётной области (120 СЭ)

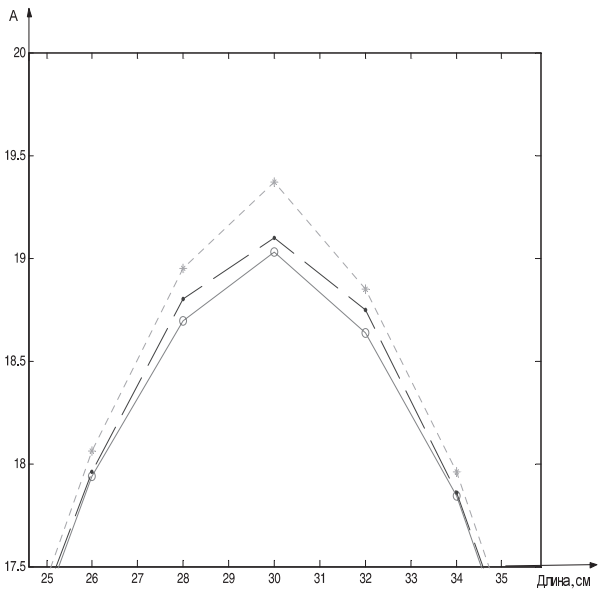


Рис. 6. Значения векторного потенциала (—○—) МСЭФ; (—•—) МКЭ; (—✳—) Эталонный МКЭ

найдено распределение векторного потенциала в воздушном зазоре вдоль горизонтальной оси симметрии ЛД. Следует напомнить, что для сравнительной оценки погрешностей МКЭ (1448 КЭ) и МСЭФ (120 СЭ), также получено «эталонное» решение поставленной краевой задачи, с использованием пакета FEMM, при повышенной степени дискретизации расчётной области (444 414 КЭ). С учётом проведённой адаптации методики МСЭФ к СЭ, являющимся постоянными магнитами, на его основе реализован расчёт плоскопараллельного магнитного поля линейного двигателя. При этом, элементами ЛД, определяющими размеры и характер последующего разбиения расчётной области на СЭ, явились постоянные магниты полюсов ЛД. Каждый постоянный магнит заменён прямоугольным СЭ, соответствующего размера. Для полного заполнения расчётной области введено всего 120 прямоугольных СЭ (рис. 5). Как было отмечено выше, для первоначальной оценки точности методов принято, что ферромагнетик – сталь магнитопровода, имеет линейную магнитную характеристику. Это позволило провести заполнение магнитопровода прямоугольными СЭ и избежать как применения СЭ иной конфигурации, так и конечных элементов.

Для расчёта магнитного поля применён оригинальный программный пакет *SEMF-M*, реализующий МСЭФ с учётом наличия в расчётной области ЛД постоянных магнитов. Результаты расчёта абсолютного значения векторного потенциала магнитного поля для некоторой части контрольных точек воздушного зазора половины длины двигателя показаны на рис. 6 и в таблице.

Следует отметить, что степень дискретизации расчётной области (120 СЭ) определена, в основном, её внутренней структурой. Тем не менее, даже при таком незначительном количестве СЭ точность МСЭФ в большинстве контрольных точек превзошла точность МКЭ. Кроме того, дальнейшее совершенствование математического аппарата «склейки» СЭ, «склейка» нескольких СЭ с общей стороной одного СЭ, позволят дополнительно сократить степень дискретизации области. Так, перспективное заполнение области линейного двигателя прямоугольными СЭ с различными длинами сторон потребует всего 33 СЭ. С другой стороны, в случае необходимости повышения точности расчёта или же учёта нелинейности свойств материала магнитопровода, степень дискретизации соответствующих частей расчётной области может быть увеличена.

Анализ результатов расчёта магнитного поля линейного двигателя с постоянными магнитами, полученных МСЭФ (120 СЭ), МКЭ (1448 КЭ) и МКЭ (444414 КЭ), позволяет сделать следующие выводы:

Значения векторного потенциала в воздушном зазоре по длине ЛД

Номер точки	Координаты точки	«Эталонный» МКЭ (444414 КЭ)	Значения МКЭ (1448 КЭ)	Значения МСЭФ (120 СЭ)	Погрешности методов, %	
					$\delta_{МКЭ}$	$\delta_{МСЭФ}$
1	(0,630;17)	–0,9640	–0,6963	–1,0176	0,2777	0,0556
2	(15;17)	–10,36	–10,38	–10,3384	0,0019	0,0021
3	(15;17)	–19,10	–19,37	–19,0310	0,0141	0,0036
4	(45;17)	–10,01	–10,03	–10,0080	0,0020	0,0002
5	(60;17)	–0,9598	–0,7364	–1,0273	0,2328	0,0703
6	(75;17)	–9,821	–9,841	–9,8414	0,0020	0,0021
7	(90;17)	–18,73	–18,99	–18,7017	0,0139	0,0015
8	(105;17)	–9,821	–9,840	–9,8438	0,0019	0,0023
9	(120;17)	–0,9593	–0,7276	–1,0337	0,2415	0,0775
10	(135;17)	–10,01	–10,03	–10,0101	0,0020	0,0000
11	(150;17)	–19,10	–19,37	–19,0317	0,0141	0,0036
12	(165;17)	–10,36	–10,38	–10,3378	0,0019	0,0021
13	(179.39;17)	–0,9608	–0,7876	–1,0056	0,1803	0,0466

1. МСЭФ способствует резкому сокращению объёма работы по дискретизации области по сравнению с МКЭ, обеспечивая при этом высокую точность расчётов.

2. Использование формулы Грина в МСЭФ и аналитических представлений функции в виде рядов Фурье обеспечивают работоспособность и высокую эффективность МСЭФ.

3. Классические решения (аналитические формулы) краевых задач в СЭ позволяют очень точно учесть особенности поведения решения в окрестностях многочисленных угловых точек расчётной области.

4. МСЭФ не выделяет специальные элементы в окрестности точек с особенностями решения – построение системы уравнений МСЭФ относительно коэффициентов Фурье обеспечивает необходимую точность.

5. Применение МСЭФ сокращает размерность решаемой системы уравнений и повышает точность решения, не прибегая к специальным алгоритмам формирования расширенной матрицы (ленточной матрице).

6. МСЭФ не меняет методику при изменении размерности задачи, причём количество СЭ и их геометрия не являются определяющими факторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пашковский А.В.** Решение тестовых полевых задач в кусочно-однородной области методом стандартных элементов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 6. С. 147–151.

2. **Пашковский А.В.** МСЭФ в решении задач магнитостатики при особенностях в окрестностях угловых точек // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 1. С. 18–22.

3. **Пашковский А.В., Пашковская И.В.** МСЭ в моделировании стационарного поля в области с П-образным сердечником // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 2. С. 10–12.

4. **Пашковский А.В., Пашковская И.В.** «Склеенные» прямоугольные стандартные элементы в решении модельной полевой задачи // Изв. вузов. Электромеханика. 2007. № 1. С. 78–79.

5. **Шкуропадский И.В.** Комбинированный метод конечных и комплексных граничных элементов для расчета электрических и магнитных полей в нелинейных анизотропных средах: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2005. 170 с.

УДК 004.021+004.772

Д.С. Садаков, С.Э. Сараджишвили

МЕТОД СБОРА ИНФОРМАЦИИ О РЕСУРСАХ ДЛЯ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА, ОРИЕНТИРОВАННОЙ НА ЛВС

Информационный поиск – это бурно развивающаяся область науки, популярность которой обусловлена экспоненциальным ростом объёмов цифровой информации, в частности, в Интернет и локальных вычислительных сетях (ЛВС). Необходимы более совершенные механизмы поиска и индексации информации.

Потенциал ЛВС в информационном поиске используется недостаточно. Системы информационного поиска (ИПС) в подавляющем большинстве ориентированы либо на глобальную сеть Интернет, либо на локальную машину пользователя. При этом вопрос поиска в пределах локальных вычислительных сетей появился только в последние годы. Преимущества ЛВС – скорость обмена информацией, на порядки превышающая скорость доступа в Интернет, и сотни терабайтов данных, доступных в региональных вычислительных сетях (РВС) – не используются. Объёмы ресурсов (дистрибутив программ, музыки, фильмов и др.) растут темпами, опережающими любые возможности ручного анализа.

На сегодняшний день существует мало качественных систем информационного поиска, ориентированных на ресурсы, доступные в ЛВС и РВС, что делает задачу построения подобной системы актуальной [2].

Обзор и анализ существующих методов сбора информации о ресурсах ЛВС показал, что есть ряд недостатков как по критерию качества собранной информации, так и по временным критериям сбора информации из ЛВС.

Одним из наиболее распространённых способов сбора данных о ресурсах ЛВС является программа-агент, сканирующая машины в ЛВС и управляющая базой данных о ресурсах ЛВС.

В данной публикации описывается новый разработанный метод сбора информации о ресурсах ЛВС, который превосходит другие методы по временным метрикам сбора информации о ресурсах ЛВС.

Описание метода

Требуемый метод был успешно разработан и реализован в прототипе программного обеспечения ИПС [3]. Метод включает в себя следующие шаги:

1. Задаётся изначальный диапазон машин в ЛВС, политики выборки, повторного посещения, вежливости и параллельного сканирования. Вычисляется оптимальный период повторного сканирования узла.

2. Создаётся список узлов ЛВС, каждый узел проверяется на корректность и доступность, список ранжируется по важности ресурса. Начинается сканирование ФС удалённых узлов по выбранной стратегии, определяются изменения и обновления в структуре ФС, найденные отличия ставятся в очередь индексации.

3. Параллельно начинает работу индексатор (выполняя политики вежливости и политики параллельного сканирования), выполняя индексацию ресурсов из очереди индексации. Найденные ресурсы сохраняются в два места: в реляционную СУБД и в обратный индекс Lucene.Net.

Ш а г 1.

Изначально агентам задаётся диапазон IP адресов в локальной сети, которые можно сканировать. Эти адреса создаются из доступных узлов протокола NETBIOS, Bonjour и из списка, заданого администратором. Этот список постоянно корректируется и обновляется по ходу сканирования.

Поведение поисковых роботов определяется совокупностью политик посещения:

1. *Политика выборки* определяет ресурсы сканирования

2. *Политика повторного посещения* определяет период повторного посещения.

3. *Политика вежливости* определяет ограничения, предотвращающие сильную нагрузку на удалённую машину.

4. *Политика параллельного сканирования* координирует параллельно работающих роботов.

Эти политики предлагается задавать следующим образом.

Политика выборки. Изначально все компьютеры для выборки равны, единственное условие – это включённость компьютера и успешный отклик ping. Собирается статистика по неработающим и дефектным узлам ЛВС, которые со временем не будут сканироваться.

Политика повторного посещения. При длительных ошибках доступа к одной машине, она не действует в сканировании на несколько часов. Через Nrepeat часов она вновь начинает считаться пригодной для сканирования.

Из сканируемых компьютеров выбираются директории, у которых самая большая вероятность изменения в файловой структуре. Это делается по логике определения прошлых изменений:

при начальном сканировании и при часто изменяемых данных минимальный промежуток повторного сканирования уменьшается на 25 %;

при трёх и более сканированиях неизменной файловой структуры промежуток увеличивается на 25 %;

при нахождении изменений промежуток остаётся неизменным.

Также при рекурсивном сканировании файловой структуры учитывается дата изменения директории, и в случае её неизменности поддиректория не сканируется на изменения.

Функция $F_p(t)$ – *Freshness* – бинарная, определяющая актуальность локальной копии файла. Актуальность файла p в момент времени t определяется так:

$$F_p(t) - \begin{cases} 1, \text{ если файл идентичен локальной копии } p \text{ в момент времени } t; \\ 0, \text{ в остальных случаях(при изменении).} \end{cases}$$

Возраст A(), Age – определяет, насколько устарела локальная копия файла p, в момент времени t:

$$A_p(t) - \begin{cases} 0, \text{ если } p \text{ не изменена в момент времени } t; \\ t - \text{время изменения файла в остальных случаях.} \end{cases}$$

Задача робота максимизировать усреднённое значение функции $F(t)$ для хранящихся в индексе файлов, либо минимизировать средний возраст файлов $A(t)$.

Две простые политики повторного посещения были изучены Cho и Garcia-Molina [1]. Равномерная политика включает в себя повторное посещение всех узлов с одинаковой частотой, вне зависимости от частоты их изменения. Пропорциональная политика включает более частое повторное посещение частоизменяемых узлов. Частота повторного посещения пропорциональна (усреднённой) частоте изменения узлов. По функции средней актуальности $F(t)$ равномерная политика повторного обхода превосходит пропорциональную политику как при симуляции, так и в экспериментах. Объяснение этого результата в том, что часто изменяющиеся узлы заставляют поискового робота тратить время на повторное сканирование. Чтобы увеличить среднюю актуальность, можно штрафовать часто изменяемые директории.

Оптимальной политикой повторного посещения является непропорциональная и неравномерная политика. Оптимальный метод повторного обновления появится при выполнении следующих условий:

игнорирование часто изменяющихся директорий;

оптимизация частоты обновлений по двум функциям $F(t)$, $A(t)$.

Оптимальная политика больше напоминает пропорциональную политику, чем равномерную. В прототипе используется упрощённая пропорциональная политика.

Политика вежливости гласит, что каждый компьютер в локальной сети не должен сканироваться больше чем одним роботом за 15 с. Такое ограничение необходимо для предотвращения сильных нагрузок на файловую систему удалённого компьютера при рекурсивном сканировании директорий.

Политика параллельного сканирования. В каждый отдельный момент только один робот может сканировать файловую структуру машины. Каждый робот ищет директории из очереди сканирования, которая обновляется в соответствии с политиками вежливости и выборки.

Ш а г 2.

На этом этапе у нас есть список узлов ЛВС, которые можно отсканировать. Каждый узел проверяется на доступность и корректность. Список всех узлов ставится в очередь в порядке важности ресурса. Важность определяется по статистике предыдущих посещений узлов.

Описываемый подход к ранжированию основывается на следующих наблюдениях:

узлы с ресурсами определённой тематики нередко повторяются на узлах той же тематической направленности;

тематическая направленность директорий, имеющих общего предка, по тенденции может быть похожей;

схожесть тематики узлов тем выше, чем ближе находятся директории на этих узлах в общем предке.

Указанные выше наблюдения используются для оценки $I(u)$ ожидаемой «полезности» обнаруженной директории u. Эти оценки задают порядок в очереди не сканированных узлов, и, тем самым, определяют базовую стратегию обхода.

При посещении директории u робот извлекает из полученной директории все встречающиеся в ней файлы C_u, вычисляет ожидаемую «полезность» уже известных, но еще не посещавшихся узлов, с учётом новой информации. Таким образом, после посещения новой директории очередь может быть частично переупорядочена.

Ожидаемая «полезность» $I(u)$ уже посещённой роботом директории u полагается равной оценке его тематической релевантности $r(u)$, т. е. $I(u) = r(u)$. В случае получения точной оценки, именно она используется в качестве $r(u)$, иначе $r(u)$ полагается равной грубой оценке тематической релевантности соответствующего документа u.

Ожидаемая полезность директории, ещё не посещённой роботом, вычисляется при помощи следующей эмпирической формулы:

$$I'(u) = \alpha M(u) | \beta B(u).$$

$M(u)$ – это функция, аппроксимирующая «полезность» u на основе оценок полезности множества ссылок P_u на уже посещённые родительские директории документа u:

$$M(u) = \sum_{j \in P_u} \frac{I(j)}{|P_u|}.$$

$B(u)$ – функция, аппроксимирующая «полезность» документа u на основе оценок тематической релевантности уже посещённых «узлов-братьев» u_i и расстояний p_i между документом на этом узле и документа u в общих родительских директориях:

$$B(u) = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} (e^{-p_i} + 1)} \sum_{i=1}^{n} I(u_{p_i}) \cdot (e^{-p_i} + 1),$$

где n – общее количество посещённых «узлов-братьев».

Коэффициенты α и β ($\alpha, \beta \in [0,1]$) связаны соотношением $\alpha + \beta - 1$; α отражает предполагаемую относительную силу взаимосвязей между тематиками родительских директорий и поддиректорий (потомков), а β – относительную силу взаимосвязей между тематиками «узлов-братьев». Оптимальный выбор этих коэффициентов является открытой исследовательской проблемой. В рамках экспериментов наилучшие результаты были получены при $\alpha = 0{,}7$ и $\beta = 0{,}3$.

Директории сканируются на наличие отличий от предыдущего сканирования. Найденные новые, изменённые и удалённые файлы ставятся в очередь индексации.

Ш а г 3.

Параллельно начинает работу индексатор. Индексатор – это механизм, который получает на вход ресурс (документ) из очереди индексации, и, выполняя политики вежливости и политики параллельного сканирования, производит индексацию ресурса. В индексации выполняются анализ метаданных ресурса, фильтры и лингвистические модули для разбора морфологии естественных языков для составления обратного индекса Lucene.Net. Обратный индекс составляется для скоростного поиска по метаданным ресурса.

Процесс индексации длителен и загружает ЦПУ. Выполнять очередь на индексацию нужно в несколько потоков, индексируемым объектам следует присвоить разный приоритет.

При подключении нового компьютера в локальную сеть поисковой робот может добавить десятки, сотни и тысячи объектов в очереди на индексацию, что сильно загрузит память и помешает бесперебойной работе машины. Решить эту проблему можно созданием генератора индексируемых объектов. Такой объект создаётся и вызывается очередью, когда потребители очереди запрашивают следующие объекты для индексации.

Результаты практического применения

С целью экспериментальной проверки предложенного метода, его реализовали в программном продукте ИПС «Lan-Crawler.Net». С использованием данной программы был проведён ряд экспериментов (см. рис.).

Результат измерения скорости показывает, что построенная программа Lan-Crawler начинает работу медленно, но за счёт многопоточной архитектуры и выбранной стратегии индексации

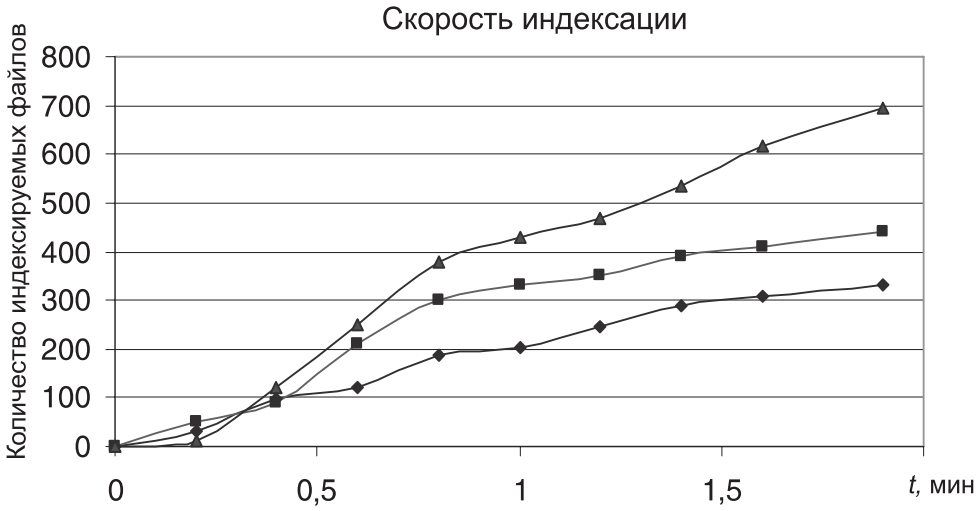


График скорости индексации разных поисковых систем
(—◆—) Windows; (—▸—) Beagle; (—▲—) LanCrawler

файлов начинает обгонять аналогичные ИПС через 40 с. Далее, с увеличением времени работы система показывает свою эффективность индексации и обрабатывает файлы быстрее аналогов.

Итог измерений показывает, что ИПС должна быть многопоточной, и что стратегии обхода директорий играют значительную роль при поиске файлов в количестве, превышающем несколько сотен экземпляров.

В ходе работы был разработан метод сканирования ЛВС для ИПС, удовлетворяющий всем предъявленным требованиям. Есть потенциал для реализации более эффективной версии метода. Дальнейшие исследования можно проводить в области автоматизации определения параметров метода повторной политики и политики параллельного посещения. Это ускорит посещение узлов ЛВС и повысит общую скорость индексации. Другим направлением исследований для улучшения метода является изучение более широкого профиля запросов и более объёмных ЛВС. Также, имея несколько параллельно работающих ИПС внутри одной ЛВС, синхронизирующих результаты сканирования между собой, можно изменить метод сканирования для повышения скорости сканирования. Необходимо проведение дополнительных исследований для выявления эффективности подобного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cho J., Garcia-Molina H.** Estimating frequency of change // ACM Transactions on Internet Technology (TOIT). 2003. Vol. 3. Iss. 3. P. 256–290.

2. **Некрестьянова И.С.** Тр. РОМИП 2007–2008 // Рос. семинар по оценке методов информационного поиска. Дубна, 9 окт. 2008.

3. **Садаков Д.С.** Автоматизация ассоциативной классификации в большой коллекции файлов / Сб. «Технологии Microsoft в теории и практике программирования», 2009.

УДК 004.912

С.Д. Тарасов

МЕТОД ТЕМАТИЧЕСКОГО СВЯЗАННОГО РАНЖИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ РЕФЕРИРОВАНИЯ СООБЩЕНИЙ

Задача автоматического построения сводных рефератов на сегодняшний день является очень актуальной. Это вызвано, в первую очередь, необходимостью в условиях постоянного роста информации знакомить специалистов и других заинтересованных людей с необходимыми им документами, представленными в сжатом виде, но с сохранением смысла. В 50-х гг. прошлого века появился термин «информационный взрыв» – резкое увеличение объёма информации, которую должен воспринять, хранить и использовать человек в процессе своей трудовой деятельности. Угроза лавинообразного роста объёма информации послужила толчком к целому ряду научных исследований в области автоматической классификации и реферирования информации, однако, результаты этих исследований не получили широкого распространения в силу ограниченности средств вычислительной техники и отсутствия на тот момент должного развития сетевых технологий. Классическое реферирование – процесс сжатия текстового документа и получение реферата, в котором сохраняется смысл оригинала. Наибольший интерес представляют обзорные или сводные рефераты, составляемые на некоторое множество документов, содержащие основные положения из этих документов [1]. Использование сводных рефератов вместо первоисточников позволяет эффективнее работать с большими объёмами информации. Одной из наиболее приоритетных областей применения методов автоматического сводного реферирования является подготовка аналитических справок и информационных бюллетеней в виде сводных рефератов в задачах обеспечения требуемой информационной поддержки для лиц, принимающих управленческие решения.

Обзор существующих методов сводного реферирования

Все существующие методы реферирования как классические (по одному документу), так и сводные (обзорные по набору документов), можно разделить на два направления:

квазиреферирование (Sentence extraction);

генерация реферата с порождением нового текста (Abstraction).

Квазиреферирование основано на экстрагировании фрагментов документов – выделении наиболее информативных предложений (иногда – фраз и словосочетаний) и формировании из них квазирефератов. Методы генерации реферата с порождением нового текста основываются на выделении из текстов с помощью методов искусственного интеллекта и специальных информационных языков наиболее важной информации и порождении новых текстов, содержательно обобщающих первичные документы. Семантические методы формирования рефератов-изложений допускают два основных подхода: метод синтаксического разбора предложений, и методы, базирующиеся на понимании естественного языка, методах искусственного интеллекта. В силу ограниченности на практике методов понимания естественного языка, а также отсутствия необходимой базы семантических словарей достаточного объёма и содержания, данные методы на сегодняшний день не получили значительного распространения. Большинство современных методов реферирования, имеющих практическую реализацию, относятся к направлению квазиреферирования.

Задача получения сводных рефератов, в которых были бы представлены все основные вопросы, затрагиваемые в каждом документе, но в обобщенном виде без повторения информации, – намного более сложная задача, чем традиционное автоматическое реферирование одного документа, даже очень большого объёма. Во-первых, это связано с неизбежной разнородностью формулировок тем документов, на которые, как правило, ориентированы методы автоматического сводного реферирования. Во-вторых, для сводного реферирования отдельной задачей является метод упорядочивания предложений, отобранных для включения в сводный реферат. Предложения могут выбираться из разных документов и в общем случае, как правило, не составляют связный текст.

За рубежом в рамках конференций по проблемам автоматического аннотирования DUC (Document Understanding Conference) и текстового реферирования TSC (Text Summarization Challenge) данному направлению исследований придаётся очень большое значение. Автоматическое сводное реферирование реализовано в таких системах:

«NewsBlaster» (http://www.newsblaster.com/);

«Ultimate Research Assistant» (http://ultimate-research-assistant.com);

«iResearch Reporter» (http://iresearch-reporter.com/);

Новостных порталах: «Google News» (http://news.google.com/), «Яндекс. Новости» (http://news.yandex.ru/), «Рамблер. Новости» (http://news.rambler.ru) и др.

На сегодняшний день предложено большое количество различных методов получения сводных рефератов. В традиционных методах реферирования чаще всего используются различные модификации подхода Г. Луна [2], известного с конца 50-х гг. XX в., заключающегося в отборе предложений с наибольшим весом для включения их в реферат. Вес предложения определяется как сумма частот, входящих в него значимых слов (с учётом закона Ципфа). Предложены методы, в которых вместо слов используются словосочетания, концепты тезауруса [3, 4]. К наиболее перспективным можно отнести методы, описывающие связную модель текста документов с помощью формального математического аппарата. Данные методы, как правило, не привязаны к особенностям конкретного языка, не требуют большого количества лингвистических ресурсов.

В результате анализа были сформулированы следующие критические недостатки существующих подходов, которые необходимо исправить для достижения требуемого качества реферирования, а также для расширения сферы применения метода:

Большинство существующих методов требуют большого количества различных лингвистических ресурсов (толковые, лексические и частотные словари, грамматики, тезаурус). Большая сложность естественных языков не позволяет создать достаточно полные формализованные лингвистические ресурсы, необходимые для работы алгоритмов автоматического реферирования.

Большинство существующих методов ориентировано на особенности конкретного естественного языка.

В существующих методах либо вообще не рассматривается вопрос о формировании связного текста итогового реферата, либо ему уделяется недостаточное внимание.

Большинство подходов требуют ручной корректировки со стороны экспертов-лингвистов.

Существующие средства анализа и синтеза текста на естественном языке, используемые рядом методов сводного реферирования, находятся на ранней стадии своего развития и не позволяют использовать данные методы в целях, отличных от научно-исследовательских.

Ряд алгоритмов требует значительных вычислительных ресурсов, что нежелательно при их использовании в реальных условиях обработки больших объёмов данных.

Необходимость учёта вышеперечисленных недостатков, а также исследование качества автоматического и ручного сводного реферирования определяют требования к новым эффективным методам и алгоритмам:

минимальная потребность в лингвистических ресурсах (словарях, грамматиках и т. д.);

отсутствие привязки к особенностям конкретного естественного языка;

метод должен обеспечивать не только сжатие информации и выделение из текста наиболее значимых предложений, но и формирование из этих предложений связного текста;

метод должен обеспечивать полностью автоматическое порождение текста реферата без необходимости последующей корректировки со стороны эксперта;

алгоритм должен быть прост с вычислительной точки зрения, чтобы его можно было использовать в реальных задачах автоматического реферирования больших объёмов данных в условиях ограниченного времени.

Метод тематического связанного ранжирования

Суть разработанного автором метода тематического связанного ранжирования заключается в отборе предложений из исходных документов, наиболее полно отражающих темы этих документов, при этом:

1. Для предварительного ранжирования предложений документов относительно тем может быть использован любой алгоритм, например, алгоритм Луна. Автором был использован алгоритм Manifold Ranking [5].

2. Темы, которые плохо отражают суть документа, исключаются. По результатам анализа такие темы имеют очень слабую связь с текстом документа.

3. Для обеспечения связности полученного реферата каждое последующее предложение реферата связано с предыдущим некоторой общей темой.

4. Для обеспечения уникальности каждого предложения, каждое последующее предложение отражает основную тему предыдущего предложения, а также некоторую новую тему, отличную от предыдущей.

5. Для разрешения анафорических связей предложения, содержащие анафорическую связь, игнорируются, если предыдущее предложение уже не содержится в реферате.

Рассмотрим метод более подробно. Для набора документов $D=\{D_i\}$, где $\mathbf{T}_i$ – тема документа D_i вычисляется матрица $\Xi = \{\xi_{i,j}\}$, где столбцы соответствуют векторам ранга соответствующих предложений относительно заданных тем. Например, для кластера из двух документов по два предложения, первое и третье из которых используются как темы:

$$\Xi = \begin{matrix} \xi_{1,1} & \xi_{1,2} & \xi_{1,3} & \xi_{1,4} \\ \xi_{2,1} & \xi_{2,2} & \xi_{2,3} & \xi_{2,4} \\ \xi_{3,1} & \xi_{3,2} & \xi_{1,3} & \xi_{3,4} \\ \xi_{4,1} & \xi_{4,2} & \xi_{4,3} & \xi_{4,4} \end{matrix}, \Xi = \begin{matrix} \mathbf{0,9} & \mathbf{0} & \mathbf{0,12} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0,7} & \mathbf{0} & \mathbf{0,33} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0,3} & \mathbf{0} & \mathbf{0,7} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0,21} & \mathbf{0} & \mathbf{0,5} & \mathbf{0} \end{matrix},$$

где $\xi_j = \{\xi_{1,j}, \xi_{2,j}, \xi_{3,j}, \xi_{4,j}\}^{\mathrm{T}}$ – вектор ранжирования предложений кластера относительно предложения j (темы $\mathbf{T}_i$). Если для ранжирования используется метод Manifold Ranking, то ξ_j вычисляется итеративно:

$$\overline{\xi}_j(t+1) = \alpha \cdot S \cdot \overline{\xi}_j(t) + (1-\alpha)\overline{y}_j,$$

где вектор $\overline{y}_j = [y_j^0 y_j^1, .. y_j^n]^{\mathrm{T}}$, где $y_j^j = 1$, и $y_j^i = 0, i \in (1,n)$, $i \neq j$ для всех остальных предложений; α – коэффициент передачи ранга от источника; S – нормализованная матрица связей между предложениями. Традиционно в качестве матрицы связей использовалась:

$$\mathbf{W}_{\mathbf{i,j}} = \mathbf{sim}(\overline{\mathbf{x}_\mathbf{i}}, \overline{\mathbf{x}_\mathbf{j}}),$$

где

$$\mathbf{sim}(\overline{\mathbf{x}_\mathbf{i}}, \overline{\mathbf{x}_\mathbf{j}}) = \frac{\overline{\mathbf{x}_\mathbf{i}} \cdot \overline{\mathbf{x}_\mathbf{j}}}{\|\mathbf{x}_\mathbf{i}\| \cdot \|\mathbf{x}_\mathbf{j}\|},$$

$$\mathbf{x}_\mathbf{i} = [tf_0, tf_1, .. tf_n]^{\mathrm{T}},$$

где t_{fk} – стандартная TF-IDF мера относительной важности терма t_k. В [5] предложена модификация $\mathbf{W} = \lambda_1 \cdot \mathbf{W}_{inner} + \lambda_2 \cdot \mathbf{W}_{intra}$ для учёта различных весов связей предложений одного документа и разных документов и $S = D^{-1/2} \cdot W \cdot D^{-1/2}$ для симметричной нормализации полученной матрицы. Автором была предложена и реализована следующая модификация матрицы $\mathbf{W}$:

$$\mathbf{W} = \lambda_1 \cdot \mathbf{W}_{inner} + \lambda_2 \cdot \mathbf{W}_{intra} + \zeta \cdot \mathbf{W}_{path},$$

где $\mathbf{W}_{path}$ – матрица весов удалённости предложений друг от друга в тексте.

Далее матрица Ξ подвергается симметричной нормализации:

$$\widetilde{\Xi} = \mathbf{Z}^{-1/2} \cdot \Xi \cdot \mathbf{Z}^{-1/2},$$

где $\mathbf{Z}$ – диагональная матрица, каждый элемент которой равен сумме элементов соответствующей строки исходной матрицы Ξ.

В результате этого строки матрицы Ξ содержат коэффициенты соответствия предложений кластера заданным темам документов:

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}_\mathbf{i}) = \sum_{\mathbf{j}=1}^{\mathbf{n}} \widetilde{\Xi}_{\mathbf{i,j}} \cdot \mathbf{T}_\mathbf{j}$$

Например, для вышеприведённого кластера:

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}_1) = \mathbf{0,9} \cdot \mathbf{T}_1 + \mathbf{0,1} \cdot \mathbf{T}_3.$$

Формально, это означает, что предложение x_1 отражает 0,9 темы $\mathbf{T}_1$ (собственной темы) и 0,1 темы предложения x_3 ($\mathbf{T}_3$).

Алгоритм формирования связного текста итогового реферата. Для формирования связного текста итогового реферата используется следующий алгоритм:

1. На главной диагонали матрицы Ξ выделяется элемент, имеющий наименьшее значение. Это соответствует теме документа, наиболее сильно связанной с другими предложениями кластера. Эта тема используется как текущая основная тема $\mathbf{T}_{current}$ и выносится в заголовок итогового реферата.

2. Главная диагональ матрицы обнуляется.

3. В current-столбце матрицы Ξ определяется элемент $\xi_{i,current}$ с наибольшим значением. Это соответствует нахождению предложения x_i, наиболее близкого теме $\mathbf{T}_{current}$.

4. Предложение x_i помещается в итоговый реферат.

5. Для уменьшения ранга предложений, которые похожи на x_i, а также тем, которые уже нашли отражение в итоговом реферате, выполняется следующая процедура:

$$\xi_{i,j} = \xi_{i,j} - \omega \cdot \overline{S}_{i,current} \cdot \xi_{current}^{*},$$

где ω – коэффициент усечения похожих предложений (новизны); $\xi_{current}^{*}$ – первоначальное значение вектора-столбца $\xi_{current}$.

6. В *i*-й строке матрицы выполняется поиск элемента ξ_{next} с наибольшим значением. Исходя из $\mathbf{T}(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{n} \tilde{\Xi}_{i,j} \cdot \mathbf{T}_j$ выполняется поиск следующей темы $\mathbf{T}_{next}$, отражённой в предложении x_i следующей по значимости после $\mathbf{T}_{current}$.

7. Процесс переходит на шаг 3 ($\mathbf{T}_{current} = \mathbf{T}_{next}$), пока объём итогового реферата не достигнет требуемой величины.

Кроме того в алгоритме предложения, содержащие анафорические связи, игнорируются в том случае, если предыдущее предложение документа не было включено в реферат на предыдущем шаге.

Реализация. Для научно-исследовательских целей автором был разработан программный комплекс для ручного и автоматического сводного реферирования на базе предложенного алгоритма тематического связанного ранжирования и оценки качества полученных сводных рефератов. Кроме данного алгоритма в системе были реализованы такие алгоритмы, как BasicLines [6], Manifold Ranking [7], модифицированный алгоритм Manifold Ranking [7]. Созданный автором программный комплекс «MDS Evaluation» позволяет решать следующие задачи:

1. Производить автоматическое сводное реферирование в широком диапазоне различных параметров для различных нужд.
2. Производить ручное сводное реферирование в многопользовательском режиме.
3. Производить ручную и автоматическую оценку качества сводного реферирования.
4. Сравнивать эффективность различных алгоритмов и методов.

Оценка. Традиционные методы оценки качества сводного реферирования включают в себя оценку сводного реферата по ряду критериев специалистами-лингвистами. К таким критериям относятся связность полученного текста, краткость (лаконичность), грамматическая правильность, сложность восприятия, содержание.

Однако даже простая ручная оценка качества сводного реферирования по нескольким критериям требует больших объёмов человеческих ресурсов (согласно DUC, более 3000 ч работы лингвистов), что очень дорого. Одной из наиболее удачных реализаций систем для автоматической оценки качества сводного реферирования можно считать пакет ROUGE [8], используемый в DUC. Набор программ позволяет автоматически рассчитывать различные метрики ROUGE (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation): ROUGE-N, ROUGE-L, ROUGE-W, ROUGE-S, ROUGE-SU. Автором были реализованы алгоритмы оценки ручных и автоматических рефератов с помощью данных автоматических метрик для русского языка.

Для экспериментальной оценки качества работы предложенного автором метода реферирования была проведена ручная и автоматическая оценка рефератов, полученных различными методами а также было выполнено построение ручных рефератов. В эксперименте приняло участие тринадцать человек (преподаватели и студенты пятого курса БГТУ «Военмех»). Эксперимент состоял из двух частей: построение ручных рефератов и их оценка. Исходными данными послужили двенадцать отобранных вручную новостных кластеров различной тематики («Россия», «Происшествия», «Наука и техника», «Спорт», «Культура» и др.) из системы «Google. News» за 2009 г. Участниками эксперимента было построено 156 ручных рефератов: каждый участник составил свой ручной сводный реферат для каждого кластера. Каждый из участников оценил все сводные рефераты (всего было получено 156 ручных и 2600 автоматических, полученных различными методами с различными параметрами) по набору формальных критериев. Кроме того была проведена автоматическая оценка всех сводных рефератов по метрикам ROUGE, для чего были использованы рефераты, построенные вручную. Результаты оценки приведены в таблице.

BL – Усреднённое значение для BasicLines (BL-1 – BL-7) – заведомо плохие рефераты [6].

Manifold – Метод Manifold Ranking [7]. Параметры: $\alpha = 0{,}8$; $\lambda1/\lambda2 = 3$; $\omega = 50$.

Модифицированный Manifold – модифицированный метод Manifold Ranking [7]. Параметры: $\alpha = 0{,}8$; $\lambda1/\lambda2 = 0{,}3$; $\omega = 50$.

МТСР – метод тематического связанного ранжирования, предложенный автором. Параметры: $\alpha = 0{,}9$; $\lambda1/\lambda2 = 0{,}3$; $\omega = 50$; $\zeta = 0{,}1$.

Ручное реферирование, несомненно, имеет ряд преимуществ перед автоматическим. Однако помимо крайне высокой стоимости построе-

Сравнительные результаты ручной и автоматической оценки методов сводного реферирования

	BL	Manifold	Модифицированный Manifold	MTCP	Ручные
Связность	0,42	0,69	0,73	0,81	0,88
Содержание	0,45	0,78	0,78	0,83	0,84
Полнота	0,45	0,78	0,80	0,82	0,84
Общее впечатление	0,41	0,71	0,78	0,85	0,86
ROUGE-1	0,26	0,39	0,40	0,41	0,38
ROUGE-2	0,11	0,18	0,18	0,19	0,17
ROUGE-3	0,07	0,12	0,12	0,12	0,12
ROUGE-L	0,22	0,33	0,34	0,36	0,33

ния рефератов имеет и ряд других недостатков. К ним относятся: невозможность оперативного составления рефератов для очень большого количества исходных документов или документов большого объёма; невозможность оперативного составления различных рефератов с заданными свойствами (например, объём реферата); элементы субъективности, присутствующие в конечном реферате (каждый эксперт выделяет те или иные значимые элементы и т. д.), и ряд других. Предложенный автором метод открывает возможность для построения сводных рефератов, представляющих связный текст в автоматическом режиме без использования сложных и труднодоступных лингвистических ресурсов и больших вычислительных мощностей. При этом эффективность метода и качество полученных сводных рефератов подтверждаются экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 7.9–95. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация. Общие требования. 2001. URL: http://www.standards.ru/document/4155011.aspx (дата обращения: 01.02.2010)

2. **Luhn H.P.** The Automatic Creation of Literature Abstracts // IBM Journal. 1958. Apr. P. 159–165.

3. **Лукашевич Н.В., Добров Б.В.** Автоматическое аннотирование новостных кластеров на основе тематического представления // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. По матер. ежегодной Междунар. конф. «Диалог». 2009. Вып. 8 (15).

4. **Абрамова Н.Н., Абрамов В.Е.** Автоматическое составление обзорных рефератов новостных сюжетов // Тр. IX Всерос. науч. конф. «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» - RCDL'2007. Переславль-Залесский, 2007.

5. **Xiaojun Wan, Jianwu Yang, Jianguo Xiao.** Manifold-Ranking Based Topic-Focused Multi-Document Summarization // DUC 2003. URL: http://www.ijcai.org/papers07/Papers/IJCAI07-467.pdf

6. **Тарасов С.Д.** Исследование и оптимизация параметров алгоритма Manifold Ranking на основе метрики автоматической оценки качества обзорного реферирования ROUGE-RUS // Тр. XI Всерос. науч. конф. «Электронные библиотеки. Перспективные методы и технологии, электронные коллекции». Петрозаводск, 2009. С. 86–93.

7. **Тарасов С.Д.** Автоматическое составление обзорных рефератов новостных сюжетов // Вестник БГТУ. СПб., 2008. № 3. С. 61–67.

8. **Chin-Yew Lin.** ROUGE: A Package for Automatic Evaluation of Summaries. Information Sciences Institute // University of Southern California, 2004.

УДК 622.232.8.72

К.С. Шоланов, М.И. Арпабеков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА

Угледобывающая отрасль Казахстана, пережив нелёгкие времена, сегодня занимает ключевые позиции в экономике страны. С начала независимости Республики Казахстан шахтёрами страны добыто свыше 1 млрд 200 млн т «черного золота».

По подтверждённым запасам угля Казахстан занимает восьмое место в мире и содержит в недрах 4 % от общемирового объёма запасов, а среди стран СНГ занимает третье место по запасам и первое место – по добыче угля на душу населения [3]. Наиболее ценные для промышленности энергетические и коксующиеся угли сосредоточены на шестнадцати месторождениях.

Основная добыча угля в бассейне приходится на пологие пласты с углом падения до 18°, а добыча угля из наклонных и крутонаклонных пластов составляет не более 7 %, тогда как их запасы превышают 28 %. В последнее время в связи с экономическим кризисом возникла необходимость вновь вернуться к разработке крутонаклонных и крутых пластов. Поэтому проблема разработки локальных участков со сложными горногеологическими условиями с применением селективной выемки приобретает особую актуальность.

Совершенствование технологии и средств разработки полезных ископаемых обусловлено совокупным влиянием различных факторов: горнотехнических, организационных, природных; концентрацией энергии в одной точке очистного забоя мощностью до 500 кВт, что увеличивает вес и габаритные размеры очистных комбайнов. Эти обстоятельства не позволяют создать в очистном забое поточную технологию добычи полезных ископаемых, которая на данном этапе может считаться наиболее совершенной. В связи с этим изыскание и разработка конструкций облегченных маневренных выемочных машин фронтально-флангово-избирательного действия типа ВМФ (выемочный манипулятор фронтальный) для выемки угля на пологих, наклонных и крутонаклонных пластах со сложными горногеологическими условиями являются актуальной проблемой. В настоящее время созданием и совершенствованием таких машин занимается совместно с КазНТУ им. Сатпаева и ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, КарГТУ, разработавший безредукторную машину фронтально-флангово-избирательного действия и различные стреловидные, облегченные (до 5 т), маневренные выемочные машины фланговофронтально-избирательного действия типа ВМФ-5 и ВМФ-6.

В статье рассматривается задача определения обобщенных сил, соответствующих каждой обобщенной координате горного автоматического манипулятора ВМФ. Решение поставленной задачи будет основано на уравнениях Лагранжа второго рода в виде:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j, \ (j = 1, ..., N). \qquad (1)$$

В уравнениях (1) L = К – П – функция Лагранжа (кинетический потенциал); К – кинетическая энергия системы; П – полная потенциальная энергия системы; q_j – обобщенная координата, соответствующая j-й обобщенной силе Q_j. Обобщенные координаты стержневой функциональной группы (СФГ) установлены в работе [2] при исследовании кинематики, их число равно трём для каждой из СФГ.

В рассматриваемых манипуляторах типа ВМФ-6 в качестве обобщенных координат, кроме обобщенных координат СФГ, принят также угол поворота режущей коронки при ротации вокруг собственной оси.

Искомая обобщенная сила Q_i в общем случае представляет некоторую гипотетическую силу, которая, будучи приложена к звену, изменяет заданным образом соответствующую обобщенную координату. В рассматриваемом случае предполагается, что приводы встроены в кинематические пары. Через обобщенные силы легко определяются усилия или моменты приводов.

При кинематическом исследовании механической системы, изложенном в работах [2, 3], центр масс в общем случае не совпадает с началом систем координат. Кинетическая энергия звеньев СФГ при этом может быть определена согласно теореме Кёнига [4]. Чтобы применить теорему Кёнига, вначале устанавливаются некоторые кинематические параметры i-звена.

Скорость центра масс i-го звена равна геометрической сумме скорости поступательно движущегося полюса $\overline{v}_{i-1}$ и скорости в относительном движении относительно полюса $\overline{v}_i^r$, т. е.:

$$\overline{v}_{is} = \overline{v}_{i-1} + \overline{v}_i^r. \qquad (2)$$

С применением равенства (2) может быть получено следующее выражение для кинетической энергии i-го звена манипулятора:

$$\mathrm{K}_i = \mathrm{K}_i^r + m_i \overline{v}_{i-1} \overline{v}_i^r + m_i \overline{v}_{i-1}^2 /2, \qquad (3)$$

где K_i^r – кинетическая энергия i-го звена в относительном движении по отношению к поступательно движущейся системе отсчёта с началом в центре масс; m_i – масса i-го звена; $\overline{v}_{i-1}$ – скорость начала подвижной системы отсчёта (полюса); $\overline{v}_i^r$ – скорость центра масс по отношению к движущейся системе.

Чтобы получить выражение кинетической энергии в матричном представлении, каждое из слагаемых в равенстве (3) представляется в виде матриц на основе матриц однородного преобразования. Система координат определяется путём дифференцирования матричного равенства Относительно базовой системы координат положение характеристической точки M последнего от основания звена для каждого из СФГ определяется в общем виде векторным равенством:

$$r_м = T_i\, r^3_м, \qquad (4)$$

где $r_м = (x_м, y_м, z_м, 1)^T$ – расширенный вектор однородной координаты точки M относительно базовой системы координат; $r^3_м = (x^3_м, y^3_м, z^3_м, 1)^T$ – вектор, составленный из однородных координат точки M относительно системы координат O_3, X_3, $У_3$, Z_3 связанной со звеном 3.

Скорость начала i–1 системы координат определяется в виде выражения:

$$v_i = \frac{d}{dt}(T_i, r_i) = \left[\sum_{j=1}^{i} \frac{dT_i}{dq_j} q_j\right] r_i. \qquad (5)$$

Здесь $v_i = (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}, 0)^T$ – расширенный вектор-столбец, составленный из проекций скорости точки i-го звена на оси неподвижной системы координат; $r_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T$ – расширенный вектор-столбец, элементами которого являются координаты точки, принадлежащей i-му звену; $q_j - j$ – обобщенная координата ($j = 1, ..., W$); W – степень подвижности манипулятора ВМФ-6 [3].

В соответствии с [5] скорость начала i–1 системы координат:

$$\overline{v}_{i-1} = \dot{T}_{i-1}\,(0\ \ 0\ \ 0\ \ 1)^T,\ (i = 2, ..., n). \qquad (6)$$

Здесь n – число звеньев манипулятора ВМФ-6. При i=1, следует принять $v_0 = 0$.

Производная от матрицы преобразования $\dot{T}$ согласно уравнению позволяет установить, что матрица преобразования равна произведению матриц кинематических пар: $T_i = A_1 A_2 ... A_{n-1} A_n$, где n – число кинематических пар. Если учесть [2], что при $j \le i$:

$$U_{ij} = \frac{dT_i}{dq_j} = A_1 A_2 \ldots \Omega_j A_j \ldots A_i, \qquad (7)$$

то уравнение (7) равно:

$$\dot{T}_{i-1} = \sum_{j=1}^{i} U_{ij} \dot{q}_j,\ (i = 2, ..., n),$$

где $U_{ij} = A_1 A_2 ... A_{j-1} \Omega_j A_j ... A_i$, причём сомножители A_i и Ω_i определены в работе [2]. Относительная скорость $\overline{v}_i^r$ определяется из следующего соотношения:

$$\overline{v}_i^r = k\dot{q}_i \overline{z}_{i-1} + (1-k)(\dot{q}_i \overline{z}_{i-1} \cdot \overline{r}_{is}), \qquad (8)$$

где коэффициент k = 1, если i-я кинематическая пара поступательная и k = 0, если кинематическая пара вращательная; $\overline{r}_{is}$ – радиус-вектор определяющий положение центра масс i-го звена в системе координат, связанной с i-м звеном.

Следует отметить, что ниже во всех формулах принято начальное значение i = 2. Орт оси $\overline{z}_{i-1}$ в неподвижной системе координат определяется в следующей матричной форме:

$$\overline{z}_{i-1} = T_{i-1}(0\ \ 0\ \ 1\ \ 1)^T. \qquad (9)$$

Векторное произведение в равенстве (7) можно представить в виде следующей матрицы-столбца:

$$\overline{z}_{i-1}\,\overline{r}_{is} = \overline{V}_i = \begin{pmatrix} (z_{i-1})_y (r_{is})_z - (z_{i-1})_z (r_{is})_y \\ (z_{i-1})_z (r_{is})_x - (z_{i-1})_x (r_{is})_z \\ (z_{i-1})_x (r_{is})_y - (z_{i-1})_y (r_{is})_x \\ 1 \end{pmatrix}, \qquad (10)$$

здесь $(\overline{z}_{i-1})_{x,y,z}$ – элементы матрицы (7); $(r_{is})_{x,y,z}$ – координаты центра масс в системе координат i-го звена.

С учётом полученных равенств (8–10), второе слагаемое в выражении для кинетической энергии (3) принимает в матричной форме следующий вид:

$$K_i^{\circ} = m_i \bar{v}_{i-1} \bar{v}_i^r = m_i [k\dot{q}_i (0 \;\; 0 \;\; 1 \;\; 1) T_{i-1}^T + \\ + (1-k)\dot{q}_i V_i^T] \sum_{J=1}^{i-1} (U_{i-1} \dot{q}_j)(0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 1)^T. \quad (11)$$

Кинетическая энергия *i*-го звена относительно к поступательно движущейся системе координат с началом в точке O_{i-1} равна [2]:

$$\mathrm{K}_i^r = \left(J_x \omega_x^2 + J_y \omega_y^2 + J_z \omega_z^2 - 2J_{xy}\omega_x\omega_y - \right. \\ \left. - 2J_{yz}\omega_y\omega_z - 2J_{zx}\omega_z\omega_x\right)/2. \quad (12)$$

В том случае, когда моменты инерций относительно осей координат с началом в центре масс и осями параллельными соответствующим осям координат $O_{i-1}X_{i-1}$,$O_{i-1}Y_{i-1}$,$O_{i-1}Z_{i-1}$ известны, матрица инерции равна

$$H_i = \begin{pmatrix} \mathrm{J_x} & -\mathrm{J_{xy}} & -\mathrm{J_{xz}} \\ -\mathrm{J_{yx}} & \mathrm{J_y} & -\mathrm{J_{yz}} \\ -\mathrm{J_{zx}} & -\mathrm{J_{zy}} & \mathrm{J_z} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

С учётом (13), выражение (11) для кинетической энергии K_i^r в матричной форме получает вид:

$$\mathrm{K}_i^r = (\bar{\omega}_i)^T (H_i \bar{\omega}_i). \quad (14)$$

В выражении (14) компоненты вектора-столбца $\bar{\omega}_i$ угловой скорости вращения вокруг мгновенной оси проходящей через центр масс, вычисляются на основании рекуррентных формул, угловая скорость *i*-системы координат $(\bar{\omega}_i)$ определяется как геометрическая сумма угловой скорости $(\bar{\omega}_{i-1})$ в переносном движении *i*–1 системы координат относительно условно неподвижной системы и угловой скорости собственного вращения *i*-системы координат $(\bar{\omega}_i^r)$:

$$\bar{\omega}_i = \bar{\omega}_{i-1} + \bar{\omega}_i^r. \quad (15)$$

Уравнение (15) с учётом введённых обозначений:

$$\bar{\omega}_i = \bar{\omega}_{i-1} + (1-k)\dot{q}_i R_{i-1} (0 \;\; 0 \;\; 1)^T, (i = 1, ..., n). \quad (16)$$

В начале вычислений при $i = 1$ следует считать $\bar{\omega}_0 = (0 \;\; 0 \;\; 0)^T$. При выводе выражения для K_i^r используются матрицы размерностью (3x3), (1x3). Так, например, матрица угловой скорости имеет следующий вид:

$$\bar{\omega}_{i-1} = \left(\bar{\omega}_{i-1,x} \; \bar{\omega}_{i-1,y} \; \bar{\omega}_{i-1,z}\right)^T,$$

где элементами матрицы являются проекции угловой скорости *i*–1 звена на оси неподвижной системы координат. В равенстве (16) R_{i-1} в результате перемножения получена матрица *i*-й кинематической пары путём вычеркивания четвёртого столбца и четвёртой строки

$$A_i = \begin{pmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & s_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Кинетическую энергию *i*-го звена в его поступательном движении с *i*–1 звеном можно выразить через матрицы однородного преобразования:

$$\mathrm{K}_i^{\Pi} = m_i (0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 1) \dot{T}_i^T \dot{T}_i (0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 1)^T/2. \quad (18)$$

С помощью матриц однородного преобразования и с применением формул (3, 11, 12, 18) можно получить выражение для кинетической энергии i-го звена в виде:

$$\mathrm{K}_i = (\bar{\omega}_i)^T (H_i \bar{\omega}_i) + \\ + m_i (0 \; 0 \; 0 \; 1) \dot{T}_i^T \dot{T}_{i-1} (0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 1)^T/2 + \\ + m_i \left[k\dot{q}_i (0 \;\; 0 \;\; 1 \;\; 1) T_{i-1}^T + \right. \\ \left. + (1-k)\dot{q}_i V_i^T\right] \sum_{J=1}^{i-1} (U_{i-1}\dot{q}_j) (0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 1)^T. \quad (19)$$

Полученная формула упрощается при $i = 1$. Действительно, в этом случае звено совершает одно из простейших движений – вращательное или поступательное, – и кинетическая энергия определяется по формулам, известным из механики.

Вычисление кинетической энергии начинается со звеньев, расположенных у основания СФГ. Кинетическая же энергия СФГ в целом определяется как сумма кинетических энергий звеньев, из которых составлена данная СФГ:

$$\mathrm{K}_{\text{сфг}} = \sum_1^n \mathrm{K}_i, \quad (20)$$

где $n \le 3$.

Полученные результаты используются в дальнейшем для вычисления кинетической энергии манипулятора горного автоматического выемочного типа ВМФ-6 в целом и для решения поставленной задачи определения усилия приводов с помощью уравнений Лагранжа второго рода.

В рассматриваемом в статье шестиподвижном механизме ВМФ-6 максимальная нагрузка в приводной паре при массе груза со схватом $m = 100$ кг составляет 2851 Н (схват с вылетом) и 2107 Н (схват между опорами). Предполагаемая мощность приводного двигателя в данном случае равна 2,8 кВт. Для сравнения, потребляемая мощность робота «Версатран 500» составляет 7,5 кВт при массе груза 9 кг. При этом масса робота равна 590 кг.

Полученные результаты расчётов свидетельствую о том, что в данном случае максимальное усилие в приводной паре в три раза больше нагрузки на выходном звене. Таким образом, строение шестиподвижного механизма с замкнутой кинематической цепью позволяет уменьшить усилие в приводных парах по сравнению с трёхподвижным механизмом с незамкнутой кинематической парой в четыре раза, а по сравнению с шестиподвижным механизмом и с незамкнутой кинематической цепью – в тридцать и более раз. Расчёты подтверждают предположение о том, что роботы, исполнительными механизмами которых служит горный выемочный манипулятор ВМФ-6, имеют меньшую массу и являются менее энергоёмкими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шахинпур М.** Основы робототехники / Пер. с англ. С.С. Дмитриева. М.: Мир, 1990. 527 с.

2. **Шоланов К.С.** Анализ и синтез многоподвижных исполнительных механизмов роботов с замкнутыми кинематическими цепями // Дис. … д-ра техн. наук, КазНТУ. 2000. 246 с.

3. **Ермеков Т.Е., Шоланов К.С., Арпабеков М.И.** Научные основы решения, а также обоснование параметров горных и строительных робототехнологических комплекесов // Монография. Алматы: Эверо. 2009. 272 с.

4. Лурье А.И. Аналитическая механика. М., 1961. 410 с.

УДК 621.39

И.А. Кулешов, М.А. Дуплинский, Ю.А. Малахов

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ

На этапе проектирования любой сложной системы, какой, несомненно, является современная сеть связи, одним из важных вопросов является выбор метода её моделирования. В литературе [1–3, 15–17] приводится масса аргументов в пользу различных методов. Это позволяет утверждать, что проектирование представляет собой сложный процесс, содержащий несколько взаимосвязанных видов моделирования, а именно: системное, функциональное, структурное, техническое и т. д. Отсюда следует, что в основе большого числа методов моделирования лежит, в т. ч., и различие в целевых функциях, формулируемых на этапе вербального описания современной сети связи. Выбор метода моделирования зависит не только от природы сети, но и от цели моделирования, требуемой адекватности получаемых результатов, ограничений на время моделирования и т. д.

Для анализа современных сетей связи достаточно широко применяется математическое моделирование [1–6, 17]. Это обусловливается невозможностью или высокой стоимостью проведения натурных экспериментов, а также сложностью и уникальностью объектов и процессов функционирования современных сетей связи. Моделирование, как метод исследования, отличается многофункциональностью и многообразием способов использования [13–17], это позволяет применять его на различных этапах проектирования современных сетей связи.

На этапе системного анализа моделирование выступает в качестве средства оценки альтернативных проектов создаваемых сетей. В этом случае осуществляется создание модели сети для различных вариантов её построения, исследование этой модели, получение оценок предполагаемых свойств и значений параметров и выдача рекомендаций разработчику. Таким образом, сама методика системного анализа практически может быть реализована на основе методов математического моделирования.

На этапах синтеза структуры сети моделирование выполняет функцию универсального средства поддержки разработки. Модель обеспечивает работы по декомпозиции сети, разработке отдельных составных частей и последующему их комплектованию.

И, наконец, необходимость достижения требуемого качества проектируемой сети вызывает необходимость создания средств сквозного контроля и управления качеством.

При этом качество определяется на основании значений функциональных и конструктивных показателей. В настоящее время отсутствует единый эффективный метод при оценке качества, с точки зрения функциональных показателей, т. к. эти показатели отражают специфику применения и степень соответствия создаваемой сети целевому назначению в динамически изменяющихся условиях применения. Поэтому они весьма различны и зависят от конкретной проектируемой сети, её функций и области применения. На сегодняшний день единственная реальная возможность создания средств оценки функциональных показателей качества – это использование программ-имитаторов внешней среды, отсутствующих элементов сети и внешних воздействий.

Таким образом, в процессе создания перспективных сетей связи целесообразно использовать три типа моделей:

модели анализа альтернативных проектов;

модели поддержки разработки;

модели оценки качества функционирования.

При моделировании современных сетей связи возможно использование различных методов [2, 9, 10, 13, 14, 17]: аналитических, имитационных и экспериментальных.

С помощью аналитических методов можно провести наиболее полное исследование модели. В некоторых случаях наличие аналитической модели делает возможным применение математических методов оптимизации [10]. Для использования аналитических методов необходимо преобразовать математическую модель к виду явных аналитических зависимостей между характеристиками и параметрами сети и внешними воздействиями. Однако это удаётся лишь для сравнительно простых сетей. Применение аналитических методов для исследования сложных сетей связано с большей, по сравнению с другими методами, степенью упрощения реальности и абстрагирования [10, 17]. Поэтому аналитические методы исследования используются обычно для грубой первоначальной оценки характеристик сети, а также на ранних стадиях её проектирования, когда недостаточно информации для построения более точной модели.

Экспериментальные методы, как правило, используются на завершающих этапах (например, в ходе испытаний развернутой сети в опытном районе).

Имитационные методы моделирования являются наиболее универсальными методами исследования сетей и количественной оценки характеристик их функционирования [17]. При имитационном моделировании динамические процессы сети-оригинала подменяются процессами, имитируемыми в абстрактной модели, но с соблюдением таких же соотношений длительности временных последовательностей отдельных операций. В процессе имитационного моделирования фиксируются определённые события и состояния или измеряются выходные воздействия, по которым вычисляют характеристики качества функционирования сети. Используя имитационное моделирование можно реализовать любой алгоритм управления или функционирования сети. Модели, которые допускают исследование аналитическими методами, также могут анализироваться имитационными методами.

Таким образом, методы имитационного моделирования становятся основными методами исследования сложных современных сетей связи [9, 10, 13, 14]. Однако при всех своих достоинствах применение имитационного моделирования вызывает определённые сложности, вытекающие как из методологии системного анализа, так и из особенностей имитации.

Наиболее значимыми являются сложности при доказательстве адекватности модели и при разработке текста имитационной модели.

Проверка адекватности модели сети-оригиналу заключается в анализе её соизмеримости с исследуемой сетью, а также равнозначности сети. Модель не должна быть полным отображением сети, иначе теряется смысл её создания. В процессе создания модели адекватность искусственно искажается в результате ориентации, стратификации, детализации и локализации [10, 17]. Адекватность нарушается из-за идеализации внешних условий и режимов функционирования, исключения тех или иных параметров, пренебрежения случайными факторами. Отсутствие точных сведений о внешних воздействиях, определённых нюансах структуры сети, принятые аппроксимации, интерполяции, предположения и гипотезы тоже ведут к уменьшению соответствия между моделью и сетью [10]. Естественной

простейшей мерой адекватности может служить отклонение некоторой характеристики $Y_{ор}$ оригинала и $Y_{мод}$ модели:

$$\Delta Y = \left| Y_{ор} - Y_{мод} \right| \quad (1)$$

или, что лучше, отношение отклонения к характеристике оригинала:

$$\Delta Y = \frac{\left| Y_{ор} - Y_{мод} \right|}{Y_{ор}}. \quad (2)$$

Тогда считается, что модель адекватна исследуемой сети, если вероятность того, что отклонение ΔY не превысит заданной величины ε, больше допустимой вероятности P_{ε}:

$$P(\Delta Y < \varepsilon) \geq P_{\varepsilon}. \quad (3)$$

Однако практическое использование данного критерия адекватности часто невозможно по следующим причинам [10]. Во-первых, для вновь проектируемых сетей отсутствует информация о значениях характеристики $Y_{ор}$. Во-вторых, сети могут оцениваться не по одной, а по множеству характеристик, у которых может быть разная величина отклонения. В-третьих, сами оцениваемые характеристики могут быть случайными (а часто и нестационарными) величинами и функциями. Поэтому может оказаться, что статистические характеристики, полученные на модели с высокой степенью адекватности, более точны, чем соответствующие характеристики, вычисленные по результатам измерений на реальной сети. Это объясняется тем, что результаты моделирования определяются по большому числу реализаций, в то время как количество измерений на реальной сети всегда ограничено.

Тем не менее, на практике оценка адекватности обычно проводится путём экспертного анализа разумности результатов моделирования [10,11]. Выделяют следующие виды проверок:

проверка моделей элементов (в сомнительных случаях следует детализировать элемент или провести дополнительный анализ);

модели внешних воздействий (принятые предположения, аппроксимации и гипотезы необходимо оценить математическими методами);

концептуальной модели функционирования сети (выявляются ошибки постановки задачи);

формализованной и математической модели;

способов измерения и вычисления выходных характеристик (выявляются ошибки решения);

проверка программной модели (анализируются соответствие операций и алгоритмов функционирования программной и математической модели, проводятся контрольные расчёты при типовых и предельных значениях переменных, выявляются инструментальные ошибки программирования).

Следует также заметить, что разрешение всех этих сложностей осуществляется в целях решения основной (особенно актуальной в последнее время) задачи – снижения затрат на проведение моделирования для увеличения эффекта от применения методов имитационного моделирования в процессе разработки современных сетей связи, а следовательно и повышения экономической эффективности проектируемой сети.

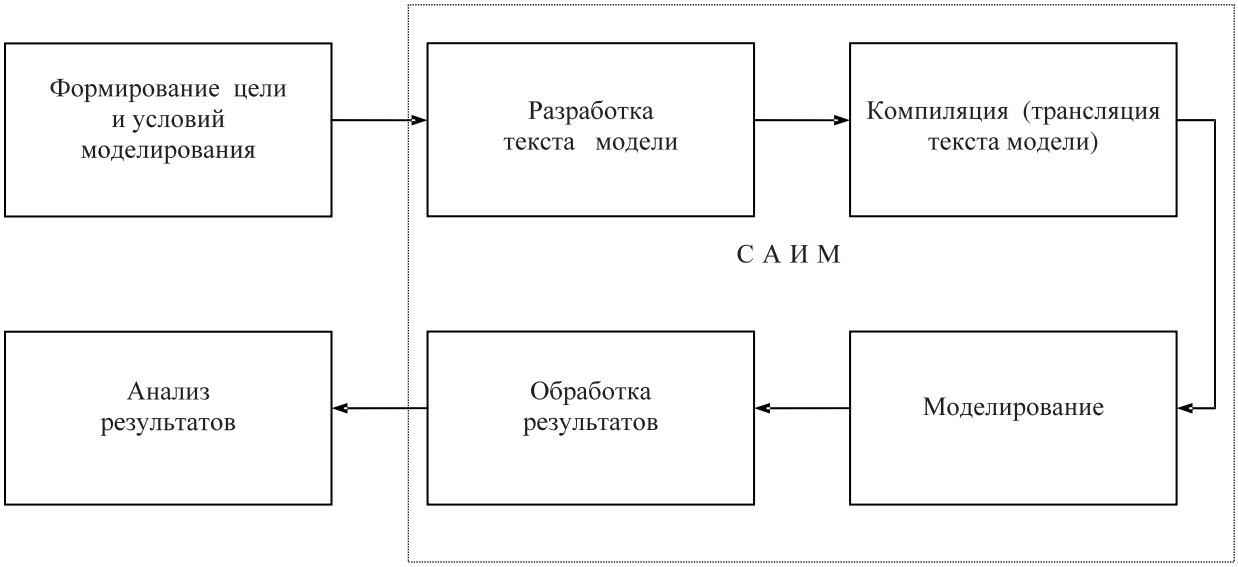
Исходя из вышеизложенного, несомненна актуальность совершенствования инструментальных средств автоматизации имитационного моделирования для повышения эффективности его использования при проектировании современных сетей связи.

Сложность задачи автоматизации моделирования современных сетей связи заключается в том, что затраты на проведение адекватных экспериментов могут быть соизмеримы с затратами на создание сети в целом. С другой стороны, практика проектирования современных сетей связи настоятельно требует обоснования решений с применением систем автоматизации имитационного моделирования (САИМ).

С технологической точки зрения быстро моделировать – значит быстро подготовить программу моделирования и затем быстро, с помощью этой программы, получить результаты [7, 13, 14]. Общая последовательность функционирования САИМ представлена на рисунке.

Из анализа структуры функционирования САИМ очевидно, что время компиляции, моделирования и обработки результатов находится в прямой зависимости от производительности средств моделирования (электронно-вычислительной техники), а время реализации остальных этапов, в общем случае, зависит от применяемых средств имитационного моделирования.

Однако ускорение машинного эксперимента с моделью за счёт её упрощения, как правило, связано с потерей адекватности. Таким образом, основной эффект ускорения моделирования может быть получен за счёт автоматизации построения текста модели и анализа полученных результатов.



Обобщенная последовательность функционирования САИМ

Изначально работы в области создания САИМ были сконцентрированы на создании разнообразных языков имитационного моделирования. В настоящее время, по некоторым оценкам, их свыше пятиста. Языки имитационного моделирования в зависимости от способа описания динамики функционирования сетей могут быть разделены на четыре группы, ориентированные на описания работ, событий, процессов и транзактов.

С точки зрения моделирования современных сетей связи, как СМО наибольший интерес представляют собой языки транзактов. С одной стороны, большую роль играет удобство использования, т. к. в этих языках существуют объекты, позволяющие описывать отдельные элементы и объекты современных сетей связи (например, сообщения в современной сети связи могут быть представлены транзактами, а отдельные элементы сети связи могут быть смоделированы совокупностью таких объектов модели, как приборы, многоканальные устройства, очереди). С другой стороны, эти языки исторически получили большое распространение именно при моделировании сетей связи, и целесообразно использовать весь опыт, накопленный за это время. Однако обычно написанные имитационные модели, как правило, являются уникальными, «закрытыми» для модернизации пользователем, т. е. не позволяющими оперативно интерпретировать результаты, а также изменять (наращивать) модели и состыковывать их в единый комплекс.

С точки зрения проектирования, это направление не потеряло своей актуальности вследствие следующих причин. Во-первых, более сложные САИМ, в основном, базируются на определённых языках имитационного моделирования. Во-вторых, из-за высокой уникальности и сложности проектирования современных сетей связи может оказаться нерентабельной разработка или даже использование существующей САИМ, а, следовательно, единственным возможным способом построения моделей будет использование какого-либо языка имитационного моделирования.

Второе направление тесно связано с созданием универсальной имитационной модели, основанной на использовании агрегативного подхода [11, 12, 15, 17]. Данное направление является наиболее актуальным, т. к. позволяет автоматизировать процесс создания текстов имитационных моделей и использовать уже имеющиеся языки и пакеты прикладных программ (ППП) имитационного моделирования.

Таким образом, при проектировании современных сетей связи целесообразно комплексное применение аналитических и имитационных методов моделирования. Причём аналитические методы исследования необходимо использовать для первоначальной «грубой» оценки характеристик сети, а также на ранних стадиях проектирования, когда недостаточно информации для построения более точной модели. На завершающей стадии проектирования при оценке ВВХ сети связи

необходимо применение имитационных методов моделирования с использованием в качестве базового языка – языка транзакций, и создание на его основе универсальной имитационной модели, в которой заложен алгоритм функционирования сети, а структурные параметры сети задаются исходными данными. Такой подход позволяет на базе существующего пакета прикладных программ имитационного моделирования автоматизировать процесс разработки, написания текста имитационной модели сети и анализ результатов, полученных в ходе проведения эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Построение сетей интегрального обслуживания. Л.: Машиностроение, 1990. 332 с

2. **Лохмотко В.В., Пирогов К.И.** Анализ и оптимизация цифровых сетей интегрального обслуживания. Мн.: Навука і тэхн і ка, 1991. 192 с.

3. **Давыденко В.П., Доронин Е.М., Лоскутов Н.Г.** Основы кибернетики. Л.: ЛВВИУС им. Ленсовета, 1980. С. 57–68.

4. **Головкин В.В., Приходько А.Я. и др.** О технологии разработки специального математического и программного обеспечения АСУ // Концептуальные и методологические основы построения и функционирования автоматизированных систем. Науч.-тех. сб. 27 ЦНИИ, 1991. № 1. С. 3–10.

5. **Снопелев Ю.М., Старосельский В.А.** Моделирование и управление в сложных системах. М.: Сов. радио, 1974. 86 с.

6. **Волкова В.Н. и др.** Теория систем и методы системного анализа в управлении и связи. М.: Радио и связь, 1983. 134 с.

7. **Полляк Ю.Г., Филимонов В.А.** Статистическое машинное моделирование средств связи. М.: Радио и связь, 1988. С.18–56.

8. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. С. 123–138.

9. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1985. 272 с.

10. **Альянах И.Н.** Моделирование вычислительных систем. Л.: Машиностроение, 1988. 223 с.

11. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 156 с.

12. **Бусленко В.Н.** Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М.: Наука, 1983. 240 с.

13. **Кулешов И.А., Боев В.Д.** Основы моделирования систем связи и автоматизации на GPSS/PC. СПб., ВАС, 2001. 228 с.

14. **Кулешов И.А., Боев В.Д.** Основы моделирования систем связи и автоматизации в Delphi 4. СПб., ВАС, 2004. 232 с.

15. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем. Практикум: Учеб. пособ. для вузов / Изд. 2-е, перераб., доп. М.: Высш. шк., 2005. 295 с.

16. **Сирота А.А.** Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем / Мир программирования. Техносфера, 2006. 280 с.

17. **Алгазинов Э.К., Сирота А.А.** Анализ и компьютерное моделирование информационных процессов и систем. Диалог-МИФИ, 2009. 416 с.

УДК 681.3 (075.8)

Е.И. Игнатова

ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Разработка роботов любого назначения (промышленных, космических, подводных, медицинских, военных, социальных) включает в себя проектирование их исполнительных систем (ИС) и систем управления (СУ) [11, 12, 16]. Основное функциональное назначение ИС – воспроизведение движений звеньев робота по траекториям, формируемым системой управления заданным движением схвата или другого рабочего органа. Основной функцией СУ является формирование траекторий движения звеньев робота, обеспечивающих заданное движение схвата или другого рабочего органа. При компьютерном моделировании СУ роботами требуется осуществлять отладку алгоритмов управления и анализировать динамику в различных режимах работы. Однако вопросы исследования динамики СУ роботами различных типов по их адекватным моделям

освещены в литературе по робототехнике в недостаточной степени, поэтому довольно часто проектировщики используют линеаризованные модели приводных систем звеньев (ПСЗ) и упрощенные модели СУ в целом. Упрощенный подход к моделированию процессов, протекающих в многокоординатных СУ, не позволяет достоверно оценивать с помощью ЭВМ реально достижимые точностные показатели роботов.

Анализ ИС роботов

На рис. 1 представлена функциональная схема исполнительной системы манипуляционного робота, где обозначены: ИМ – многозвенный исполнительный механизм; МП – механические передачи; Д – двигатели; СП – силовые преобразователи.

Конструкции механических систем (МС) роботов различных типов (манипуляционных, мобильных, гуманоидных и др.) крайне разнообразны. В качестве приводов звеньев в настоящее время наиболее часто используются электроприводные системы постоянного и переменного тока, которые в совокупности с многозвенной МС типа манипулятора или шасси мобильного робота образуют многомерную ИС с взаимосвязанными каналами управления многокоординатным электромеханическим объектом [7]. В современных роботах приводные системы звеньев (ПСЗ) представляют собой цифровые системы автоматического управления (САУ) с микропроцессорной реализацией регуляторов.

На входы регуляторов приводных систем звеньев подаётся вектор входных воздействий $G(t_n)$, генерируемых (вычисляемых) устройством числового программного управления (УЧПУ) робота, пропорциональных программным значениям вектора обобщенных координат $q(t_n)$. Формируемый цифровыми или аналоговыми регуляторами вектор управляющих воздействий $U(t)$ посредством силовых преобразователей (усилителей мощности), преобразуется в вектор напряжений двигателей $U_Д(t)$. С помощью МП векторы моментов $M_Д(t)$ и угловых скоростей $\omega(t)$ двигателей преобразуются в соответствующие векторы обобщенных сил $Q(t)$ и координат $q(t)$ звеньев робота. Вектор $F(t)$ является вектором внешних сил и моментов, воздействующих на схват при выполнении роботом контактных операций.

Исполнительный механизм создаёт в рабочих координатах робота его текущий вектор состояния $S_C(t)$ в виде вектора проекций положения и ориентации схвата, а также проекций силы и момента, развиваемых схватом. Значения этого вектора зависят от типа кинематической схемы ИМ, которая определяет систему координат (СК), в которой работает робот. Наиболее сложную кинематику и динамику имеют роботы, работающие в вертикально-ангулярной СК.

Приводные системы звеньев представляют собой одномерные одно-, двух- или трёхконтурные САУ с соответствующими датчиками обратных связей, а ИС робота в целом является многомерной системой управления.

Позиционные следящие системы воспроизводят движения звеньев в позиционном и контурном режимах работы робота при входных воздействиях $g_q(t)$, генерируемых системой программного управления для движения схвата по траектории, которой соответствует вектор $G(t)$. Основной функцией систем стабилизации скоростей двигателей $\omega(t)$ является поддержание их на уровнях, заданных входными воздействиями $g_\omega(t)$. Моментные приводные системы используются при выполнении роботом контактных операций, когда требуется регулировать моменты на валах дви-

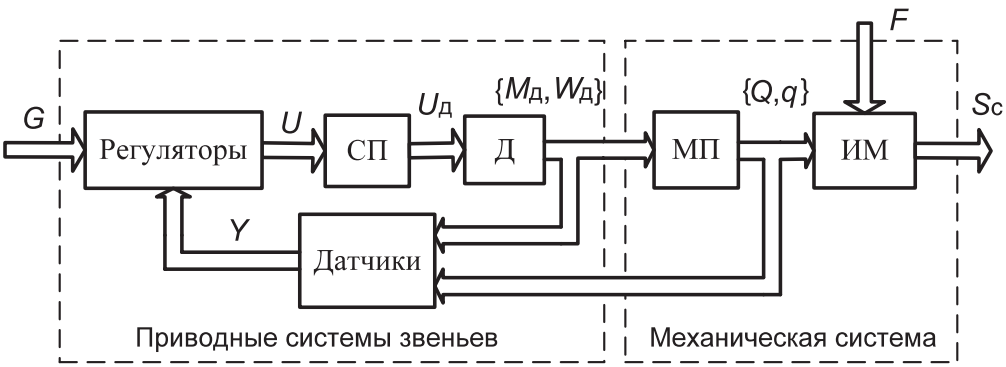


Рис. 1. Функциональная схема ИС

гателей $M_Д(t)$ или непосредственно в шарнирах звеньев $Q(t)$ на уровнях, заданных величинами соответствующих входных воздействий $g_Q(t)$.

В реально существующих ИС роботов:

моментные приводные системы обычно являются внутренними контурами систем стабилизации скоростей двигателей;

системы стабилизации скоростей входят в состав позиционных следящих систем звеньев робота, как контуры скорости;

следящие системы звеньев совместно с механической системой образуют многомерную многосвязную ИС робота, являющуюся составной частью системы программного управления движением робота.

Одноконтурные приводные системы содержат единственный регулятор (момента, скорости или положения), а многоконтурные – несколько регуляторов.

Традиционно в литературе по робототехнике основное внимание уделяется моделированию многомерной нелинейной динамики МС с линеаризованным описанием процессов в ПСЗ [1, 5, 8, 9]. Вопросы анализа ИС с использованием адекватных нелинейных дискретно-непрерывных моделей ПСЗ освещены в недостаточной степени. Однако упрощенный подход к моделированию процессов, протекающих в ИС, не позволяет проектировщикам роботов достоверно оценивать с помощью ЭВМ их реально достижимые динамические и, особенно, точностные показатели.

При компьютерном проектировании ИС объектами моделирования могут быть:

многозвенные МС без учёта ПСЗ;

автономные одномерные ПСЗ;

многомерные ИС в виде совокупности МС и ПСЗ.

На стадии предварительного проектирования *основными задачами моделирования ИС*, решаемыми с помощью ЭВМ, являются (рис. 2):

1) анализ кинематики МС на основе решения прямых и обратных задач (ПЗК и ОЗК);

2) анализ динамики МС без учёта динамики ПСЗ;

3) построение нагрузочных диаграмм ПСЗ при их энергетическом расчёте;

4) анализ переходных процессов в автономных ПСЗ;

5) оценка собственных точностных показателей ПСЗ;

6) моделирование ПСЗ с адекватным воспроизведением внутренних процессов в функциональных устройствах (в силовых и измерительных преобразователях, регуляторах и др.);

7) анализ взаимовлияния ПСЗ в многомерных ИС;

8) имитационное моделирование процессов функционирования ИС в различных режимах работы робота.

Эти задачи тесным образом связаны с синтезом регуляторов ПСЗ и оптимизацией их параметров. Для решения таких задач требуются компьютерные модели различных видов:

алгебраические и дифференциальные, описывающие нелинейную кинематику и динамику МС;

непрерывные и дискретно-непрерывные, воспроизводящие динамические процессы в ПСЗ с аналоговыми и цифровыми регуляторами;

логические и алгоритмические, имитирующие функционирование основных устройств ПСЗ и ИС в целом.

При компьютерном моделировании автономных ПСЗ они рассматриваются как замкнутые САУ со своей собственной нелинейной динамикой. Динамику ПСЗ с аналоговыми и цифровыми регуляторами можно описывать дифференциальными и разностными уравнениями, но более эффективно использовать структурные модели.

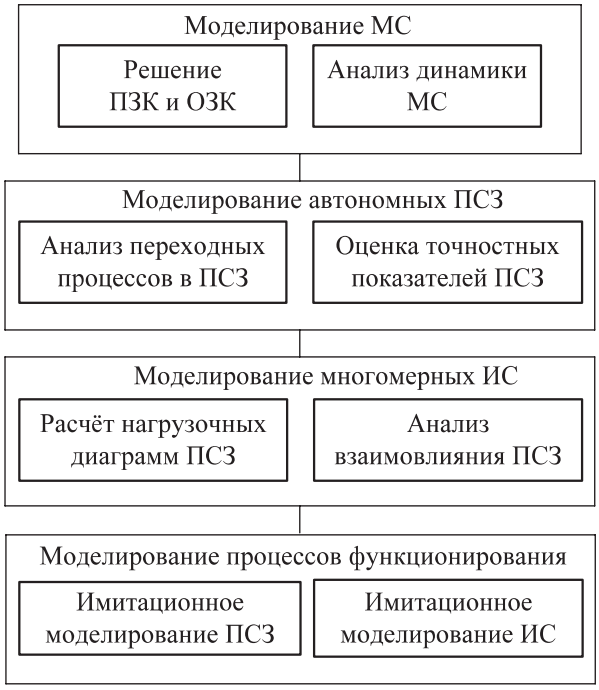


Рис. 2. Задачи моделирования ИС

Структура полной модели ИС, как совокупности замкнутых ПСЗ с регуляторами, изображена на рис. 3, где МОУ – многомерный объект управления с взаимосвязанными каналами; G и q – векторы входных воздействий и выходных (обобщенных) координат соответственно; $Y_{\text{ос}}$ – вектор или матрица обратных связей регуляторов.

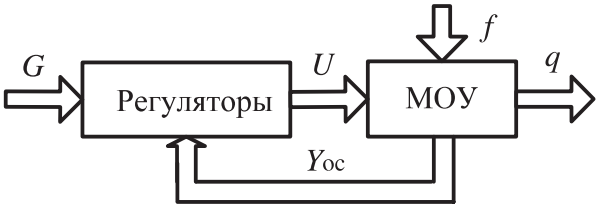


Рис. 3. Структура многомерной модели ИС

Используя уравнение Лагранжа [2, 16], описывающее динамику N-звенной МС робота, и обозначив $(q^{\text{T}}, \dot{q}^{\text{T}})^{\text{T}}$ как $2N\times1$ вектор переменных состояния $X(t) = (X_1^{\text{T}}(t), X_2^{\text{T}}(t))^{\text{T}}$, представим модель МС в форме Коши:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dX_1(t)}{dt} &= X_2(t) \\ \frac{dX_2(t)}{dt} &= A^{-1}(X_1(t))[-B(X_1(t), X_2(t)) - C(X_1(t)) + Q(t)], \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

откуда видно, что МС робота является многомерным нелинейным астатическим объектом управления.

При учёте инерционностей силовых преобразователей и двигателей в ПСЗ, а также упругостей в механических передачах, вектор состояния расширяется, и тогда полная многомерная модель объекта управления ИС описывается системой дифференциальных уравнений более высокого порядка:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F(X(t), U(t), f(t), \theta(t)), \quad (2)$$

где $F(\cdot)$ – нелинейная вектор-функция с размерностью, соответствующей вектору состояния $X(t)$; $U(t)$ – $N\times1$ вектор управления (входов силовых преобразователей); $f(t)$ – вектор внешних возмущений; $\theta(t)$ – вектор нестационарных параметров, таких как изменяющиеся моменты инерции.

При линеаризации (2) динамика МОУ с квазипостоянными параметрами описывается системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dX(t)}{dt} = A_x X(t) + B_u U(t) + B_f f(t), \quad (3)$$

где A_x, B_u и B_f – матрицы постоянных коэффициентов.

Так как в модели МОУ одновременно описываются и медленные механические, и быстрые электрические переходные процессы, её динамика может оказаться жесткой.

Системы вида (2) и (3) будут жесткими, если собственные числа матрицы Якоби $\partial F(X)/\partial X$ или матрицы A_x существенно различаются $\lambda_{\max} >> \lambda_{\min}$ (в 10^4–10^5 и более раз). Для апериодических процессов с постоянными времени $\tau_i = -1/\lambda_i$, жесткость может быть связана с большим их разбросом $\tau_{\min} << \tau_{\max}$.

Компьютерное моделирование объектов с жесткой динамикой на длительных интервалах времени явными численными методами неэффективно по затратам машинного времени из-за ограничений на величину шага интегрирования по условиям устойчивости таких методов. Целесообразнее использовать неявные методы с автоматическим изменением шага интегрирования в процессе моделирования.

Синтез регуляторов ПСЗ обычно проводят по линеаризованным динамическим моделям одномерных ОУ невысокого порядка вида (3), где $U(t) = u_i(t)$ и $f(t) = f_i(t)$ являются скалярными величинами, поэтому B_u и B_f – векторы постоянных коэффициентов.

Методические вопросы моделирования ИС роботов с упругостями в механических передачах, звеньях и схвате рассмотрены в [4].

Исследование СУ роботами

В биотехнических СУ роботами, работающими в экстремальных условиях, целеуказания формируются с помощью специальных задающих устройств и соответствующих спецвычислителей [1, 2, 12, 16]. В таких системах человек-оператор представляет собой динамическое звено в контуре управления, т. к. он непосредственно управляет движением робота с помощью задающего манипулятора (в копирующих системах) или многостепенной управляющей рукоятки (в полуавтоматических системах).

На схеме копирующего манипулятора (рис. 4) звенья кинематически подобных задающего и исполнительного механизмов (ЗМ и ИМ) взаимосвязаны посредством обратимых следящих систем (ОСС), представляющих собой электрические валы двустороннего действия. Человек-оператор, прикладывая к схвату ЗМ вектор сил и моментов $F_з(t)$, перемещает его звенья и формирует тем самым векторы обобщенных сил $Q_з(t)$ и координат

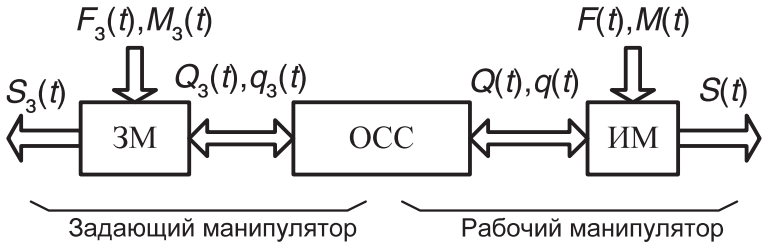


Рис. 4. Функциональная схема копирующего манипулятора

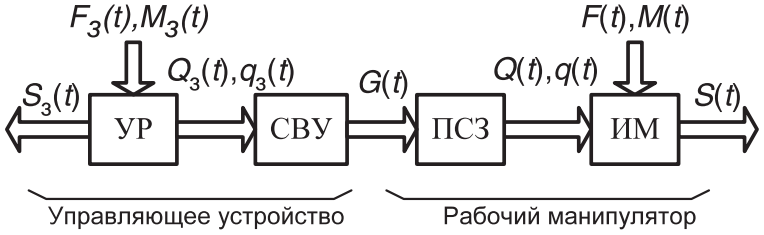


Рис. 5. Функциональная схема полуавтоматической СУ

$q_з(t)$. Через ОСС движения звеньев ЗМ копируются соответствующими звеньями ИМ с векторами обобщенных сил $Q(t)$ и координат $q(t)$. Вектором состояния рабочего манипулятора $S(t)$ является вектор проекций положения и ориентации его схвата, который из-за неизбежных ошибок в ОСС может значительно отличаться от вектора состояния задающего манипулятора $S_з(t)$. При выполнении рабочим манипулятором контактных операций на его схват дополнительно воздействует вектор внешних сил и моментов F.

В полуавтоматической СУ (рис. 5) управляющая рукоятка (УР) и ИМ имеют разные кинематические схемы. Формируемые задающие сигналы, пропорциональные обобщенным координатам $q_з(t)$, скоростям $dq_з(t)$ или силам $Q_з(t)$, преобразуются специализированным вычислительным устройством (СВУ) в вектор входных воздействий $G(t)$, подаваемых на ПСЗ рабочего манипулятора. В зависимости от используемого способа полуавтоматического управления – позиционного, скоростного или силомоментного, ПСЗ могут быть позиционными следящими системами, либо системами регулирования скорости или момента.

Системы программного управления обеспечивают движение звеньев робота в позиционном или контурном режимах, либо выполнение им контактных операций с непосредственным регулированием сил и моментов, развиваемых схватом или другим рабочим инструментом [2, 12]. В общей структуре СПУ (рис. 6) многомерный объект управления (МОУ) с взаимосвязанными каналами представляет собой совокупность ИМ и силовых частей ПСЗ; УП – управляющая программа; УЧПУ – устройство числового программного управления; $G[n]$ – вектор входных воздействий цифровых регуляторов; $U(t)$ – вектор управления; $Y_{ос}(t)$ – вектор или матрица обратных связей; $S(t)$ – вектор выходных координат.

В контурном режиме движение схвата по заданной траектории программируется координатами базовых точек, а на участках между ними с помощью линейно-круговых (ЛК) или сплайн-интерполяторов (СИ) генерируются входные воздействия для ПСЗ, которые реализуют соответствующие программные движения.

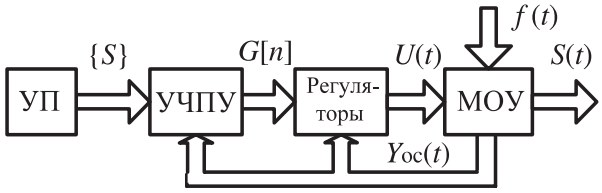


Рис. 6. Общая структура СПУ

В системе (рис. 7) по заданным в УП значениям вектора состояния в базовых точках $\{S\}$ и скоростям на участках между ними с помощью цифрового линейно-кругового интерполятора (ЛКИ) генерируется в дискретном времени программная траектория движения схвата:

$$S(t_n) = S(t_{n-1}) + \Delta S(t_n);$$
$$t_n = t_{n-1} + T_0,$$

где T_0 – период дискретности ЛК-интерполятора.

В процессе решения обратной задачи кинематики (ОЗК) формируются входные воздействия

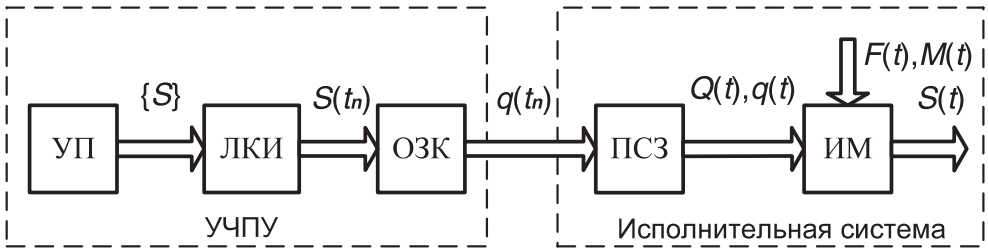


Рис. 7. Функциональная схема СПУ с ЛК-интерполятором

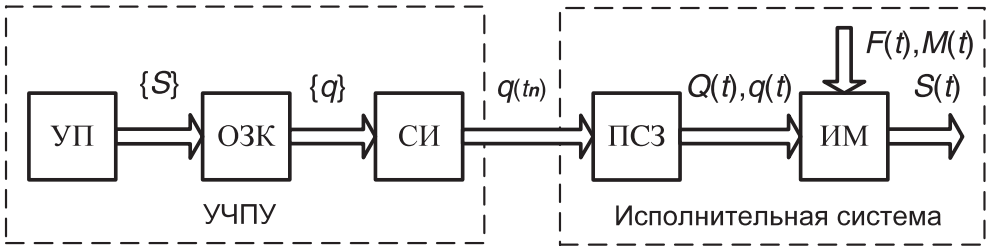


Рис. 8. Функциональная схема СПУ со сплайн-интерполяторами

на ПСЗ, выходы которых преобразуются в рабочие координаты схвата путём неявного решения исполнительным механизмом прямой задачи кинематики (ПЗК), зависящей от типа его кинематической схемы. В случае выполнения роботом контактных операций, вектор $\{S\}$ определяется не только программными значениями координат положения и углов ориентации схвата, но и проекциями силы и момента, которые должны развиваться схватом. При этом составляющие вектора $S(t)$ будут зависеть также от текущих значений вектора проекций внешней силы $F(t)$ и внешнего крутящего момента $M(t)$, действующих на схват.

В системе (рис. 8) до начала движения робота решается ОЗК для программных значений вектора состояния схвата $\{S\}$ в базовых точках, а затем с помощью цифровых сплайн-интерполяторов (СИ) вычисляются в дискретные моменты времени программные значения входных воздействий для ПСЗ с учётом заданных интервалов времени движения звеньев на участках траектории схвата:

$$\{q(t_n);\ t_n = t_{n-1} + T_0\},$$

где T_0 – период дискретности СИ.

Сплайн-интерполяция применяется не только в контурных, но и в позиционных режимах работы СПУ для формирования оптимальных программных законов изменения обобщенных координат на участках разгона и торможения соответствующих ПС.

В представленных на рис. 7 и 8 системах осуществляется независимое управление ПСЗ без учёта нелинейной многосвязной динамики ИМ робота. Такие СПУ с кинематическими алгоритмами управления в целом являются разомкнутыми, поэтому в них неизбежны контурные ошибки при воспроизведении траекторий схвата, особенно на участках движения с большой контурной скоростью.

В системах с многомерными динамическими алгоритмами повышение точности достигается за счёт компенсации действия на ПСЗ переменных нагрузок, обусловленных изменением приведённых моментов инерции и взаимовлиянием звеньев [2, 14–16]. Альтернативой таким системам служат СПУ с адаптивными ПСЗ.

Основными задачами моделирования СУ являются (рис. 9):

1) анализ динамики копирующих СУ с обратимыми следящими системами звеньев;

2) отладка алгоритмов и анализ динамики систем полуавтоматического управления;

3) оценка точностных показателей СПУ с линейно-круговой интерполяцией программных траекторий в пространстве рабочих координат схвата робота;

4) анализ СПУ со сплайн-интерполяторами программных траекторий в пространствах обобщенных координат звеньев;

5) исследование систем согласованного управления приводами звеньев с компенсацией динамики ИМ;

6) анализ динамических возможностей СПУ с адаптивными приводными системами звеньев;

7) исследование детерминированных или стохастических дискретных процессов, описывающих функционирование систем группового программного управления роботизированными технологическими комплексами (СУ РТК).

Для решения сформулированных задач необходимы компьютерные модели различных видов:

кинематические (алгебраические), описывающие нелинейные алгоритмы программного управления;

динамические (дифференциальные), воспроизводящие нелинейные процессы движения многозвенных МС;

непрерывные и дискретно-непрерывные, описывающие линейные и нелинейные процессы в приводных системах с аналоговыми и цифровыми регуляторами;

алгоритмические, отображающие работу СПУ с интерполяторами различных типов;

логические и вероятностные, имитирующие дискретные детерминированные и стохастические процессы в СУ РТК.

Рис. 9. Задачи моделирования СУ

Для адекватного анализа динамических процессов в СУ манипуляторами и роботами и оценивания их реально достижимые точностные показатели в моделях силовых частей ПСЗ и регуляторов необходимо учитывать характерные нелинейности – сухие трения, нечувствительности, элементы насыщения, квантование сигналов по уровню и др. [3].

Функционирование систем управления РТК характеризуется не траекториями движения схватов и рабочих органов, а логическими переходами роботов и другого технологического оборудования из одних установившихся состояний в другие. Происходящие дискретные события в таких системах, связанные со сменами состояний, могут описываться детерминированными или вероятностными законами [2, 13].

При исследовании дискретных процессов наиболее часто применяют три вида моделей:

1) конечно-автоматные, описывающие события таблицами логических переходов;

2) системы массового обслуживания (СМО), позволяющие анализировать стохастические процессы с законами распределения различных типов;

3) модели, использующие сети Петри, удобные для анализа сложных синхронных и протекающих параллельно асинхронных процессов, в т. ч. с учётом фактора времени.

Однако вопросы моделирования СУ РТК требуют особого рассмотрения. Им посвящены, в частности, работы [8, 10].

Для достоверности результатов компьютерного проектирования ИС роботов и СУ роботами необходимо использовать адекватные модели ПСЗ, воспроизводящие динамические процессы в них с достаточной для практики точностью.

Эффективным инструментом для решения задач моделирования РТС является пакет MATLAB. Методики его применения для анализа ИС с использованием различных моделей МС и нелинейных дискретно-непрерывных моделей ПСЗ изложены в [5]. Методики компьютерного исследования биотехнических СУ и СПУ различных типов рассмотрены в [6].

Адекватное моделирование ИС и СУ позволяет исключить при проектировании роботов проведение дорогостоящих натурных экспериментов, а использование анимации даёт возможность визуально оценить контурные ошибки схвата, которые не определить аналитически или не измерить экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / Под ред. В.С. Кулешова и Н.А. Лакоты. М.: Машиностроение, 1986.

2. **Зенкевич С.Л., Ющенко А.С.** Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ, 2000.

3. **Игнатова Е.И., Кочкарев Д.А.** Особенности математического моделирования робототехнических систем// Экстремальная робототехника, нано-, микро- и макророботы. Матер. XX Междунар. науч.-техн. конф. Дивноморское, Россия, 2009.

4. **Игнатова Е.И., Ростов Н.В.** Методика компьютерного исследования динамики существенно гибких многомерных электромеханических систем // Робототехника для экстремальных условий. Матер. VI науч.-техн. конф. СПб.: СПбГТУ, 1996.

5. **Игнатова Е.И., Ростов Н.В.** Компьютерное моделирование исполнительных систем роботов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.

6. **Игнатова Е.И., Ростов Н.В.** Компьютерное моделирование систем управления роботами: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.

7. **Кондратьев А.С., Лопота В.А., Юревич Е.И.** Робототехника и техническая кибернетика. Тенденции и перспективы развития // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2003. № 2.

8. **Лесков А.Г., Ющенко А.С.** Моделирование и анализ робототехнических систем. М.: Машиностроение, 1992.

9. **Лопота В.А., Юревич Е.И.** Экстремальная робототехника и проблемы безопасности, актуальные проблемы защиты и безопасности. // Экстремальная робототехника. Матер. VII Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во НПО спецматериалов, 2004.

10. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств / Под ред. И.М. Макарова // Робототехника и гибкие автоматизированные производства. Кн. 5. М.: Высш. шк., 1986.

11. **Морозов Б.И., Семенов И.М., Юревич Е.И.** Электромеханические исполнительные системы робототехники: Учеб. пособие / Под ред. Е.И. Юревича. СПб: СПбГТУ, 1994.

12. **Морозов Б.И., Станкевич Л.А., Юревич Е.И.** Системы управления роботами: Учеб. пособие. Л.: ЛПИ, 1987.

13. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем: Учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2001.

14. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника: Пер. с англ. / Под ред. В.Г. Градецкого. М.: Мир, 1989.

15. **Шахинпур М.** Курс робототехники: Пер. с англ. / Под ред. С.Л. Зенкевича. М.: Мир, 1990.

16. **Юревич Е.И.** Основы робототехники: Учеб. для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.

УДК 681.3 (075.8)

Е.И. Игнатова, Н.В. Ростов

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РОБОТОВ

В робототехнике для анализа кинематики исполнительных механизмов (ИМ) широкое применение находят алгебраические векторно-матричные модели в представлении Денавита–Хартенберга, использующие однородные координаты. Методы аналитического решения прямых и обратных задач кинематики (ПЗК и ОЗК) с использованием таких моделей описаны в [2, 5–7]. Однако при компьютерном моделировании манипуляционных роботов более эффективными часто оказываются решения, получаемые итерационными методами.

Обсудим вначале общие формулировки прямых и обратных задач кинематики (ПЗК и ОЗК).

Прямые задачи кинематики

ПЗК о положении и ориентации схвата. По заданному $N\times1$ вектору обобщенных координат звеньев:

$$q = (q_1, q_2,..., q_N)^{\mathrm{T}}$$

и известной 6×1 вектор-функции $\Phi(\cdot)$, соответствующей кинематической схеме ИМ робота, определяется 6×1 вектор состояния схвата:

$$S_C = \Phi(q), \qquad (1)$$

где $S_C = (x_C, y_C, z_C, \varphi_C, \theta_C, \psi_C)^{\mathrm{T}}$ – вектор линейных координат положения и угловых координат ориентации схвата.

ПЗК о скоростях схвата. По заданному вектору обобщенных скоростей $\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, ..., \dot{q}_N)^T$ определяется вектор проекций линейной и угловой скорости схвата:

$$\begin{pmatrix} V_C \\ \Omega_C \end{pmatrix} = J(q) \cdot \dot{q}, \qquad (2)$$

где $V_C = (v_x, v_y, v_z)^T$; $\Omega_C = (\omega_\varphi, \omega_\theta, \omega_\psi)^T$.В зависимости от числа звеньев N робота матрица Якоби в (2) может быть квадратной или иметь прямоугольный вид.

ПЗК о силе и моменте в схвате. По заданному $N\times1$ вектору обобщенных сил в шарнирах звеньев $Q = (Q_1, Q_1, ..., Q_N)^T$ определяются составляющие силы и момента в схвате:

$$\begin{pmatrix} F_C \\ M_C \end{pmatrix} = (J^T(q))^{-1} \cdot Q, \qquad (3)$$

где $F_C = (F_x, F_y, F_z)^T$; $M_C = (M_\varphi, M_\theta, M_\psi)^T$.

Однако выражение (3) справедливо только для случая идеального ИМ, не имеющего потерь энергии в шарнирах звеньев.

Обратные задачи кинематики

ОЗК о положениях звеньев. По 6×1 вектору состояния схвата S_C вычисляется $N\times1$ вектор значений обобщенных координат звеньев:

$$q = \Phi^{-1}(S_C), \qquad (4)$$

где $\Phi^{-1}(\cdot)$ – $N\times1$ вектор-функция, обратная $\Phi(\cdot)$.

ОЗК о скоростях звеньев. По вектору линейных и угловых скоростей схвата вычисляется вектор обобщенных скоростей звеньев:

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \cdot \begin{pmatrix} V_C \\ \Omega_C \end{pmatrix}, \qquad (5)$$

где $J^{-1}(\cdot)$ – матрица, обратная матрице Якоби.

ОЗК о силах и моментах в шарнирах звеньев. По вектору проекций силы и момента в схвате определяется вектор обобщенных сил в шарнирах:

$$Q = J^T(q) \cdot \begin{pmatrix} F_C \\ M_C \end{pmatrix}. \qquad (6)$$

Выражение (6) предполагает отсутствие потери энергии в шарнирах звеньев.

Итерационные методы решения ОЗК

Задача (6) требует вычисления и транспонирования матрицы Якоби, а выражение (5) представляет собой решение системы линейных алгебраических уравнений вида:

$$J(q) \cdot \dot{q} = \begin{pmatrix} V_C \\ \Omega_C \end{pmatrix}.$$

Если число звеньев робота $N \neq 6$, то матрица Якоби такой системы:

$$J(q) = \frac{\partial F(q)}{\partial q} = \left\{ \frac{\partial F_i(q)}{\partial q_j},\ i = \overline{1,6},\ j = \overline{1,N} \right\}$$

имеет прямоугольный вид.

Наиболее сложной с вычислительной точки зрения является задача (4), представляющая собой задачу решения системы нелинейных алгебраических уравнений вида:

$$\Phi(q) - S_C = F(q) = 0 \qquad (7)$$

где 0 – нулевой 6×1 вектор. В случае, когда $N = 6$, для решения (7) можно воспользоваться итерационным методом Ньютона со следующим алгоритмом [1]:

$$q^{k+1} = q^k - h_k \cdot J^{-1}(q^k) \cdot F(q^k), \qquad (8)$$

где $J^{-1}(\cdot)$ – 6×6 матрица, обратная матрице Якоби; h_k – величина шага (скаляр). В классическом методе Ньютона $h_k = 1$, а при регулировке шага $h_k = \text{var}$, $h_k < 1$. Но при плохой обусловленности матрицы Якоби или её вырождаемости в особых конфигурациях ИМ (при некоторых положениях звеньев) итерационное решение ОЗК затрудняется.

При избыточном числе звеньев, когда $N > 6$, в алгоритме (8) вместо обратной матрицы следует использовать квадратную 6×6 псевдообратную матрицу:

$$J^{-1} = (J^T J)^{-1} J^T,$$

то есть:

$$q^{k+1} = q^k - h_k \cdot J^{+1}(q^k) \cdot F(q^k). \qquad (9)$$

Если значения вектора ограничены допустимой областью D^N, то точные решения системы (7) в принципе могут отсутствовать. В таком случае ОЗК формулируется как задача минимизации квадрата нормы вектора невязки:

$$\left\| F(q) \right\|^2 \to \min_{q \in D^N}, \qquad (10)$$

и решается итерационными численными методами условной минимизации в ограниченном пространстве значений вектора q.

Решение ПЗК о положении схвата

Положение центра и ориентацию осей N-й системы координат схвата в базовой СК робота определяет матрица:

$$T_N(q) = A_1(q_1)A_2(q_2)\cdots A_N(q_N) = \\ = \begin{pmatrix} n_{N,0} & o_{N,0} & a_{N,0} & p_{N,0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} n_{x,0} & o_{x,0} & a_{x,0} & x_{N,0} \\ n_{y,0} & o_{y,0} & a_{y,0} & y_{N,0} \\ n_{z,0} & o_{z,0} & a_{z,0} & z_{N,0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $p_{N,0} = (x_{N,0}, y_{N,0}, z_{N,0})^{\mathrm{T}}$ – вектор положения центра; $a_{N,0}$, $o_{N,0}$, $n_{N,0}$ – векторы подхода, ориентации и нормали, характеризующие пространственное положение осей.

По заданному в СК схвата положению точки С:

$$r_{C,N} = (x_{C,N}, y_{C,N}, z_{C,N}, 1)^{\mathrm{T}},$$

можно определить её положение в базовой СК следующим образом:

$$r_{C,0}, = T_N(q) r_{C,N} = (x_C, y_C, z_C, 1)^{\mathrm{T}}. \quad (12)$$

Если же точка С является центром системы координат схвата $r_{C,N} = (0, 0, 0, 1)^{\mathrm{T}}$, то её координатами в базовой СК являются элементы 4-го столбца матрицы (11):

$$x_C = x_{N,0} = T_N(1,4);$$
$$y_C = y_{N,0} = T_N(2,4);$$
$$x_C = z_{N,0} = T_N(3,4).$$

Из (12) следует, что по вектору положения точки С схвата $p_{C,N} = (x_{C,N}, y_{C,N}, z_{C,N}, 1)^{\mathrm{T}}$, заданному в его собственной СК, и матрице $T_N(q)$ можно определить 4×4 матрицу:

$$T_{C,0}(q) = T_N(q) \begin{pmatrix} E_{3\times3} & p_{C,N} \\ 0\ 0\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} n_{N,0} & o_{N,0} & a_{N,0} & p_{C,0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

элементами 4-го столбца которой являются координаты рассматриваемой точки в базовой СК робота:

$$x_{C,0} = T_{1,4}(q);$$
$$y_{C,0} = T_{2,4}(q); \quad (14)$$
$$x_{C,0} = T_{3,4}(q).$$

Решение ОЗК о положениях звеньев

Рассмотрим возможные постановки и решения ОЗК на основе использования выражений (13) и (14).

1. Решение ОЗК по алгоритму (9) предполагает вычисление на каждом шаге итерационного процесса матрицы Якоби и её псевдообратной матрицы. В общем случае она представляет собой 6x6 матрицу следующего вида [5]:

$$J(q) = \\ = \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z & (p\times n)_x & (p\times n)_y & (p\times n)_z \\ o_x & o_y & o_z & (p\times o)_x & (p\times o)_y & (p\times o)_z \\ a_x & a_y & a_z & (p\times a)_x & (p\times a)_y & (p\times a)_z \\ 0 & 0 & 0 & n_x & n_y & n_z \\ 0 & 0 & 0 & o_x & o_y & o_z \\ 0 & 0 & 0 & a_x & a_y & a_z \end{pmatrix}, \quad (15)$$

требующую вычисления векторов нормали, ориентации и подхода – столбцов матрицы поворота $R_{C,0}(q)$, и вектора положения $p_{C,0}$ схвата.

2. В общем случае N-вектор обобщенных координат q определяется по вектору положения схвата $p_{C,0} = (x_{C,0}, y_{C,0}, z_{C,0})^{\mathrm{T}}$ и проекциям векторов ориентации его осей $n_{N,0}$, $o_{N,0}$, $a_{N,0}$) , заданным в базовой системе координат матрицей:

$$T_{C,0}(q) = \begin{pmatrix} n_{x,0} & o_{x,0} & a_{x,0} & x_{C,0} \\ n_{y,0} & o_{y,0} & a_{y,0} & y_{C,0} \\ n_{z,0} & o_{z,0} & a_{z,0} & z_{C,0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

путём решения соответствующей нелинейной системы двенадцати алгебраических уравнений с N неизвестными:

$$\left.\begin{array}{c} T_{1,1}(q) = n_{x,0} \\ T_{2,1}(q) = n_{y,0} \\ \cdots \\ T_{2,4}(q) = y_{C,0} \\ T_{3,4}(q) = z_{C,0} \end{array}\right\}. \quad (16)$$

При числе звеньев $N < 12$ система (16) является избыточной, и для её решения достаточно использовать только N уравнений, однако их выбор неоднозначен.

3. В случае, когда ориентация осей СК схвата задаётся вектором направляющих косинусов $(c_{x,0}, c_{y,0}, c_{z,0})^{\mathrm{T}}$, ОЗК можно решать как задачу ми-

нимизации квадрата нормы 6×1 вектора невязки:

$$\left\| \begin{matrix} (T_{1,4}(q) - x_{C,0}) \\ (T_{2,4}(q) - y_{C,0}) \\ (T_{3,4}(q) - z_{C,0}) \\ (c_x(q) - c_{x,0}) \\ (c_y(q) - c_{y,0}) \\ (c_z(q) - c_{z,0}) \end{matrix} \right\|^2 \to \min_{q \in D^N}. \qquad (17)$$

Направляющие косинусы $c_x(q)$, $c_y(q)$ и $c_z(q)$ можно вычислять по следующим формулам [2]:

$$c_x = \frac{o_z - a_y}{2\sin\delta};\ c_y = \frac{a_x - n_z}{2\sin\delta};\ c_z = \frac{n_y - o_x}{2\sin\delta}, \qquad (18)$$

где угол δ определяется по следу матрицы $T_{C,0}(q)$ или матрицы поворота:

$$R_{C,0} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} T_{1,1}(q) & T_{1,2}(q) & T_{1,3}(q) \\ T_{2,1}(q) & T_{2,2}(q) & T_{2,3}(q) \\ T_{3,1}(q) & T_{3,2}(q) & T_{3,3}(q) \end{pmatrix};$$

$$\delta = \arccos(\frac{1}{2}(trT_{C,0} - 2) =$$

$$= \arccos(\frac{1}{2}(trR_{C,0} - 1) =$$

$$= \arccos(\frac{1}{2}(n_x + o_y + a_z - 1)).$$

Направляющие косинусы $(c_{x,0}, c_{y,0}, c_{z,0})$ являются проекциями единичных векторов-ортов СК схвата в неподвижной системе координат, задаваемых в соответствии с используемыми углами Эйлера.

4. В частном случае трёхзвенного робота вектор q вычисляется только по вектору положения схвата $p_{C,0} = (x_{C,0}, y_{C,0}, z_{C,0})^T$, а ориентация осей СК схвата не задаётся. При этом ОЗК может решаться методом Гаусса–Ньютона как задача минимизации квадрата нормы 3×1 вектора невязки:

$$\left\| \begin{matrix} (T_{1,4}(q) - x_{C,0}) \\ (T_{2,4}(q) - y_{C,0}) \\ (T_{3,4}(q) - z_{C,0}) \end{matrix} \right\|^2 \to \min_{q \in D^N} \qquad (19)$$

в неограниченном или ограниченном пространстве значений вектора q.

При плохой обусловленности матрицы Якоби или её вырождаемости в особых конфигурациях ИМ решение ОЗК в любых их постановках затрудняется. Кроме того, результаты, получаемые итерационными методами, могут быть неоднозначными и зависеть от начальных значений вектора q. Поскольку в реальных роботах значения координат звеньев всегда ограничены допустимой областью D^N, то точные решения ОКЗ на некоторых участках задаваемой траектории схвата могут в принципе отсутствовать.

Пример решения ОЗК

Рассмотрим шестизвенный робот, три первых вращательных звена которого работают в вертикально-ангулярной системе координат, а звенья 4, 5 и 6 (также вращательного типа) обеспечивают ориентацию схвата.

На рис. 1 точками изображена заданная программная траектория схвата, а его ориентация на траектории задана постоянным вектором направляющих косинусов:

$$(c_{x,0}, c_{y,0}, c_{z,0})^T = (\cos(\pi/4), (\cos(\pi/4), 0)^T.$$

На рис. 2 представлены траектории звеньев, вычисленные путём итерационного решения ОЗК методом Гаусса–Ньютона, а на рис. 3 – соответствующие им направляющие косинусы, практически равные заданным.

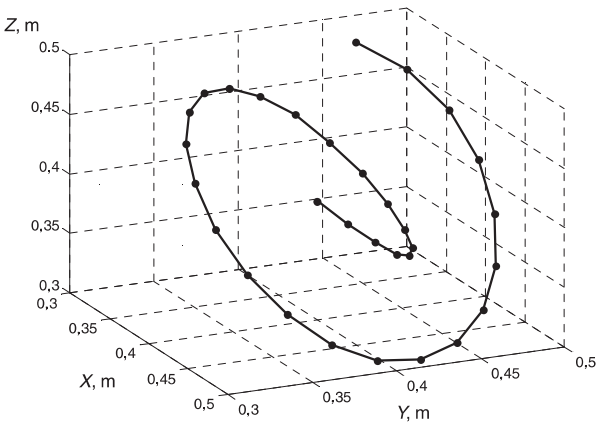


Рис. 1. Траектория схвата робота
(•) S_g; (———) S_c

Однако в других случаях (при задании иных начальных значений координат звеньев и ориентации схвата) итерационное решение ОЗК для данного робота оказывается неоднозначным или несходящимся.

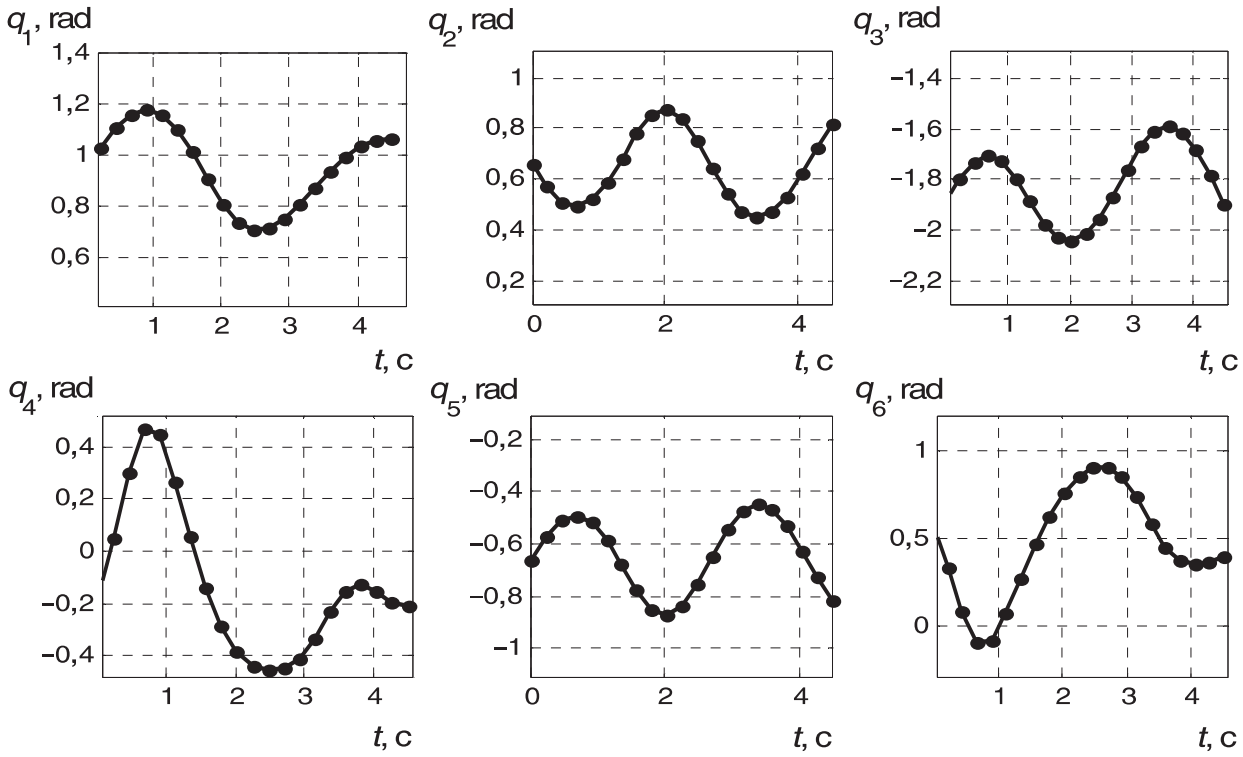


Рис. 2. Траектории звеньев

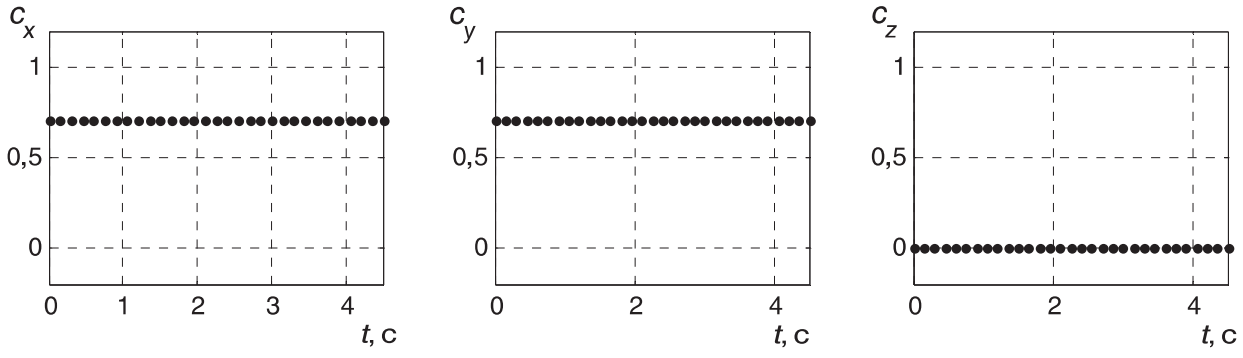


Рис. 3. Направляющие косинусы ориентации схвата

Для роботов со сложной кинематикой целесообразно применять итерационные методы решения ОЗК.

Использование моделей в однородных координатах позволяет получать наиболее точное решение ОЗК с вычислением элементов матрицы Якоби без численного дифференцирования.

Методики решения задач кинематики средствами пакета MATLAB для роботов конкретных типов при моделировании их исполнительных систем и СУ изложены в [3, 4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Деннис Д., Шнабель Р.** Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. М.: Мир, 1988.

2. **Зенкевич С.Л., Ющенко А.С.** Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ, 2000.

3. **Игнатова Е.И., Ростов Н.В.** Компьютерное моделирование исполнительных систем роботов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.

4. **Игнатова Е.И., Ростов Н.В.** Компьютерное моделирование систем управления роботами: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.

5. **Шахинпур М.** Курс робототехники: Пер. с англ. / Под ред. С.Л. Зенкевича. М.: Мир, 1990.

6. **Фу К., Гонсалес Р., Ли К.** Робототехника: Пер. с англ. / Под ред. В.Г. Градецкого. М.: Мир, 1989.

7. **Юревич Е.И.** Основы робототехники: Учеб. для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.

УДК 681.3.055

Н.И. Червяков, М.Г. Бабенко

ЛИНЕЙНЫЕ РЕКУРРЕНТНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ

Псевдослучайные последовательности используются для генерации секретных ключей шифрования, для вычисления цифровой подписи и для работы многих алгоритмов аутентификации. Для построения псевдослучайных последовательностей используются линейные рекуррентные последовательности на эллиптической кривой.

Поставим задачу проанализировать существующие генераторы на эллиптической кривой и построить генератор на эллиптической кривой, в котором арифметические операции будут выполняться в системе остаточных классов. Генератор псевдослучайных последовательностей должен удовлетворять следующим двум требованиям, предложенным в работе [9]:

1. Статистической безопасности: последовательность, созданная генератором псевдослучайных чисел, должна статистически ничем не отличаться от абсолютно случайной последовательности.

2. Криптографической безопасности: возможность, зная k-битов последовательности, предсказать следующий или $k + 1$ бит.

Эллиптическая кривая широко используется для построения криптосистем [4]. Одним из инструментов построения генераторов псевдослучайных последовательностей является эллиптическая кривая над конечным полем.

Эллиптическая кривая E над простым полем F_q, где $q > 3$, задаётся уравнением в форме Вейерштрасса $E(F_q)$:$y^2 = x^3 + Ax + B$, где $4A^3 + 27B^2 \neq 0$.

Халлгрен в 1994 г. в работе [2] рассмотрел датчик псевдослучайной последовательности, который называется арифметической прогрессией на E с начальным членом $P_0 \in E$ и разностью $G \in E$ и задаётся следующим рекуррентным соотношением:

$$P_n = P_{n-1} \oplus G = nG \oplus P_0,\ n = 1, 2, 3, ..., \qquad (1)$$

где $\oplus$ – групповая операция в $E(F_p)$.

Выходными значениями датчика (1) могут быть либо точки P_n, либо только их абсциссы x_n, либо только их ординаты y_n.

Следует отметить также статистическую безопасность генератора псевдослучайных чисел, построенного на базе арифметической прогрессии на эллиптической кривой. Она обладает хорошими статистическими свойствами, что показано в [5]: равномерностью распределения элементов арифметической прогрессии для большого t; также указан порядок величины отклонения от равномерности $O\left(\frac{\sqrt{p}\log^2 p}{t}\right)$.

Для случая, при котором известна разность G, старшие биты P_n и P_{n-1}, в работе [3] Гутиэррехом и Ибиасом предложен эффективный алгоритм нахождения P_0 для генераторов, построенных на базе арифметической прогрессии на эллиптической кривой. Он не обладает криптографической безопасностью. Секретным ключом в генераторе псевдослучайных чисел (1) должны являться P_0 и G . В этом случае неизвестны эффективные алгоритмы предсказания бит, и генератор (1) является криптографически безопасным.

В работе [1] в более общем виде рассмотрены генераторы псевдослучайных последовательностей типа арифметическая прогрессия на эллиптической кривой. Пусть порядок $|E(F_p)|$ группы $E(F_p)$ равен r.

Последовательность P_0, P_1, P_2, ... точек E, удовлетворяющих рекуррентному соотношению:

$$P_{n+k} = \sum_{i=0}^{m-1} c_i P_{i+k} \oplus Q\ ,\ k = 0, 1, 2, ..., \qquad (2)$$

называют *EC*-последовательностью порядка m; $f(x) = x^m - \sum_{i=0}^{m-1} c_i x^i$ – характеристическим многочленом над Z_r.

Последовательность, заданная формулой (1), может быть названа *EC*-последовательностью первого порядка и характеристическим многочленом $f(x) = x - 1$.

Одной из важных характеристик генератора псевдослучайных чисел является скорость генерации последовательности: для увеличения скорости операций удвоения и сложения точек на эллиптической кривой используют проективные координаты, т. к. они позволяют избежать очень дорогой, с точки зрения процессорного времени, операции инверсии (деления) в конечном поле.

Для ускорения операции сложения и умножения с большими числами построим генератор *EC*-последовательностей на эллиптической кривой над кольцом Z_q, где $q = \prod_{i=1}^{m} p_i$, p_i – попарно различные простые числа и $(q,6) = 1$. Это позволяет использовать систему остаточных классов, что ускорит выполнение операций сложения и умножения над кольцом Z_q.

С учётом всего вышесказанного эллиптическая кривая имеет вид: $E(Z_q): Y^2Z = X^3 + AXZ^2 + BZ^3$, где $A, B \in Z_q$. Точки на эллиптической кривой имеют вид: $P(X, Y, Z) \in E(Z_q)$, $X, Y, Z \in Z_q$; X, Y, Z заданы в системе остаточных классов.

Программно реализуем алгоритмы сложения и удвоения точек на эллиптической кривой, заданной над полем и над кольцом. Сравнивая результат, при котором количество элементов в кольце одного и того же порядка, что и количество элементов в поле, получаем, что вычисления при использовании системы остаточных классов в среднем в два раза быстрее, чем при использовании операций в конечном поле.

Согласно [9], одним из важных свойств генератора псевдослучайной последовательности является длина периода.

Теорема 1 [1]. Период *EC*-последовательности (2) есть делитель периода её характеристического многочлена.

Для нахождения максимального периода характеристического многочлена воспользуемся следующей формулой из [6]:

$$T_q(f(x)) = \left[T_{p_1}(f(x)), T_{p_2}(f(x)), ..., T_{p_n}(f(x))\right], \quad (3)$$

где $T_q(f(x))$ – период многочлена над кольцом вычетов Z_q, $[r, s]$ – наименьшее общее кратное.

В [8] сформулирована теорема для нахождения периода многочлена в Z_{p_i}, если он равен степени неприводимого многочлена.

Теорема 2 [8]. Пусть $m \in N$ и $g(x)$ – неприводимый многочлен над конечным полем характеристики p, такой, что $g(0) \neq 0$. Тогда для многочлена вида $f(x) = g^m(x)$

$$T_p(f(x)) = T_p(g^n(x)) = p^t T_p(g(x)),$$

где t – наименьшее целое число, для которого $p^t \geq m$.

Пусть $g(x)$ – многочлен первой степени $x - \alpha$, где α – образующий элемент в Z_{p_i}, тогда $T_{p_i}(x - \alpha) = p_i - 1$. Используя формулу (3) и теорему 2, получим:

$$T_p(f(x)) = \left[p_1^{t_1}(p_1 - 1), p_2^{t_2}(p_2 - 1), ..., p_n^{t_n}(p_n - 1)\right]. \quad (4)$$

При условии, что $m \geq 2$, получим, что $t_i \geq 1$ для всех $i \in [1, ..., n]$. Следовательно, для правой части равенства (4) будет выполняться неравенство $\left[p_1^{t_1}(p_1 - 1), p_2^{t_2}(p_2 - 1), ..., p_n^{t_n}(p_n - 1)\right] \geq \prod_{i=1}^{n} p_i$.

Для вычисления α воспользуемся теоремой П.Л. Чебышева

Теорема 3 [7]. Пусть простые числа p, $q > 2$, тогда справедливы следующие утверждения:

1. если $p = 4q + 1$, то 2 есть образующий элемент в F_p^*;

2. если $p = 2q + 1$, $q = 4n + 1$, то 2 есть образующий элемент в F_p^*;

3. если $p = 2q + 1$, $q = 4n + 3$, то -2 есть образующий элемент в F_p^*.

Использование в качестве основания системы остаточных классов простых чисел, удовлетворяющих первому или второму условию из вышеприведённой теоремы, и многочлена $g(x) = x - 2$ позволяет построить многочлен $f(x) = (x - 2)^m$ большого периода, где $m \geq 2$.

Рассмотрим задачу выбора точек для генератора типа арифметическая прогрессия на эллиптической кривой.

В случае, когда порядок группы точек $|E(Z_q)| = h$, где h – простое число, получим, что группа точек эллиптической кривой $E(Z_q)$ – циклическая, и все точки, отличные от точки в бесконечности O, являются образующими элементами группы точек эллиптической кривой $E(Z_q)$. Так как точка Q из формулы (2) тоже будет являться образующей в группе точек эллиптической кривой $E(Z_q)$, значит, точки P_i из формулы (2) можно представить в виде $P_i = k_i Q$, где $k_i \in N$. Тогда формула (2) примет вид:

$$P_{n+t} = \sum_{i=0}^{n-1} c_i k_{i+t} Q \oplus Q, \; t = 0, 1, 2, ..., \quad (5)$$

где $c_i = (-1)^{i+1} 2^i C^i_{n+!}$ $C^k_n = \frac{n!}{(n-k)!k!}$. Следовательно, формула (5) примет вид: $P_{n+t} = \left(\sum_{i=0}^{n-1} c_i k_{i+t} + 1 \right) Q$. С учётом того, что $hQ = O$, получим:

$$P_{n+t} = \left(\left(\sum_{i=0}^{n-1} c_i k_{i+t} + 1 \right) \bmod h \right) Q. \quad (6)$$

В случае, когда $h > T_q((x-2)^m)$, период псевдослучайной последовательности равенства (6) вычисляется по формуле (4).

Так как для построения генератора необходимо умение быстро вычислять порядок группы точек эллиптической кривой $E(Z_q)$, то воспользуемся следующим методом:

Метод нахождение порядка группы точек эллиптической кривой, заданной уравнением над кольцом $E(Z_q)$.

Для этого рассмотрим сравнение $y^2 = x^3 + ax + b (\bmod p_i)$.

1. Найдем количество решений n_i сравнения, используя формулу $n_i = p_i + \sum_{x \in F_{p_i}} \left(\frac{x^3 + ax + b}{p_i} \right)$, где $\left(\frac{x^3 + ax + b}{p_i} \right)$ – символ Лежандра.

2. Вычислим порядок $|E(Z_q)| = \prod_{i=1}^{m} n_i + 1$.

Замечание. Точка O, представленная в системе остаточных классов в виде $(P_1, P_2, P_3, ..., P_n)$, содержит хотя бы одну точку P_i, такую, что она является бесконечно удалённой точкой на кривой $y^2 = x^3 + Ax + B (\bmod p_i)$. Тогда точка O – бесконечно удалённая точка на эллиптической кривой $E(Z_q)$.

На основе вышесказанного можно построить *математическую модель генератора псевдослучайных чисел* типа арифметической прогрессии *на эллиптической кривой*.

Описание. Секретными ключом является система оснований, точка Q, число m и числа k_i.

1. Выбираем основания системы остаточных классов: простые числа вида $p = 4q + 1$ или $p = 2q + 1$, $q = 4n + 1$, где q – простое число.

2. Количество оснований системы остаточных классов должно быть больше $n > 100$.

3. Выбираем два числа A и B, принадлежащих Z_q, таких, чтобы $4A^3 + 27B^2 \neq 0$ для всех p_i, где $i \in [1, ..., n]$.

4. Выбираем $m \geq 2$.

5. Вычисляем $T_q((x-2)^m)$.

6. Вычисляем $|E(Z_q)|$, используя метод нахождения порядка группы точек эллиптической кривой $E(Z_q)$.

7. Вычисляем точку Q порядка h, где $h > T_q((x-2)^m)$.

8. Выбираем случайные числа $k_i \in N$, где $i \in [1, ..., m]$.

9. Используя формулу (6), вычисляем псевдослучайную последовательность точек эллиптической кривой $E(Z_q)$.

10. За значения генератора псевдослучайных чисел берём или координату X, или координату Y, оставляя её в системе остаточных классов.

Замечание. Если на шаге 9, мы получаем точку O, то пропускаем её и вычисляем следующие значения последовательности, заданной формулой (6).

Данная математическая модель генератора псевдослучайных чисел является криптостойкой и статистически безопасной. При выборе в качестве системы основания первых ста простых чисел, полученных по теореме 3 и удовлетворяющих или первому, или второму условию теоремы и характеристического многочлена $f(x) = x^2 - 4x + 4$, период будет больше 10^{327}, что позволяет зашифровать более 10^{284} терабайт информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gong G., Lam C.** Linear recursive sequences over elliptic curves / Sequences and their applications. London: Springer, 2002. P. 182–196.

2. **Hallgren S.** Linear congruential generators over elliptic curve // Cornegie Mellon Univ., 1994. P. 1–10.

3. **Gutierrez J., Ibeas A.** Inferring sequences produced by a linear congruential generator on elliptic curves missing high-order bits // Designs, Codes and Cryptography. 2007. Vol. 41. P. 199–212.

4. **Koblitz N.** Elliptic curve cryptosystems // Mathematics of Computation. 1987. Vol. 48. № 177. P. 203–209.

5. **Nahassni E.E., Shparlinski I.** On the uniformity of distribution of congruential generators over elliptic curves // Sequences and their applications. London: Springer, 2002. P. 257–261.

6. **Нечаев А.А.** Цикловые типы линейных подстановок над конечными коммутативными кольцами // Матем. сб. 184:3, 1993. С. 21–56.

7. **Болотов А.А., Гашков С.Б., Фролов А.Б. и др.** Элементарное введение в эллиптическую криптографию: Алгебраические и алгоритмические основы. М.: КомКнига, 2006.

8. **Лидл Р., Нидеррайтер Г.** Конечные поля / Пер. с англ. В 2-х т.: Т.1. М.: Мир, 1988.

9. **Рябко Б.Я., Фионов А.Н.** Криптографические методы защиты информации: Учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2005. 229 с.

УДК 519.8 681.5

А.В. Черников, О. Г. Пенский

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ В ЖИЛОМ ЗДАНИИ

Одной из составляющих и неотъемлемых частей нашей повседневной жизни является климат. Особенно это касается помещений, в которых мы проводим большую часть времени. Движение воздушных масс, температура, влажность – всё это воздействует на нас. Поэтому очень важно поддерживать необходимый, комфортный для нас режим климата в помещении [1, 2].

В статье рассматривается система создания необходимой влажности в помещении, автоматически поддерживающая заданную влажность при появлении дополнительных источников осушения/орошения. Для разработки системы применён комплексный подход, основанный на использовании чёткой (для создания влажности) и нечёткой логики (поддержание влажности). В [3] описана система управления климатом в помещении, основанная на нечёткой логике, рассмотрены работы, посвящённые климатологии помещения, сделаны выводы о необходимых климатических параметрах. Но разработанная модель системы создания комфортного климата влечёт за собой и другую, не менее важную проблему: достижение комфортных климатических параметров и поддержание их.

Применение нечёткой и чёткой логики к конкретной задаче создания и поддержания необходимой влажности в помещении

Наилучший результат даёт объединение методов нечёткой и чёткой логики [4].

Система управления изменением влажности. Опишем техническую сторону системы – каналы приточной вентиляции. По каналу ВЛ забирается воздух из более влажной среды; по каналу СХ – из более сухой среды. Система специально включает эти два канала, т. к. это позволяет в ряде случаев отказаться от принудительного осушения/орошения воздуха водяными парами, что в свою очередь приводит к уменьшению энергозатрат. Далее рассмотрим алгоритм работы системы.

Система создания влажности работает следующим образом:

при возникновении сигнала ΔU (сигнал, подаваемый с системы управления климатом [3]) – сигнала изменения влажности в помещении, больше или меньше нуля, система производит вычитание значений Uпом (влажность в помещении на данный момент) и Uвл (влажность в канале вентиляции ВЛ в блоке вычитания сигналов);

по получившемуся результату операции вычитания и ΔU происходит выбор алгоритма работы системы, отслеживаются изменения влажности и подаются управляющие сигналы заслонками влажного, сухого воздуха и увлажнителя.

Далее описаны алгоритмы работы системы.

Если $\Delta U < 0$ и результат выполнения процесса блоком вычитания < 0, то выполняется команда К1: заслонка СХ открыта полностью; заслонка ВЛ закрыта полностью, пока не выполнено условие У1:

$$U\text{дат} = U\text{пом} - \Delta U + 5\ \%. \qquad (1)$$

После выполнения условия У1 выполняется команда К2: Заслонка ВЛ открыта на 80 %; заслонка СХ открыта на значение, полученное по формуле:

$$b = 0{,}8 \cdot (U\text{вл} - U\text{пом})/(U\text{пом} - U\text{сх} - \Delta U). \qquad (2)$$

Если $\Delta U < 0$ и результат выполнения процесса блоком вычитания > 0, то выполняется команда К1: заслонка СХ открыта полностью; заслонка ВЛ закрыта полностью, пока не выполнено условие У1: формула (1). После выполнения условия У1 выполняется команда К2: заслонка ВЛ откры-

та полностью; заслонка СХ закрыта полностью; увлажнитель включен на значение, полученное по формуле:

$$b = (U\text{пом} - \Delta U) - 0{,}8 \cdot U\text{вл}.$$

Если $\Delta U > 0$ и результат выполнения процесса блоком вычитания < 0, то выполняется команда К1: заслонка ВЛ открыта полностью; заслонка СХ закрыта полностью, пока не выполнено условие У1:

$$U\text{дат} = U\text{пом} + \Delta U - 5\ \%. \qquad (3)$$

После выполнения условия У1 выполняется команда К2: заслонка ВЛ открыта на 80 %; заслонка СХ открыта на значение, полученное по формуле:

$$b = 0{,}8 \cdot (U\text{вл} - U\text{пом})/(U\text{пом} - U\text{сх} + \Delta U). \quad (4)$$

Если $\Delta U > 0$ и результат выполнения процесса блоком вычитания < 0, то выполняется команда К1: заслонка ВЛ открыта полностью; заслонка СХ закрыта полностью, пока не выполнимо условие У1: формула (3). После выполнения условия У1 выполняется команда К2: заслонка ВЛ открыта полностью; заслонка СХ закрыта полностью; увлажнитель включен на значение, полученное по формуле:

$$b = (U\text{пом} + \Delta U) - 0{,}8 \cdot U\text{вл}.$$

Стоит обратить внимание на то, откуда берутся формулы (2), (4). Влажность зависит от массы воздуха, прошедшего через трубы за ед. времени, и, следовательно, от объёма воздушных масс и количества паров воды в воздухе. Если две трубы (СХ и ВЛ) сходятся в один объём, причём площадь поперечного сечения труб одинакова, то конечную влажность можно найти по формуле:

$$U\text{пом} = (a \cdot U\text{вл} + b \cdot U\text{сх})/(a + b),$$

где a, b – проценты величин открытия соответствующих заслонок. Заслонка канала ВЛ специально открывается на 80 % для того, чтобы осталась возможность регулирования этим параметром в дальнейшем.

Таким образом, мы описали систему создания влажности. Однако влажность важно не только установить на определённый уровень, но и уметь правильно и эффективно поддерживать в выбранном диапазоне. Система поддержания влажности будет описана ниже.

Система поддержания влажности в помещении. Описываемая система строится аналогично системе управления климатом в помещении [3]. Но она будет разделена нами на систему управления влажностью, где влажность меняется только в помещении, и систему управления влажностью, где влажность меняется в каналах. Будем рассматривать только первую систему, т. к. она нагляднее показывает все преимущества Н-логики в решении данной задачи.

В системе только два входных сигнала: изменение влажности в помещении и разность влажности в канале ВЛ и помещении (выбор последнего параметра не случаен, т. к. нет необходимости рассматривать влажность в обоих каналах и важна разница только между влажностями); выходные сигналы представляются следующими параметрами – процентом величины открытия заслонки СХ, процентом величины открытия заслонки ВЛ, процентом величины включения увлажнителя.

Процесс разобьём на этапы фаззификации, построение базы правил и дефаззификации.

Фаззификация. В процессе фаззификации в качестве терм – множества лингвистических переменных – будем использовать множества: изменение влажности в помещении – Uпом с функциями принадлежности, изображёнными на рис. 1; разность влажностей в канале ВЛ и в

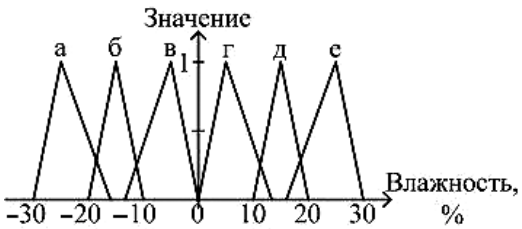


Рис. 1. Графики функций принадлежности для терма лингвистической переменной «изменение влажности в помещении»:
а – большое уменьшение; б – среднее уменьшение; в – малое уменьшение; г – малое увеличение; д – среднее увеличение; е – большое увеличение

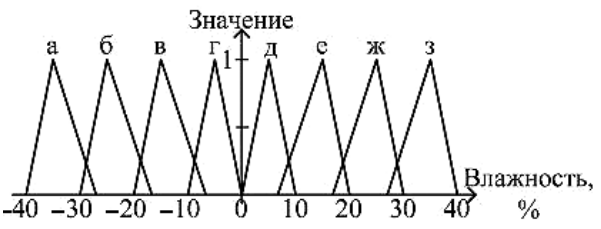


Рис. 2. Графики функций принадлежности для терма лингвистической переменной «разность влажности в канале ВЛ и помещении»:
а – меньше много; б – меньше средне; в – меньше немного; г – меньше мало; д – больше мало; е – больше немного; ж – больше средне; з – больше много

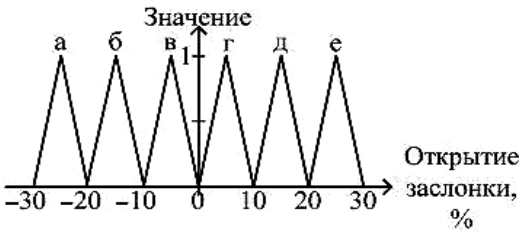


Рис. 3. Графики функций принадлежности для терма лингвистической переменной «процент открытия заслонки СХ»:
а – открыть много; б – открыть средне; в – открыть мало; г – закрыть мало; д – закрыть средне; е – закрыть много

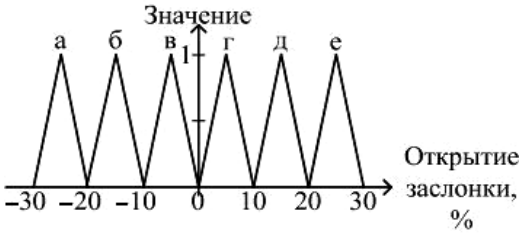


Рис. 4. Графики функций принадлежности для терма лингвистической переменной «процент открытия заслонки ВЛ»:
а – открыть много; б – открыть средне; в – открыть мало; г – закрыть мало; д – закрыть средне; е – закрыть много

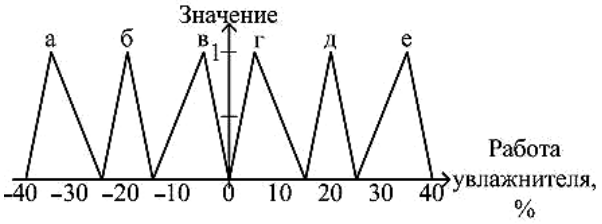


Рис. 5. Графики функций принадлежности для терма лингвистической переменной «процент включения увлажнителя/осушителя»:
а – убавить много; б – убавить средне; в – убавить мало; г – добавить мало; д – добавить средне; е – добавить много

помещении – *U*раз с функциями принадлежности, изображёнными на рис. 2; процент открытия заслонки СХ – *V*сх с функциями принадлежности, изображёнными на рис. 3; процент открытия заслонки ВЛ – *V*вл с функциями принадлежности, изображёнными на рис. 4; процент включения увлажнителя/осушителя – *V*ув с функциями принадлежности, изображёнными на рис. 5.

Далее построим базу нечётких лингвистических правил для работы системы (табл.). Ниже приведена предлагаемая нами следующая база правил.

База правил

Δ*U*пом	Δ*U*раз	%*U*сх	%*U*вл	Увлажнение
БУ	ММ	ЗН	-	ДМ
БУ	МС	ЗН	-	ДМ
БУ	МН	ЗН	-	ДМ
БУ	МА	ЗН	-	ДМ
БУ	БА	-	-	ДМ
БУ	БН	-	-	ДН
БУ	БС	ЗН	-	ДН
БУ	БМ	ЗН	-	-
СУ	ММ	-	-	ДС
СУ	МС	ЗН	-	ДС
СУ	МН	-	-	ДС
СУ	МА	-	-	ДС
СУ	БА	-	-	ДС
СУ	БН	ЗН	-	-
СУ	БС	ЗН	-	УН
СУ	БМ	ЗН	-	УС
МУ	ММ	-	-	ДН
МУ	МС	-	-	ДН
МУ	МН	-	-	ДС
МУ	МА	-	-	ДН
МУ	БА	ЗН	-	ДН
МУ	БН	ЗН	-	-
МУ	БС	ЗН	-	УН
МУ	БМ	ЗН	-	УС
МВ	ММ	-	-	УН
МВ	МС	-	-	УН
МВ	МН	-	-	УН
МВ	МА	-	-	УН
МВ	БА	-	ЗН	-
МВ	БН	ЗН	ЗН	-
МВ	БС	ЗС	ЗН	-
МВ	БМ	ЗС	ЗС	-
СВ	ММ	-	-	УС
СВ	МС	-	-	УС
СВ	МН	-	-	УС
СВ	МА	-	-	УС
СВ	БА	ЗН	ЗН	-
СВ	БН	ЗС	ЗН	-
СВ	БС	ЗС	ЗС	-
СВ	БМ	ЗМ	ЗС	-
БВ	ММ	-	-	УМ
БВ	МС	-	-	УМ
БВ	МН	-	-	УМ
БВ	МА	-	-	УМ
БВ	БА	-	ЗС	-
БВ	БН	ЗН	ЗС	-
БВ	БС	ЗН	ЗМ	-
БВ	БМ	ЗС	ЗМ	-

Примечание к таблице: Δ*U*пом, Δ*U*раз – изменение влажности в помещении и разность влажностей в канале ВЛ и помещении; %*U*сх, %*U*вл – процент открытия заслонок каналов СХ и ВЛ; Увлажнение – процент включения увлажнителя; БУ – большое уменьшение; СУ – среднее уменьшение; МУ – малое уменьшение; МВ – малое увеличение; СВ – среднее увеличение; БВ – большое увеличение; ЗМ – закрыть много; ЗС – закрыть средне; ЗН – закрыть немного; УМ – убавить много; УС – убавить средне; УН – убавить немного; ДС – добавить средне; ДН – добавить немного; ДМ – добавить много; ММ – меньше много; МС – меньше средне; МН – меньше немного; МА – меньше мало; БА – больше мало; БН – больше немного; БС – больше средне; БМ – больше много.

Дефаззификация. Процесс дефаззификации аналогичен процессу управления климатом [3]. Ниже приведены полученные нами графики зависимостей выходных параметров от исходных данных процесса дефаззификации.

Анализ графиков и проведённые опыты над испытуемыми различного возраста показали, что система управляет всеми выходными сигналами при определённых входных сигналах так, что пользователю системы комфортно находиться в помещении. Такое управление эффективно с точки зрения достижения цели – сокращение времени на 10 % и сокращение энергозатрат на 10 %. Основное управление влажностью происходит за счёт работы увлажнителя/осушителя во всей области изменений влажности в помещении и разности влажностей между каналом ВЛ и помещением, кроме области, где входных переменные имеют положительные значения, где основное изменение влажности происходит за счёт заслонок каналов ВЛ и СХ. Такой метод управления выбран из соображения быстроты достигаемости необходимого регулирования.

В статье описана работоспособная система, построенная с помощью простых, интуитивно понятных правил, что даёт возможность разработчику быстро и эффективно добиваться результата в построении систем управления с помощью нечёткой логики.

Выделим преимущества применения предлагаемого метода в построении систем управления:

1. Простота разработки: система строится на интуитивно понятных правилах при минимальных знаниях о процессах.

2. Даже при достаточно приблизительном подборе терм – множеств входных/выходных переменных и построений, их функции принадлежностей – система дает приемлемый результат для правильной работы.

3. Система включает минимум необходимых правил.

4. Наличие микропроцессоров с заложенными

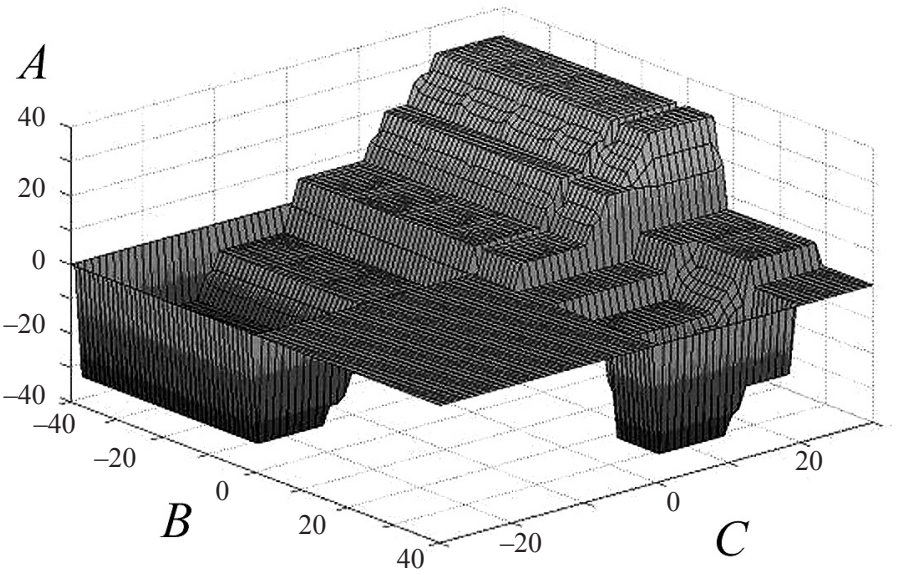


Рис. 6. График зависимости изменения процента включения увлажнителя/осушителя от изменения влажности в помещении и разности влажностей в канале ВЛ и помещении:
A – процент включения увлажнителя/осушителя; *B* – разность влажностей в канале ВЛ и помещении; *C* – изменение влажности в помещении

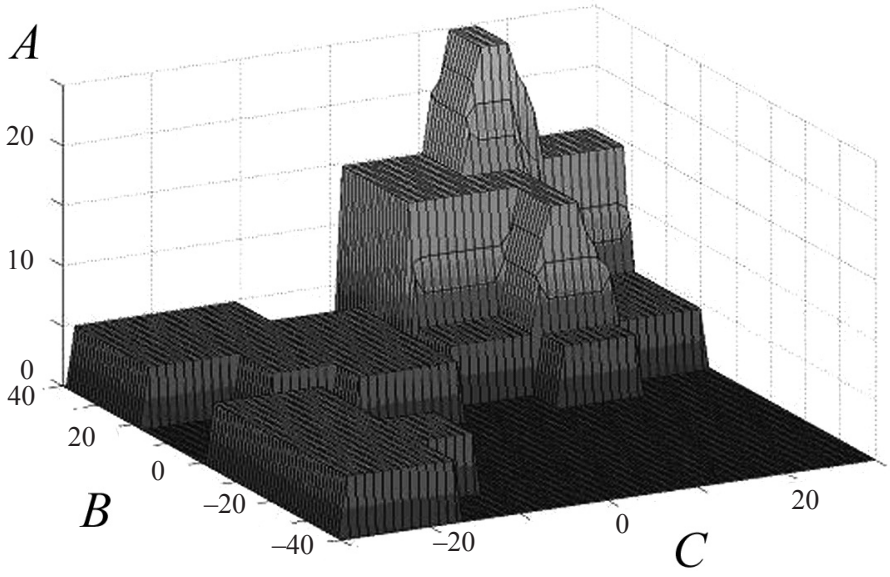


Рис. 7. График зависимости изменения процента открытия заслонки СХ от изменения влажности в помещении и разности влажностей в канале ВЛ и помещении:
A – процент открытия заслонки СХ; *B* – разность влажностей в канале ВЛ и помещении; *C* – изменение влажности в помещении

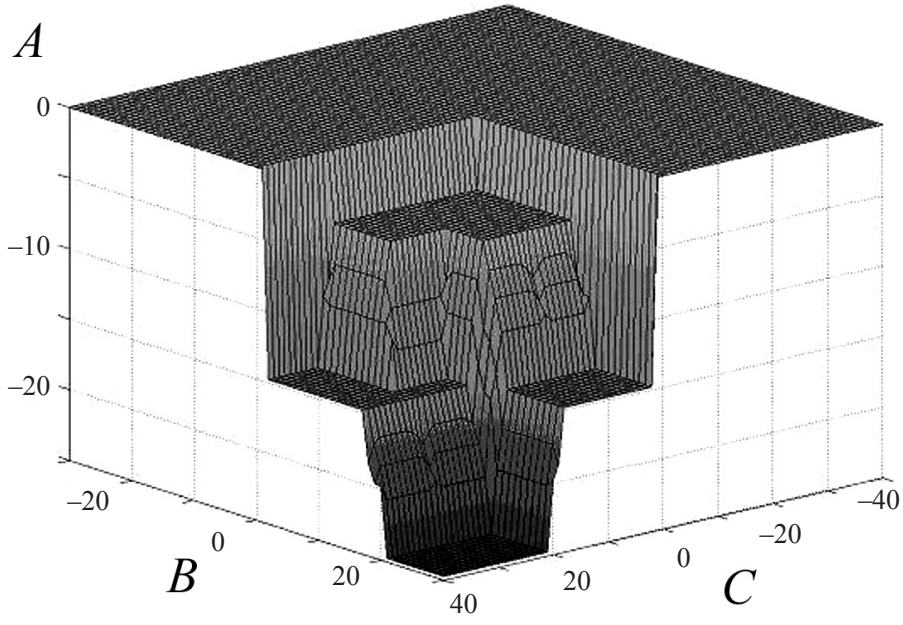


Рис. 8. График зависимости изменения процента открытия заслонки ВЛ от изменения влажности в помещении и разности влажностей в канале ВЛ и помещении:
A – процент открытия заслонки ВЛ; *B* – изменение влажности в помещении; *C* – разность влажностей в канале ВЛ и помещении

методами нечёткой логики позволяет реализовать данные системы.

5. Система управления обладает свойством комплексности и является более эффективной по сравнению с существующими, т. к. в ней используется для управления чёткая и нечёткая логика, определяющая преимущество быстроты и эффективности обработки информации и модульного построения конечной аппаратной части. Последнее является неоспоримым достоинством в разработке аппаратных средств данной системы.

6. В системе предусмотрены условия приведения к целочисленным значениям. Это значительно упрощает работу её аппаратной реализации.

Практическая реализация системы управления влажностью позволила уменьшить энергопотребление в помещении площадью 14 кв. м на 10 % по сравнению с аналогичными системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сканави А.Н.** Отопление. М.: Стройиздат, 1988. 416 с.

2. **Зоколей С.В.** Архитектурное проектирование, эксплуатация объектов, их связь с окружающей средой. М.: Стройиздат, 1984. 617 с.

3. **Черников А.В.** Система управления климатом в помещении, основанная на нечеткой логике // III конф.-конкурс грантов аспирантов и молодых ученых ММФ ПермГУ / Сб. тезисов науч. докл. 10–11 декабря 2008. ПермГУ. Пермь: ООО «Учебный центр Информатика», 2008. С. 83–90.

4. **Леоненков А.В.** Нечеткое моделирование в среде MatLab и FuzzyTech. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

УДК 621.391.3

А.В. Полянский, А.С. Львов, А.В. Ларичев

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ДОМЕННОГО КОКСА НА БАЗЕ ПРИБОРОВ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

Основными показателями, определяющими качество доменного кокса, являются зольность, насыпная плотность и влажность. Так, увеличение зольности на 1 % вызывает снижение производительности доменной печи (ДП) на 1,3 %, при этом возрастает расход топлива. Зола уменьшает прочность кокса, что может привести к его разрушению столбом вышележащей шихты в печи [1]. Следствием неучитываемых колебаний количества влаги во взвешиваемом коксе при дозировании становится несоответствие фактического и расчётного объёмов топлива, поступившего в ДП, а это нарушает заданный тепловой режим её работы. При автоматическом управлении шихтоподачей также осуществляется контроль запаса кокса (насыпной массы) в расходных бункерах бункерной эстакады (БЭ) [2].

Задача непрерывного бесконтактного контроля показателей качества кокса находит решение в применении неразрушающих ядерно-физических методов, основанных на взаимодействии ионизирующих излучений (гамма-, нейтронное) с веществом. При измерении влажности фактически единственной альтернативой остаются нейтронные приборы. Так, контроль влажности топлива в бункере БЭ ДП № 5 ЧерМК ОАО «СеверСталь» осуществляется нейтронным влагоплотномером ВПН-03. Недостаток такого прибора – время на вычисление влажности может достигать 100 с, а канал плотности является вспомогательным.

Большинство существующих радиоизотопных приборов (РИП) не удовлетворяют требованию связанного контроля параметров кокса. Новые разработки РИП, несмотря на многофункциональность своего назначения (например, используемый в качестве плотномера на ЧерМК ОАО «СеверСталь» радиоизотопный преобразователь РП-24 [3]), при эксплуатации позволяют производить измерение единственного параметра твёрдого топлива. Технологический контроль зольности доменного кокса осуществляют при помощи золомеров (например, РКТП-6), содержащих до-

полнительные источники гамма-излучения, установка которых приводит к усложнению и удорожанию процесса контроля. В предложенных многопараметрических решениях [4, 5] задача расчёта показателей качества перенесена на уровень ЭВМ индустриального исполнения, необходим калибровочный блок или комплекс РИП.

Существует возможность создания многофункционального РИП, выполняющего определение параметров доменного кокса в бункере за счёт обработки сигналов с нескольких сцинтилляционных детекторов на уровне РСКУ – распределённой подсистемы контроля, сигнализации и локального управления. Теоретическую основу создания подобных приборов [6] образуют зависимости интенсивностей N_h и N_s потока, соответственно, прямого и рассеянного гамма-излучения, проходящего через вещество-ослабитель, от параметров этого вещества:

$$N_h = N_{h_0} \cdot e^{-\mu_h \cdot \rho \cdot d},$$

$$N_s = N_{s_0}(1 - \mu_s \cdot \rho \cdot d),$$

где интенсивности N_{h_0} и N_{s_0} регистрируются при отсутствии кокса с насыпной плотностью ρ в бункере, расстояние между противоположными стенками которого d; μ_h и μ_s – массовые коэффициенты ослабления прямого и рассеянного гамма-излучения в коксе. При этом плотность ρ имеет эмпирическую зависимость от влажности χ и зольности кокса A^d. Таким образом, частота следования импульсов, полученная на каждом детекторе, есть q-мерная функция контролируемых параметров $F_i(\rho, \chi, A^d)$ (рис. 1). В общем случае,

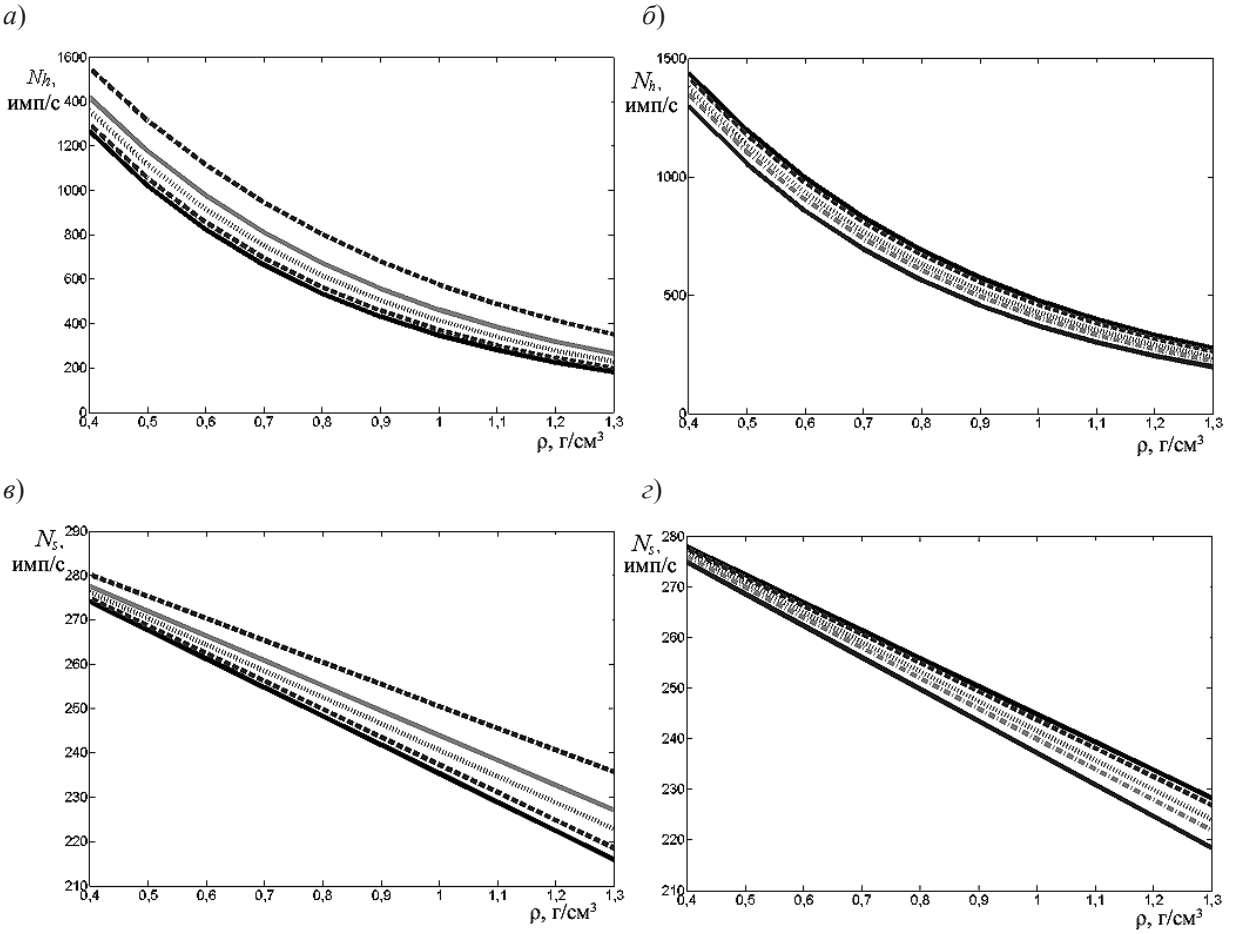


Рис. 1. Зависимость интенсивности потока прямого и рассеянного гамма-излучения от плотности, зольности и влажности:
а, *в* – при фиксированной влажности
(——)*Ad* = 2 %; (------)*Ad* = 5 %; (——)*Ad* = 10 %; (——)*Ad* = 15 %; (------)*Ad* = 25 %;
б, *г* – при фиксированной зольности
(——)*Chi* = 1 %; (------)*Chi* = 3 %; (——)*Chi* = 7 %; (——)*Chi* = 10 %; (——)*Chi* = 15 %

функция F_i является интегральной величиной по всем компонентам излучения различных энергий E_1, E_2, …, E_n. Минимизация аппаратной конфигурации вычислителя в составе РИП и сокращение количества вычислений позволит повысить надёжность и степень автономности прибора в экстремальных условиях непрерывного технологического процесса. Функциональная схема такого прибора представлена на рис. 2, компоненты прибора выделены пунктиром.

Измерительная информация, фиксируемая детекторами (сцинтилляционный кристалл NaJ (T1), сочленённый с фотоэлектронным умножителем) 2-4, формируется при облучении кокса направленным потоком гамма-квантов, испускаемым радиоизотопным источником 1 цезия-137, который содержится в коллиматорном узле. Детектор 4, установленный на противоположной от источника стенке бункера, регистрирует интенсивность прямого излучения, ослабленного материалом при данных ρ, χ и A^d. Датчики 2-3 используют зависимость рассеянного коксом гамма-излучения от плотности и зольности при конкретном значении влажности. Сигнал тензорезисторного датчика 5, в общем случае также зависимый от показателей качества кокса, позволяет уточнять плотность топлива в известном объёме при тарировке и функционировании прибора. Находить плотность кокса непосредственно, зная массу m, невозможно, ввиду сложной формы бункера.

Тарировка прибора производится в режиме «Обучение» на ЭВМ в составе системы автоматического ведения эксперимента, когда нормированные значения многомерных функций с АЦП рассматриваются как входные наборы при обучении искусственной нейронной сети (ИНС). Обучающая выборка при этом формируется многомерной кубической интерполяцией результатов измерений полиномами Эрмита, сохраняющей монотонность и форму данных, что исключает необходимость моделирования всех комбинаций плотности, зольности и влажности в бункере. Завершается тарировка прибора записью матриц синаптических весов и массивов смещений – соответственно, **W** и **B** – настроенной ИНС в память EEPROM (FLASH) микроконтроллера.

В режиме «Работа» значения с АЦП поступают непосредственно на микроконтроллер (МК), который определяет показатели качества кокса методом нейросетевой аппроксимации и выдаёт их через модуль USART в подсистему управления шихтоподачей РСКУ ДП.

Выбор в качестве вычислителя для прибора многопараметрического контроля 8-разрядного МК обоснован в [7]. Высокая производительность – частота тактового генератора в режиме HS/PLL составляет 40 МГц – и высокая отказоустойчивость – возможность переключения на внутренний генератор при отказе основного – являются основными преимуществами практически используемого в приборе МК серии PIC18F8xxx. Применение аппарата теории нейронных сетей по сравнению с другими способами организации памяти (см. табл.), требующими хранение всех комбинаций, обеспечивает неизменную квадратичную сложность алгоритма поиска при любом числе контролируемых параметров.

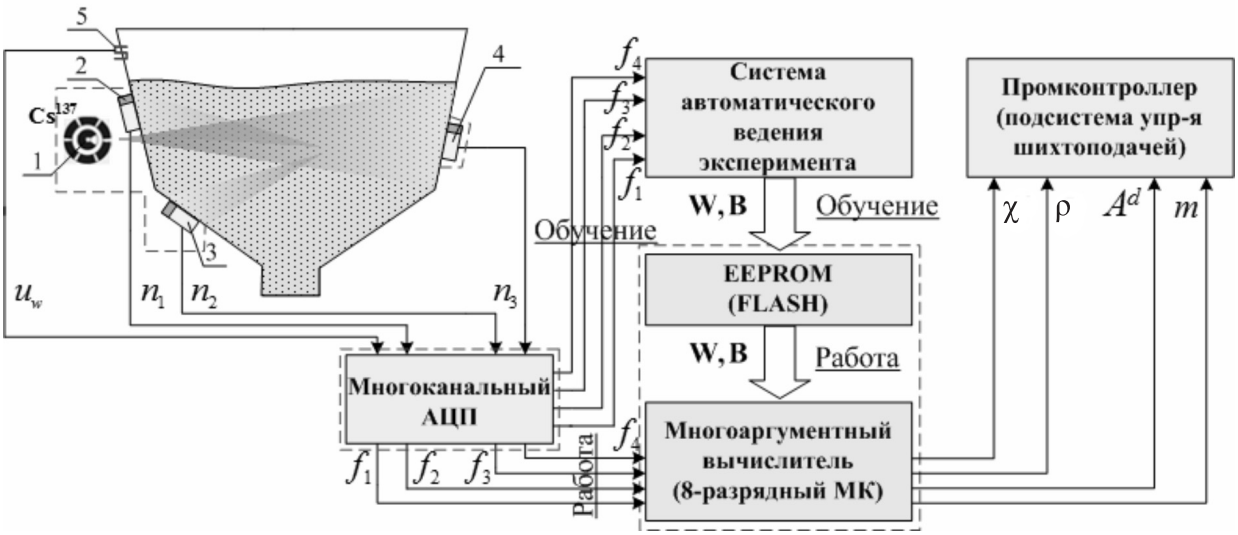


Рис. 2. Функциональная схема прибора многопараметрического контроля качества кокса

Сопоставление алгоритмов контроля по сложности и объёму памяти

Число параметров контроля q	Объём памяти, Кб / временная сложность алгоритма						
	q-мерный массив	Линейная структура		Вариант полного k-ичного дерева		ИНС (2-слойный персептрон)	
2	19,53 / $O(n\times\log n)$	39,06	$O(n)$	146,58	$O(\log_k m)$	0,16	$O(n^2)$
3	2929,69 / $O(n^3)$	5859,38		20300		0,53	
4	390625 / $O(n^4)$	781250		$2{,}495\times10^6$		1,31	
5	$4{,}883\times10^7$ / $O(n^5)$	$9{,}766\times10^7$		$2{,}984\times10^8$		2,33	

В [8] на примере МК PIC18F8xxx доказано, что при контроле двух-трёх параметров сыпучего материала для хранения синаптических весов и значений пороговых элементов достаточно EEPROM-памяти, объём которой для названной линейки устройств составляет 1 Кб. В этом случае глобальные неизменяемые массивы коэффициентов объявляются и инициализируются в электрически стираемой памяти один раз при загрузке программы МК. При $q > 3$ массивы весов и смещений требуют прошивки во FLASH-память устройства.

Логическая структура (рис. 3) вычислителя для прибора 3-параметрического контроля рассматривается в [8]. Предлагается каждый показатель качества доменного кокса аппроксимировать

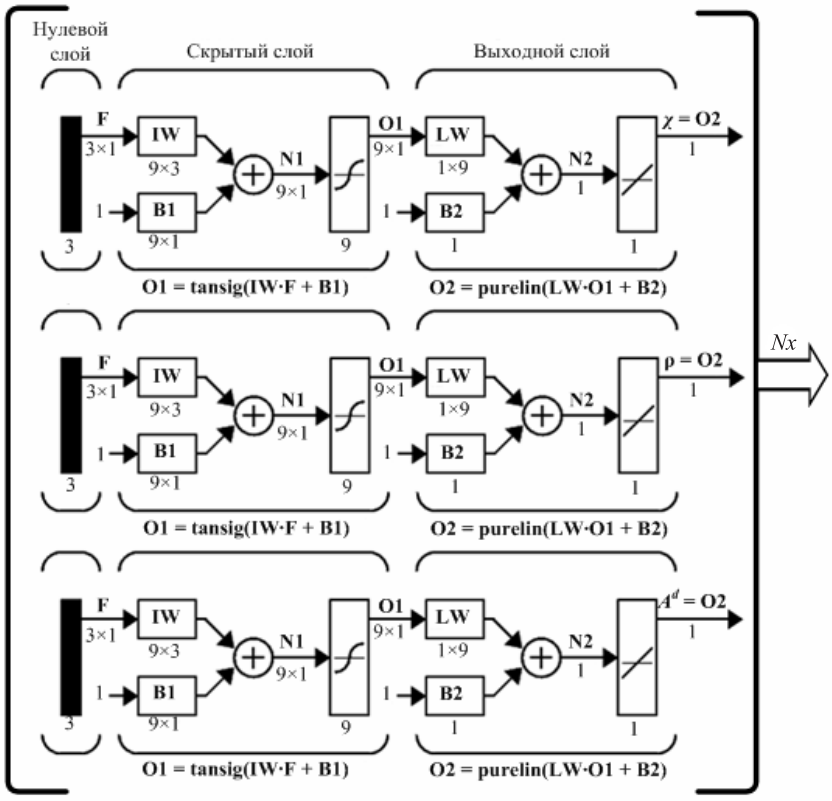


Рис. 3. Логическая структура вычислителя для прибора многопараметрического контроля качества кокса

отдельной ИНС с девятью нейронами в скрытом слое, оценивая производительность такой сети величиной средней за эпоху квадратичной ошибки. Использование подобной структуры даёт возможность учитывать влияние отдельного параметра кокса на формирование многомерного сигнала. Другие результаты структурного синтеза ИНС – выбор алгоритма масштабированного сопряжённого градиента в стратегии *back propagation* при обучении, ведение подстройки весов и пороговых элементов за счёт градиентного спуска с импульсом, применение гиперболического тангенса в качестве активационной функции нейронов скрытого слоя. Результат параметрического синтеза – после двухсот эпох обучения каждой ИНС минимум производительности логической структуры составляет $8{,}4\times10^{-3}$, а максимальная погрешность отдельной сети – 1×10^{-3}.

Для ускорения расчёта, экономии аппаратного стека и памяти RAM МК был модифицирован классический алгоритм аппроксимации при помощи двухслойного персептрона. Ввиду линейности активационной функции нейрона второго слоя получение выхода по всем трём сетям может быть реализовано параллельно в одном цикле. Программное обеспечение вычислителя разработано на языке С, для которого МК семейства PIC18F8xxx оптимизированы на архитектурном уровне. ПО прибора компилировалось в различных средах (mikroC for PIC, MPLAB C18) и было протестировано на эмуляторах mikroC Software Pic Simulator и MPLAB SIM.

Спроектированный РИП предназначен для измерения насыпной плотности доменного кокса в диапазоне 0,4÷1,3 г/см^3, зольности – в диапазоне 1÷50 % и влажности – в диапазоне 0÷15 %.

Таким образом, создание прибора многопараметрического контроля позволит определять показатели качества доменного кокса в бункере на нижнем уровне АСУ ТП ДП. Введение дополнительного информационного канала с тензодатчика даёт возможность одновременно учитывать запас топлива в бункере. Использование в качестве вычислителя высоконадёжного МК обеспечивает большую автономность прибора и быстродействие на уровне 0,1 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М.** Общая металлургия: Учеб. для вузов / 6-е изд., перераб. и доп. М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. 768 с.

2. **Спирин Н.А, Лавров В.В.** Информационные системы в металлургии. Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2004. 495 с.

3. Радиоизотопный преобразователь «РП-24». URL: http://www.scma.ru/ru/products/2-5.html

4. **Назамбаев Т.С., Савёлов В.Д., Полевой А.П.** Измерительно-вычислительный комплекс для бесконтактного контроля качества твёрдого топлива // Современные технологии автоматизации. 2003. № 3.

5. Программно-аппаратный комплекс контроля потоков углепродуктов КПУ. URL: http://variant.uaprom.net/p91173-programmno-apparatnyj-kompleks.html

6. **Гольдин М.Л.** Теоретические основы измерительной техники фотонного излучения. М.: Энергоатомиздат, 1985.

7. **Львов А.С., Полянский А.В.** Алгоритмы многопараметрического контроля металлургических процессов вычислителями низких конфигураций // Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД, САПР, АСНИ и СИИ / Матер. V Междунар. НТК. Вологда, 2009. С. 159–163.

8. **Львов А.С., Полянский А.В.** Разработка многофункциональных приборов контроля параметров шихтовых материалов с минимизацией аппаратной конфигурации и нейросетевым подходом // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надёжность машин, приборов и оборудования / Матер. V Междунар. НТК. Вологда, 2009. С. 250–255.

УДК 519.6;537

В.С. Чеканов, Ю.А. Рахманина

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СЛОЯ ЧАСТИЦ НА ЭЛЕКТРОДАХ ПРИ ЭЛЕКТРООЧИСТКЕ

Очистка рабочих жидкостей функциональных систем механизмов от загрязнений различной физической природы: магнитных и немагнитных, проводников и диэлектриков – очистка маслохозяйства паротурбинных установок от шламов и влаги представляет собой актуальную задачу. Большое количество форсмажорных ситуаций в функционировании авиационной техники происходит из-за высокого уровня загрязнённости рабочих жидкостей и ГСМ, и надёжность работы турбоагрегатов также в значительной степени определяется чистотой маслохозяйства. Между тем механические и инерционные фильтры не всегда способны обеспечить требуемое качество очистки, поэтому в настоящее время широко распространены методы электроочистки. Диэлектрические жидкости очищаются в квазипостоянном электрическом поле от частиц, отличающихся диэлектрической проницаемостью и проводимостью.

Целью настоящей работы является математическое моделирование процесса образования и удержания слоя загрязняющих частиц диэлектрических жидкостей на электродах при электроочистке.

Построение модели

Рассмотрим простейшую ячейку электроочистителя, в которой образовались слои осевших частиц, например кварца, окислов железа, алюминия и др. До включения поля частицы загрязнений взвешены в очищаемой жидкости. Под действием электрического поля они двигаются к электродам и, если не происходит перезарядки на электродах, оседают на них. Движение частиц обусловлено электрофорезом, диполофорезом, электродиффузиофорезом, броуновским движением, переносом частиц в движущейся в электроочистителе жидкости, гравитационными силами [1]. Подробнее процесс движения частиц мы не рассматриваем, предполагая, что они осели на электрод, образовав слои, отличающиеся от очищаемой жидкости электрическими свойствами – диэлектрической проницаемостью ε и проводимостью γ.

Построим математическую модель удержания слоя загрязняющих частиц у электрода при электроочистке, используя термодинамический подход.

Известно [3], что электрическая часть термодинамического потенциала $\Phi_{эл}$ (полной свободной энергии) диэлектрика, помещённого в однородное электрическое поле плоского конденсатора:

$$\Phi_{эл} = -\frac{\varepsilon_0}{2}(\varepsilon - 1)\,\varepsilon E^2 S d, \qquad (1)$$

где d – толщина диэлектрика; E – напряжённость поля; S – площадь пластин.

Для многослойного диэлектрика соотношение (1) легко обобщается:

$$\Phi_{эл} = \sum_{i=1}^{n} \Phi_{эл i} = -\frac{\varepsilon_0 S}{2} \sum_{i=1}^{n} (\varepsilon_i - 1)\varepsilon_i E_i^2 d_i, \qquad (2)$$

где n – число слоёв.

В установившемся режиме, когда ток проводимости через конденсатор не изменяется, плотность тока j постоянна:

$$E_i = \rho_i j;\ j = \frac{\varphi}{RS} = \frac{\varphi}{\sum_{i=1}^{n} \rho_i d_i}, \qquad (3)$$

где R – сопротивление эквивалентного конденсатора; φ – разность потенциалов между пластинами конденсатора; $\rho = 1/\gamma$ – удельное сопротивление:

$$\Phi_{эл} = -\frac{\varepsilon_0 \varphi^2 S}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} (\varepsilon_i - 1)\varepsilon_i \rho_i^2 d_i}{\left(\sum_{i=1}^{n} \rho_i d_i\right)^2}. \qquad (4)$$

Для непрерывного распределения $\varepsilon(x)$ и $\gamma(x)$, где ось Ox направлена по нормали к пластинам, справедливо выражение:

$$\Phi_{эл} = -\frac{\varepsilon_0 \varphi^2 S}{2} \cdot \frac{\int_0^l (\varepsilon(x)-1)\varepsilon(x)\rho^2(x)dx}{\left(\int_0^l \rho(x)dx\right)^2}. \qquad (5)$$

Для простоты рассмотрим одинаковые по толщине и электрическим свойствам слои. Они состоят из частиц загрязнений и дисперсной среды, проводимость (удельное сопротивление) которой может изменяться в широких пределах в зависимости от примесей, растворённой и эмульгированной воды и др. Например, техническое трансформаторное масло имеет удельную электропроводность $\gamma = 10^{-10}(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, а тщательно очищенное – $10^{-15}(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ [2].

Схема ячейки электроочистителя, изображенная на рис. 1, состоит из двух горизонтальных электродов (4, 5), осевших на них частиц дисперсной фазы (1, 3); толщина слоёв d_1, d_3, $d_2 = l - 2d_1$; 5 – очищаемая диэлектрическая жидкость. Линейные размеры пластин конденсатора (длина и ширина) значительно больше, чем расстояние между пластинами. Электроды создают квазипостоянное электрическое поле.

Электроды считаем гладкими, слои частиц – сплошной средой с проводимостью γ.

В действительности слои 1, 2, 3 представляют собой дисперсные среды, свойства которых ρ_1, ε, d зависят от концентрации дисперсионной среды, проводимости $\gamma = \frac{1}{\rho}$, диэлектрической проницаемости ε частиц дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Для малых частиц необходимо учитывать поверхностные проводимости и т. д. Эти величины в общем случае рассчитать не удается. Поэтому опишем экспериментальные процедуры определения γ, ε и d в дисперсионной среде – керосин, содержащей малые (~ 10 нм) частицы магнетита, стабилизированные поверхностно-активными веществами. Это так называемые «магнитные жидкости» [6].

По эллипсометрии света, отражённого от поверхности электрода, определялась усреднённая по диаметру светового пучка толщина слоя частиц, осевших на электрод, и его (слоя) комплексный показатель преломления. В модели усреднённая толщина – это d_1 и d_3. Расстояние между электродами l задавалось соответственными прокладками из диэлектрика. Сопротивление слоев d_1, d_2 и d_3 определялось по вольтамперной характеристике ячейки: измерили расстояние l и определили сопротивление $R = \frac{\rho_1 d_1 + \rho_2 d_2 + \rho_3 d_3}{S}$, где S – площадь электродов, оставляя d_1 и d_3 постоянными с помощью оценок по эллипсометрии.

Считаем, что проводимость слоя d_2 не зависит от l. По нескольким измерениям сопротивлений

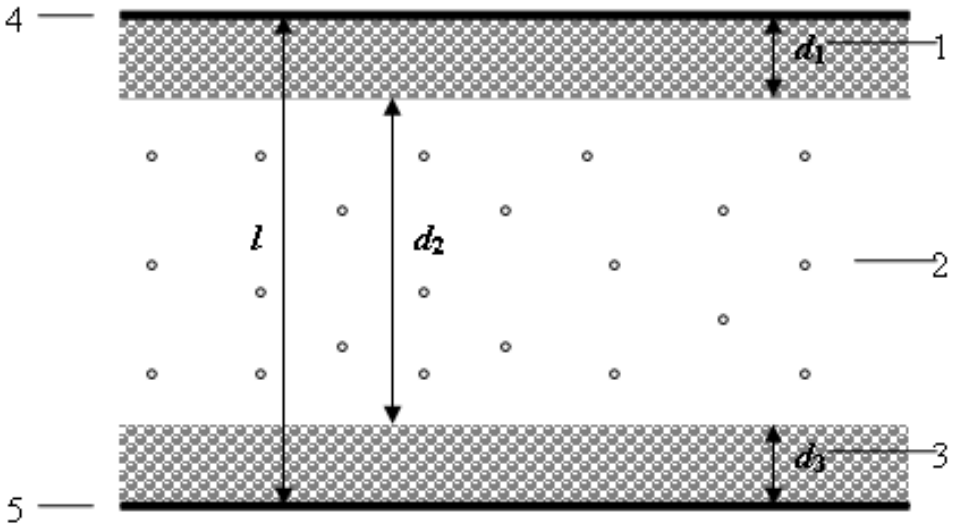


Рис. 1. Схема ячейки электроочистителя
1, 3 – слои загрязняющих частиц (дисперсная фаза); 2 – очищаемая жидкость (дисперсная среда); 4, 5 – электроды; l – расстояние между электродами

$R(l)$ рассчитывали ρ_1, ρ_2, ρ_3. Эти измерения носили оценочный характер, но всегда ρ_1 и ρ_3 оказывались на три–четыре порядка больше ρ_2. Диэлектрические проницаемости слоёв 1, 2, 3 рассчитывали по измерениям ёмкости конденсатора, заполненного магнитной жидкостью. Для слабо концентрированной жидкости (<1 об %) $\varepsilon_2 \approx 2$, для концентрированной (~25 об %) $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_3 \approx 6$.

Решение задачи моделирования

Используя систему аналитических вычислений для математического моделирования Maple, найдём термодинамический потенциал в зависимости от толщины слоя d_1. Электрод не имеет изолирующего покрытия.

Рассмотрим стационарный случай, когда термодинамический потенциал $\Phi_{эл}$ принимает минимальное значение, и после подачи напряжения на электроды ток I установился. Плотность тока $j = \gamma E$, следовательно, напряжённость E_i в слоях определяется соотношением $\rho_1 E_1 = \rho_2 E_2 = \rho_3 E_3$.

Так как мы считаем, что свойства слоёв 1 и 3 одинаковы, выражение (4) упрощается:

$$\Phi_{эл} = -\frac{\varepsilon_0 \varphi^2 S}{2} \cdot \frac{2\varepsilon_1(\varepsilon_1 - 1)\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^2 d_1 + \varepsilon_2(\varepsilon_2 - 1)d_2}{\left(2\frac{\rho_1}{\rho_2}d_1 + (l - 2d_1)\right)^2}. \quad (6)$$

После запуска программы Maple 13, инициализируем переменные уравнения (6). Вводим функцию, характеризующую зависимость термодинамического потенциала от толщины слоя. Для визуализации решения используем функции display() и plot() пакета двумерной графики.

На рис. 2 показана зависимость электрической части термодинамического потенциала $\Phi_{эл}$ от толщины слоя загрязняющих частиц d_1 для различных соотношений удельных сопротивлений слоя загрязняющих частиц и очищаемой жидкости $\frac{\rho_1}{\rho_2}$.

Диэлектрическая проницаемость ε_2 очищаемой жидкости принимается равной 2. Диэлектрическая проницаемость слоя загрязняющих частиц зависит от концентрации и диэлектрической проницаемости материала дисперсной фазы [1, 4] и может варьироваться от трёх до двадцати. Площадь электродов для всех расчётов равна 1м^2.

Найдём силу $F_{эл}$, действующую на слой частиц, граничащий с очищаемой жидкостью, и отнесённую к количеству частиц, помещающихся на площади электрода. Проведём численный эксперимент по определению зависимости этой силы от толщины слоя частиц d_1, отношения удельных сопротивлений $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ и приложенного напряжения φ. Знать величину этой силы необходимо для оценки сдвигового напряжения, т. к. жидкость у электродов считаем неньютоновской [5]. Реология слоя, в частности сдвиговое напряжение, зависит от плотности упаковки, которая в свою очередь, зависит от силы, прижимающей частицы к электроду.

В электрическом поле сила, отнесённая к единице площади электрода, прижимающая слой частиц загрязнения к электроду, в статике компенсируется гидростатическим давлением, равна: $F = -\frac{\partial \Phi_{эл}}{\partial d_1}$, для одной частицы $f = \frac{F}{N}$, где N – количество частиц соответствующего диаметра на единицу площади.

Найдем силу f, удерживающую частицу у электрода. Результаты показывают, что сила, прижимающая частицы, убывает по мере роста слоя и становится равной нулю в точке термодинамического минимума. В этом случае слой перестаёт расти, последние слои частиц могут быть размыты жидкостью, движущейся в электроочистителе.

С изменением соотношения удельных сопротивлений слоя частиц и жидкости меняется максимальная величина силы $F_{эл}$ (на расстоянии $d_1 = a$), как показано в табл. 1.

Таблица 1

Значения силы $F_{эл}$, действующей на частицу диаметром $a = 10^{-6}$ м, $\varphi = 10$ В, $l = 1$ мм

ρ_1/ρ_2	300	100	50
$F_{эл}$ max , Н	$24 \cdot 10^{-11}$	$12{,}5 \cdot 10^{-11}$	$4{,}5 \cdot 10^{-11}$

Сравним силу $F_{эл}$ с гравитационной силой $F_{гр}$, равной разнице между силой тяжести и архимедовой силой $(F_т - F_{арх})$. Расчёты показывают, что сила тяжести частицы кварца диаметра 10^{-6} м равна $F_{гр} \approx (\tau_1 - \tau_2)Vg = (2{,}6 \cdot 10^3 - 0{,}9 \cdot 10^3) \cdot 9{,}8 \cdot 10^{-18} \approx$ $\approx 1{,}5 \cdot 10^{-14}$ Н, где τ_1 – плотность кварца; τ_2 – плотность масла; V – объём электрода; $F_{эл} \sim 10^{-11}$ Н – электрическая сила, удерживающая частицу возле электрода.

Таким образом, сила, притягивающая частицы к электроду, намного больше силы тяжести, и слой частиц на верхнем электроде будет иметь такую же толщину, что и на нижнем.

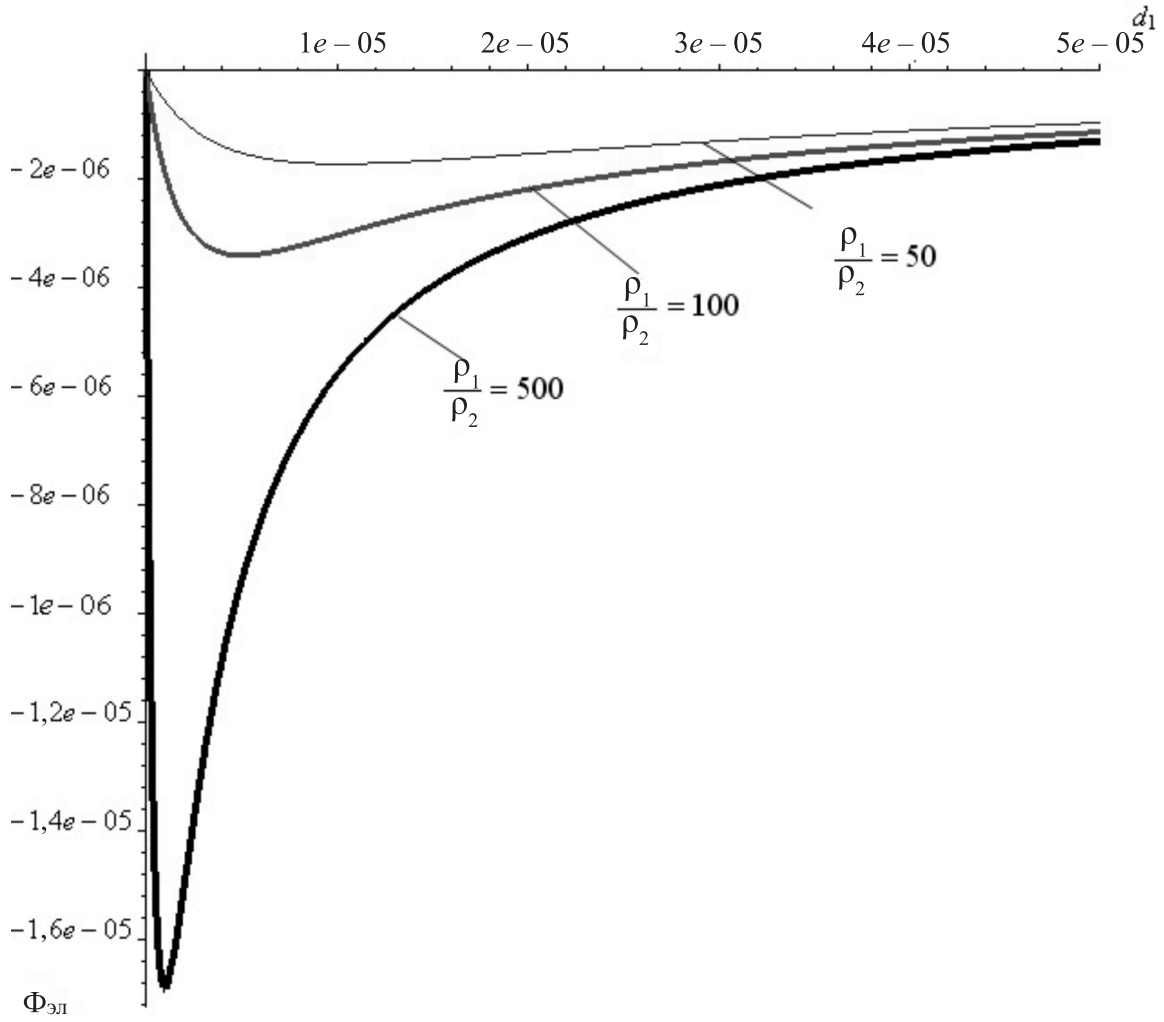


Рис. 2. Зависимость электрической части термодинамического потенциала от $\Phi_{эл}$ толщины слоя d_1 для различных удельных сопротивлений $\frac{\rho_1}{\rho_2}$.

Эти расчёты проводились для частиц размером $a = 10^{-6}$ м. Для частиц большего диаметра, например 10 мкм, расчёты показывают, что сила тяжести равна $F_T \approx (\tau_1 - \tau_2)Vg = (2{,}6 \cdot 10^3 - 0{,}9 \cdot 10^3) \times \times 9{,}8 \cdot 10^{-15} \approx 1{,}5 \cdot 10^{-11}$ Н, то есть сравнима с $F_{эл}$. Таким образом, слой частиц диаметром 10 мкм у верхнего электрода при $\varphi = 10$ В удерживаться не будет.

Отметим, что для разных соотношений удельных сопротивлений максимальная $F_{эл}$ у электродов будет различной.

Рассмотрим теперь влияние теплового движения на толщину слоя частиц, удерживаемых электрическими силами на электродах.

На графике (рис. 3), представлены зависимости термодинамического потенциала от толщины слоя частиц на электродах, построенные для разных напряжений. Расстояние OD – максимальная толщина удерживаемого на электродах слоя загрязняющих жидкость частиц d_{max} без учёта теплового движения; Δd – участок слоя частиц, энергия которых сравнима с kT и которые могут быть оторваны от слоя тепловым (броуновским) движением. Участок ($d_{max} - \Delta d$) – это слой частиц, энергия которых больше kT. При данном напряжении они не «размываются» тепловым движением. Численный эксперимент проводился для частиц диаметром $a = 10^{-8}$ м, поскольку для частиц большего

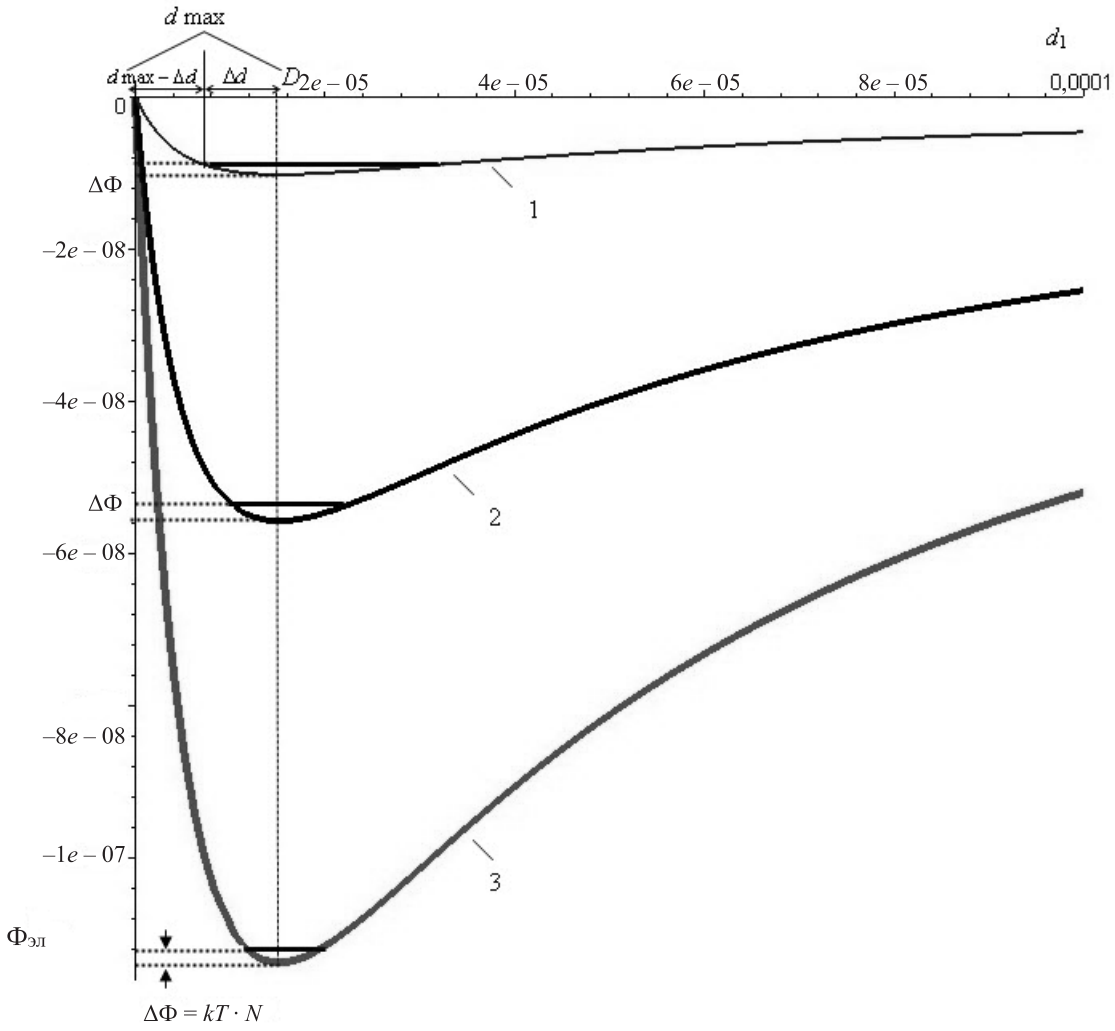


Рис. 3. Зависимость термодинамического потенциала от толщины слоя при разных значениях напряжения:
1 – при φ = 3 В; 2 – при φ = 7 В; 3 – при φ = 10 В

диаметра тепловое движение можно не учитывать. Результаты численного эксперимента подтверждаются экспериментальными данными [6].

Как видим на рисунке, чем меньшее напряжение подаётся на электроды, тем меньший слой частиц, загрязняющих жидкость, стабильно удерживается на них. В табл. 2 представлены результаты зависимости толщины слоя ($d_{max} - \Delta d$) от напряжения на электродах φ.

В результате применения предложенной математической модели и проведённого численного эксперимента по расчёту термодинамического потенциала очищаемой слабопроводящей диэлектрической жидкости были сделаны следующие выводы.

Численный эксперимент по сравнению электрических сил, удерживающих частицы у электрода, и гравитационных сил позволил оценить

Таблица 2

Зависимость толщины слоя загрязняющих частиц на электродах от напряжения

φ, В	1	3	5	7	10	12
$d_{max} - \Delta d$, м	$1{,}347 \cdot 10^{-5}$	$1{,}453 \cdot 10^{-5}$	$1{,}483 \cdot 10^{-5}$	$1{,}490 \cdot 10^{-5}$	$1{,}498 \cdot 10^{-5}$	$1{,}505 \cdot 10^{-5}$

соотношение размеров частиц и напряжения на электродах, при которых гравитационные силы можно не учитывать для известных соотношений удельных сопротивлений загрязняющих частиц и очищаемой жидкости.

Проведена оценка влияния броуновского (теплового) движения на толщину слоя удерживаемых у электрода частиц при электроочистке для заданных размеров частиц, отношений удельных сопротивлений очищаемой жидкости и слоя загрязнений и напряжения на электродах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Духин С.С., Эстрела-Льопис В.Р., Жолковский Э.К.** Электроповерхностные явления и электрофильтрование. Киев: Наукова Думка, 1985. С. 288.

2. **Сканави Г.И.** Физика диэлектриков. Область слабых полей. М.–Л.: ГИТТЛ, 1949. С. 500.

3. **Ландау Л.Л., Лифшиц Е.М.** Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.

4. **Шерман Ф.** Эмульсии / Пер. с англ. под ред. А.А. Абрамзона. Л.: Химия, 1972. С. 448.

5. **Шульман В.П., Дейнега Ю.Ф., Бродкин Р.Г. и др.** Электрореологический эффект. Минск: Наука и техника, 1972. С. 176.

6. **Чеканов В.В., Бондаренко Е.А., Гетманский А.А.** Электроотражение света от границы «магнитная жидкость–алюминиевый электрод» // Нанотехника. 2008. Т. 15. Вып. 3. С. 6–11.

УДК 681.586;681.335.2

В.С. Нагорный, И.А. Машков

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛИЗАЦИИ СТРУИ ПРИ ЭГД УПРАВЛЕНИИ СТРУЯМИ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В монографии [1] предложены новые эффективные методы непосредственного (без подвижных элементов) электрогазо- и электрогидродинамического (ЭГД) преобразования электрических сигналов в пневматические и гидравлические для связи электрической и пневматической (гидравлической) подсистем электропневмогидравлических систем автоматического управления.

Принцип действия разрабатываемых струйных ЭГД электропневматических (ЭПП) и электрогидравлических (ЭГП) преобразователей основан на турбулизации изначально ламинарной затопленной струи газа (жидкости) потоками униполярных ионов. Униполярные потоки ионов создаются в среде, окружающей струю, в резко неоднородном поперечном к струе электрическом поле при приложении к игольчатым электродам высокого электрического напряжения. При этом их знак (отрицательный или положительный) определяется электрическим потенциалом острия игольчатого электрода. Поток ионов, двигаясь в электрическом поле и достигая поверхности струи, передаёт ей количество своего движения, возмущает с помощью такого ЭГД воздействия струю и вызывает её турбулизацию. Турбулизация струи газа (жидкости) создаёт хаотические трёхмерные флуктуации поля скорости, приводящие к расширению струи с образованием так называемого «турбулентного конуса» [1], уменьшению её кинетической энергии и падению давления в приёмном сопле. Это изменение давления в приёмном сопле является выходным пневматическим (гидравлическим) сигналом преобразователей.

Для создания таких преобразователей необходимо знать расстояние x_{tc} от среза сопла, на котором происходит турбулизация струи при отсутствии входного управляющего ЭГД воздействия. Целью статьи является нахождение x_{tc} численным решением уравнений газодинамики для выбранной модели турбулентности с учётом

газодинамических и конструктивных параметров разрабатываемых струйных ЭГД ЭПП.

В настоящие время при численном решении уравнений гидро(газо)динамики широко используются различные полуэмпирические модели турбулентности [2, 3]. Существуют различные гидродинамические программные пакеты, в которых возможно моделирование турбулентности – Fluent, CFX-TASCflow, PHOENICS, STAR-CD, CFD-ACE, NUMECA-FINE, FLOW-3D, SINF. С учётом доступности и обеспечения требуемых функциональных возможностей в данной работе в качестве базового выбран программный пакет Fluent.

В качестве критерия турбулизации струи газа используется изменение по течению струи значения так называемого [2] «динамического коэффициента турбулентной вязкости» μ_t, добавляемого к динамическому коэффициенту молекулярной вязкости μ рабочей среды. Считается, что резкое возрастание μ_t по течению струи соответствует турбулизации струи и образованию турбулентного конуса.

При численных исследованиях процессов турбулизации струи газа и нахождении x_{tc} использовались осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса и неразрывности [2].

Метод осреднения Рейнольдса заключается в замене случайно изменяющихся параметров струи (скорость, давление) в данной точке пространства суммами осреднённых во времени и пульсационных составляющих.

В отличие от исходных уравнений Навье–Стокса, особенность уравнений осреднённого турбулентного движения состоит в том, что в них появился дополнительный тензор турбулентных напряжений Рейнольдса, обусловленный осреднённой величиной переноса пульсационного количества движения пульсационными скоростями.

Предполагается, что линии поверхности тока осреднённого по Рейнольдсу движения проницаемы для пульсационного движения, которое переносит из слоя в слой сквозь линии тока осреднённого движения соответствующее количество движения. Таким образом, в отличие от ламинарного (молекулярного) переноса в турбулизованной струе при турбулентном переносе носителями являются не сравнительно малые по массе отдельные молекулы, а конечные объёмы рабочей среды ЭГД ЭПП и ЭГП. Этот перенос количества движения создаёт турбулентное трение между слоями, который характеризуется по аналогии с молекулярной вязкостью динамическим коэффициентом турбулентной вязкости μ_t.

Система осреднённых уравнений Рейнольдса оказывается незамкнутой. Для определения рейнольдсовых напряжений требуется применение какой-либо модели турбулентности, содержащей или дифференциальные уравнения переноса параметров турбулентности среды, или алгебраические соотношения между параметрами осреднённого и пульсационного движения.

Наиболее широко применяются модели изотропного динамического коэффициента турбулентной вязкости μ_t.

В данной работе применительно к расчёту турбулизации струи газа (воздуха) в ЭГД ЭПП используется модель k-ω SST. Согласно этой модели [3]:

$$\mu_t = \rho K/\omega, \qquad (1)$$

где ω – диссипативная переменная, отражающая характерную частоту турбулентных пульсаций в струе газа; K – кинетическая энергия турбулентности.

Следует отметить, что данная модель впервые применена для рассмотрения низкоскоростных струй с числом Рейнольдса менее 3000, что имеет место в ЭГД ЭПП.

В пакете Fluent для дискретизации уравнений переноса используется метод конечных объёмов: значения физических параметров струи задаются в центрах расчётных ячеек, а осреднённые уравнения движения и неразрывности с учётом (1) записываются в интегральной форме для каждой ячейки.

Выбор параметров расчётной области и сетки производился с учётом имеющихся экспериментальных данных [4] для положения турбулентного конуса затопленной струи воздуха при её турбулизации за счёт естественных возмущений. Анализ экспериментальных данных [4] показал, что максимальное x_{tc} равно 36 калибрам. Следовательно, для полного описания процесса турбулизации струи длина расчётной области должна существенно превышать это экспериментально полученное максимальное значение x_{tc} (примерно в два раза). Выбор высоты сетки связан с обеспечением приемлемого соотношения длины ячейки к высоте (ограничение «снизу»), а также экономией вычислительных ресурсов (ограничение «сверху»).

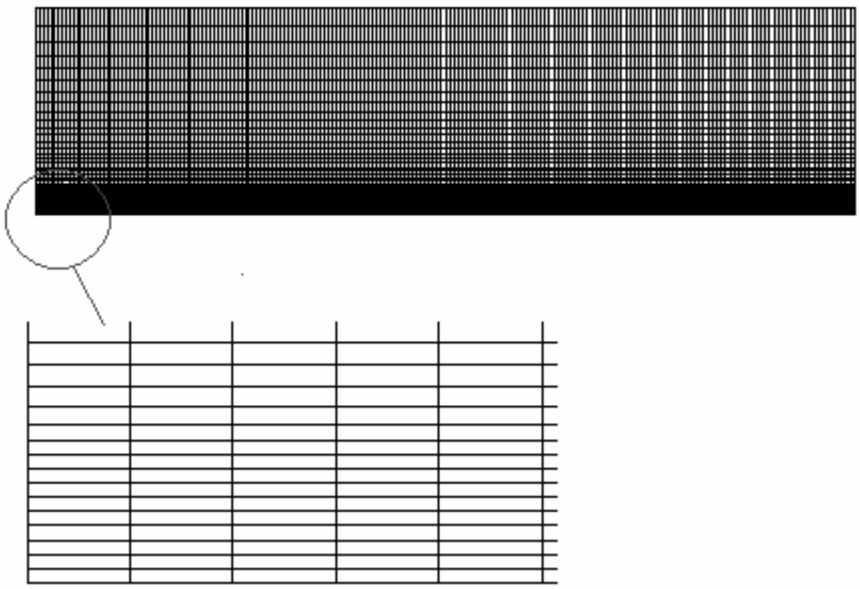


Рис. 1. Топология расчётной сетки

Исходя из этих положений, для решаемой осесимметричной задачи течения круглой затопленной струи воздуха длина расчётной области составила 80, а высота 20 калибров.

С использованием программы GAMBIT 2.3 была построена прямоугольная 2D сетка размерностью 200 (по оси абсцисс x) на 50 (по оси ординат y) ячеек из четырёхугольных элементов. Данная размерность обеспечила приемлемое отношение длины ячейки к её высоте при расчёте осесимметричной задачи распространения турбулизованной круглой затопленной струи воздуха.

Расчётная сетка приведена на рис. 1. Она имеет сгущение у источника истечения круглой струи (формирующего сопла ЭГД ЭПП) в связи с тем, что в данной области имеет место наибольший градиент скоростей.

В качестве граничного условия на срезе формирующего струю сопла был выбран параболический профиль скорости, соответствующий установившемуся по длине ламинарному течению в круглой трубке.

На базе выбранной модели турбулентности k-ω SST с использованием пакета Fluent 6.3.26 проведены численные расчёты изменения динамического коэффициента турбулентной вязкости μ_t по течению круглой затопленной струи воздуха.

На рис. 2 представлены результаты численных расчётов μ_t для низкоскоростных струй воздуха в зависимости от безразмерного отношения расстояния от среза сопла x_k к диаметру d формирующего струю сопла при числах Рейнольдса Re, имеющих место в промышленной пневмоавтоматике. Расстояние x_{tc} от среза сопла, на котором происходит самопроизвольная турбулизация круглой ламинарной затопленной струи воздуха и образуется турбулентный конус, определялось из рис. 2 по месту резкого увеличения значения турбулентной вязкости μ_t.

Из рис. 2 следует, что с увеличением числа Рейнольдса ламинарная струя турбулизуется под действием естественных возмущений на меньших расстояниях от среза сопла. Последнее качественно подтверждается опытными данными [4]. Однако количественные расхождения оказались существенными.

На основании сопоставления полученных результатов с данными экспериментальных исследований [4] расчётная модель была скорректирована с использованием опции Transitional Flows в пакете Fluent. Опция Transitional Flows в рамках модели турбулентности k-ω SST делает расчёт более чувствительным к параметрам, которые характеризуют начальный уровень возмущения потока струи при выходе из формирующего сопла электропневматического преобразователя. К таким параметрам относятся так называемая «интенсивность турбулентности» $(Tu)_{in}$, по определению равная отношению среднеквадратичной величины пульсаций скорости к средней скорости струи, а также соотношение динамических коэффициентов турбулентной и молекулярной вязкостей $(\mu_t/\mu)_{in}$.

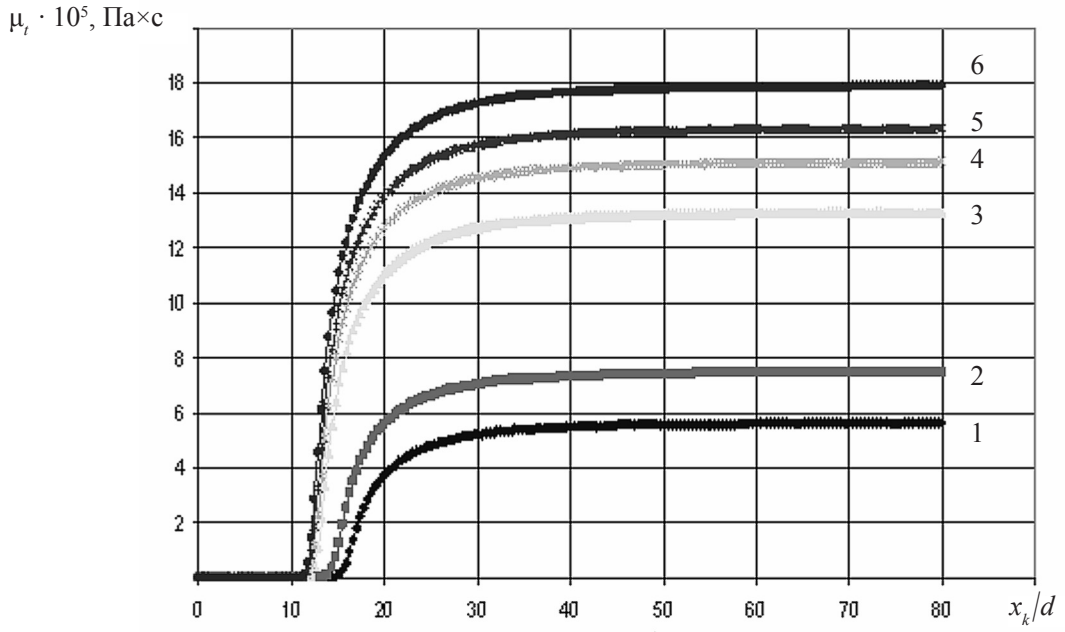


Рис. 2. Изменение динамического коэффициента турбулентной вязкости по оси струи при различных числах Рейнольдса и диаметрах формирующего сопла
(базовая модель *k*-ω SST: $(Tu)_{in}$ = 1,5 %; $(\mu_t/\mu)_{in}$ = 0,001)
1 – *Re* 950; 2 – *Re* 1250; 3 – *Re* 2200; 4 – *Re* 2500; 5 – *Re* 2700; 6 – *Re* 2950

На основании настройки вычислительной модели с целью достижения наилучшего согласования с результатами экспериментов были получены зависимости $(Tu)_{in}$ и $(\mu_t/\mu)_{in}$ от числа Рейнольдса *Re* (рис. 3).

При этом результаты численного расчёта x_{tc} по скорректированной расчётной модели (рис. 4) и экспериментов совпадают с точностью до 1 % во всём диапазоне изменения чисел Рейнольдса и диаметров формирующих сопл, имеющих место в электропневматических преобразователях.

Полученные в настоящей работе данные по параметрам возмущений на выходе из сопла (неизвестные из опытов) являются необходимыми

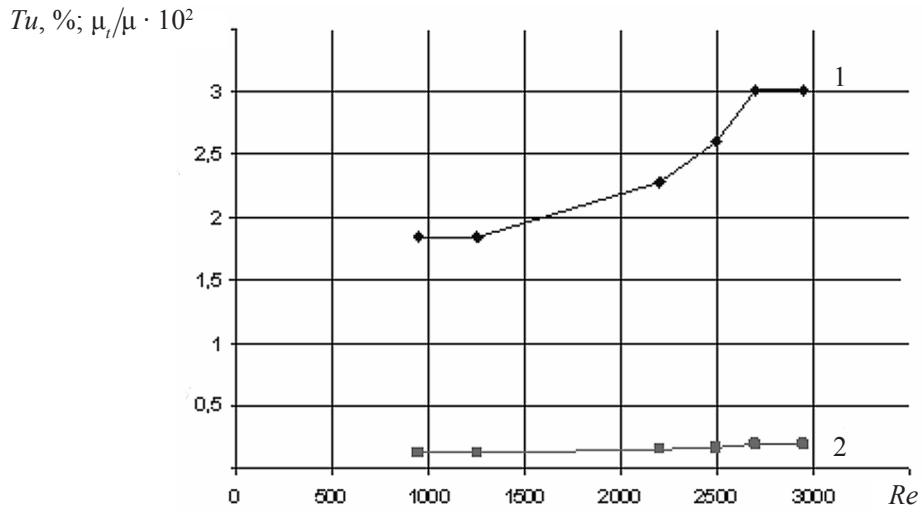


Рис. 3. Интенсивность турбулентности и соотношение динамических коэффициентов турбулентной и молекулярной вязкости на выходе струи из сопла в зависимости от числа Рейнольдса
1 – Tu, %; 2 – $\mu_t/\mu \cdot 10^2$

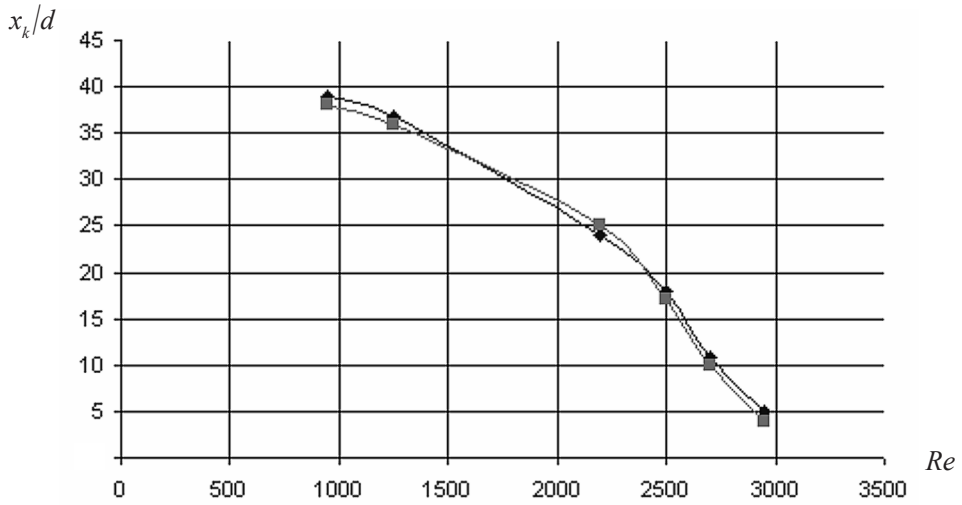


Рис. 4. Сопоставление результатов численного расчёта зависимости безразмерной координаты турбулизации струи (опция Transitional Flows) от числа Рейнольдса Re с экспериментальными данными (—◆—) Эксперимент; (—■—) Расчёт

для планируемых в дальнейшем расчётов статических характеристик ЭГД ЭПП при моделировании управляющего ЭГД воздействия униполярными потоками ионов на вытекающую из сопла ламинарную струю.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук, проф. Е.М. Смирнову за постановку задачи исследований и постоянное внимание к работе.

Работа выполнена в соответствии с проектом № 2.1.2/6494 АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нагорный В.С.** Электрофлюидные преобразователи. Л.: Судостроение, 1987. 252 с.

2. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 736 с.

3. **Wilcox D.C.** Turbulence modeling for CFD / DCW Industries, 1993. 540 p.

4. **Wilcox D.C.** Turbulence modeling for CFD / DCW Industries, 1993. 540 p.

5. **Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г.** Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1973. 360 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АРПАБЕКОВ Муратбек Ильясович – *доцент кафедры транспортных систем Евразийского Национального университета имени Л.Н. Гумилева, кандидат технических наук.*

010008, Республика Казахстан, г. Астана, ул. Мунайтпасова, д. 5. Тел. (7172) 35-38-06, ф. (7172) 35-38-08

АХМЕТОВ Денис Булатович – *инженер кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, магистр.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-61-59, e-mail: akhmetov_rphf@yahoo.com

БАБЕНКО Михаил Григорьевич – *аспирант кафедры высшей алгебры и геометрии Ставропольского государственного университета.*

355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1. Тел. (8652) 35-68-32, e-mail: whbear@yandex.ru

БАБКИН Александр Васильевич – *директор научного комплекса Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук, доктор экономических наук, профессор.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-18-21

БАРЫШНИКОВА Наталья Юрьевна – *аспирант кафедры вычислительных систем и информатики Санкт-Петербургского государственного университета водных коммуникаций.*

198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7

БУБНОВ Владимир Петрович – *доцент кафедры информационных и вычислительных систем Петербургского государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.*

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. Тел. (812) 457-83-56, e-mail: altyr@mail.ru

ВАНИНА Елена Александровна – *заведующий кафедрой теоретической и экспериментальной физики Амурского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.*

675027, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, д. 21. Тел. (4162) 39-45-08, e-mail: evanina@yandex.ru

ВЕРЕМЧУК Александр Сергеевич – *адъюнкт кафедры автоматизации управления Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского.*

197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13. E-mail: werem696@mail.ru

ВОЛКОВ Валерий Федорович – *профессор кафедры автоматизации управления Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, доктор военных наук.*

197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13. E-mail: werem696@mail.ru

ВОРОБЬЁВА Ольга Сергеевна – *инженер-электроник кафедры автоматики и вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

ДУПЛИНСКИЙ Михаил Александрович – *преподаватель кафедры узлов связи Военной академии связи имени С.М. Буденного.*

194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3.

ЖГУН Антонина Александровна – *младший научный сотрудник кафедры систем связи Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого, аспирант.*

173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41

ЖГУН Татьяна Валентиновна – *доцент кафедры систем связи Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого, кандидат технических наук.*

173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41

ЗАИКИНА Наталья Валерьевна – *аспирант кафедры управления и системного анализа в теплоэнергетике Самарского государственного технического университета.*

443010, г. Самара, ул. Галактионовская, д. 141, к. 52. Тел. (846) 332-42-34, e-mail: natalizvol@mail.ru

ИВАНОВСКИЙ Ростислав Игоревич – *профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. (812) 297-16-39, e-mail: iri@dcn.infos.ru

ИГНАТОВА Елена Ивановна – *доцент кафедры робототехники и технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел. (812) 556-34-82, e-mail: kafedra@rtc.ru

КАРПУХИН Александр Игоревич – *старший преподаватель кафедры государственного и муниципального управления Российской экономической академии имени Г.В. Плеханова.*

117997, Москва, Стремянный пер., д. 36. E-mail: akarpuhin@armd.ru

КЛИШИН Сергей Михайлович – *старший преподаватель кафедры информационной безопасности Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота.*

236029, г. Калининград, ул. Молодежная, д. 6. Тел. (4012) 92-51-18

КОМАРОВ Михаил Петрович – *профессор кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор военных наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: komarovkmp@mail.ru

КОРНЕЙЧУК Борис Васильевич – *заведующий кафедрой политэкономии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор экономических наук, профессор.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

КОРОТКОВ Александр Станиславович – *профессор кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-61-59

КРАКАУ Татьяна Константиновна – *профессор кафедры информационных и управляющих систем Санкт Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-42-18

КРОШИЛИН Александр Викторович – *доцент кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета, кандидат технических наук.*

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1. Тел. (4912) 46-03-03, ф. (4912) 92-22-15, e-mail: alfzdrprog@mail.ryazan.ru

КРОШИЛИНА Светлана Владимировна – *доцент кафедры вычислительной и прикладной математики Рязанского государственного радиотехнического университета, кандидат технических наук.*

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1. Тел. (4912) 46-03-03, ф. (4912) 92-22-15, e-mail: asak_kasa@mail.ru

КУЗЬМЕНКО Владимир Александрович – *ассистент кафедры математического анализа и моделирования Амурского государственного университета.*

675027, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, д. 21. Тел. (4162) 39-45-08, e-mail: evanina@yandex.ru

КУЛЕШОВ Игорь Александрович – *заместитель начальника научно-исследовательского центра, доцент Военной академии связи имени С.М. Буденного, кандидат военных наук.*

194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3

ЛАРИЧЕВ Андрей Витальевич – *аспирант кафедры автоматизации и систем управления Череповецкого государственного университета.*

162606, г. Череповец, Советский пр., д. 8. Тел. (8202) 51-81-32, e- mail: ereboss@yandex.ru

ЛЬВОВ Антон Сергеевич – *аспирант кафедры автоматизации и систем управления Череповецкого государственного университета.*

162606, г. Череповец, Советский пр., д. 8. Тел. (8202) 51-81-32, e-mail: grosskaiser@gmail.com, aslvov@severstal.com

МАКСИМОВА Татьяна Геннадьевна – *заведующий кафедрой статистики Санкт-Петербургского торгово-экономического института, доктор экономических наук, профессор.*

194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50. Тел. (812) 297-420-52

МАЛАХОВ Юрий Анатольевич – *преподаватель кафедры узлов связи Военной академии связи имени С.М. Буденного.*

194064, Санкт-Петербург, К-64, Тихорецкий пр., д. 3

МАШКОВ Иван Алексеевич – *магистр кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-60-88, e-mail: mashkov_5267241@list.ru

НАГОРНЫЙ Владимир Степанович – *профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, Заслуженный деятель науки Российской Федерации.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел (812) 552-60-88, e-mail: nagorny@jet.hop.stu.neva.ru

НОВОСЕЛОВ Юрий Владимирович – *соискатель кафедры прикладной математики Московского энергетического института (технического университета).*

111250, Москва, Е-250, ул. Красноказарменная, д. 14

НОСОВА Оксана Владимировна – *аспирант кафедры автоматизации систем и вычислительной техники Московского государственного университета пищевых производств.*

125080, Москва, Волоколамское шоссе, д. 11. E-mail: N_Oksana@bk.ru, Onosova@makc.ru

ОСАДЧИЙ Александр Иванович – *профессор кафедры информационных управляющих систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций, доктор технических наук.*

191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 61. E-mail: ai_osad@mail.ru

ОСИПОВ Евгений Владимирович – *аспирант кафедры информационных систем Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства.*

107078, Москва, ул. Новая Басманная, д. 9/2-4, стр. 1. E-mail: osipov@obrnadzor.gov.ru

ПАШКОВСКИЙ Александр Владимирович – *доцент кафедры информационных систем, электропривода и автоматики Невинномысского технологического института (филиал ГОУ ВПО СевКавГТУ), кандидат технических наук.*

357100, г. Невинномысск, Ставропольский край, ул. Гагарина, д. 1. E-mail: alecsandr_607@rambler.ru

ПЕНСКИЙ Олег Геннадьевич – *профессор кафедры процессов управления и информационной безопасности Пермского государственного университета, доктор технический наук.*

614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15. Тел. (342) 239-63-09, e-mail: ogpensky@mail.ru

ПЛЕШИВЦЕВА Юлия Эдгаровна – *доцент кафедры управления и системного анализа в теплоэнергетике Самарского государственного технического университета, доктор технических наук.*

443010, г. Самара, ул. Галактионовская, д. 141, к. 52. Тел. (846) 332-42-34, e-mail: yulia_pl@mail.ru

ПОЛЯНСКИЙ Анатолий Васильевич – *доцент кафедры автоматизации и систем управления Череповецкого государственного университета, кандидат технических наук.*

162606, г. Череповец, Советский пр., д. 8. Тел. (8202) 51-81-32, e-mail: rucat@vologda.ru, polyanskyav@chsu.ru

ПОНОМАРЕВ Олег Павлович – *заведующий кафедрой информационной безопасности Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота, кандидат технических наук, доцент.*

236029, г. Калининград, ул. Молодежная, д. 6. Тел. (4012) 92-51-18, e-mail: ponomarev7713@mail.ru

ПРИПАДЧЕВ Алексей Дмитриевич – *доцент кафедры летательных аппаратов Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук.*

460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13. Тел. (3532) 75-28-58, ф. (3532) 37-25-10, e-mail: aleksejj-pripadchev@rambler.ru

РАХМАНИНА Юлия Анатольевна – *аспирант кафедры информационных систем и технологий Северо-Кавказского государственного технического университета.*

355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, д. 2. Тел. (8652) 56-55-63, e-mail: lelya87r@mail.ru

РОСТОВ Николай Васильевич – *доцент кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 21. Тел. (812) 297-59-60, e-mail: kafedra@rtc.ru

РУДЕНКО Наталья Александровна – *соискатель кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: natalia_rudenko@list.ru

РУСИНОВ Игорь Александрович – *доцент кафедры экономики и основ управления Государственной морской академии имени адмирала С.О. Макарова, кандидат технических наук.*

199106, Санкт-Петербург, Косая линия, д. 15-а. Тел. (812) 322-44-67, e-mail: rusinov@c3tk.ru

САДАКОВ Дмитрий Сергеевич – *аспирант кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21, e-mail: sadakov@gmail.com

САРАДЖИШВИЛИ Сергей Эрикович – *доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21

СМИРНОВ Николай Николаевич – *старший преподаватель кафедры информационной безопасности Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота.*

236029, г. Калининград, ул. Молодежная, д. 6. Тел. (4012) 92-51-18

СОРОЦКИЙ Владимир Александрович – *доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-76-79, e-mail: sorotsky@mail.spbstu.ru

СПОРЯГИН Кирилл Владимирович – *аспирант кафедры механики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 521-14-97, e-mail: ksporyagin@mail.ru

ТАРАСОВ Сергей Дмитриевич – *аспирант кафедры информационных систем и компьютерных технологий Балтийского государственного технического университета «Военмех» имени Д.Ф. Устинова.*

190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1

ТЫРВА Алексей Владимирович – *аспирант кафедры информационных и вычислительных систем Петербургского государственного университета путей сообщения.*

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. Тел. (812) 457-83-56, e-mail: altyr@mail.ru

УТКИН Марк Аркадьевич – *доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-76-79, e-mail: utkinmark@gmail.com

ХОМОНЕНКО Анатолий Дмитриевич – *заведующий кафедрой информационных и вычислительных систем Петербургского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор.*

190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. Тел. (812) 457-83-56, e-mail: altyr@mail.ru

ЧЕКАНОВ Владимир Сергеевич – *аспирант кафедры информационных систем и технологий Северо-Кавказского государственного технического университета.*

355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, д. 2. Тел. (8652) 56-55-63, e-mail: candaur18@yandex.ru

ЧЕРВЯКОВ Николай Иванович – *заведующий кафедрой прикладной математики и информатики Ставропольского государственного университета, доктор технических наук, профессор.*

355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1. Тел. (8652) 35-68-32

ЧЕРНИКОВ Арсений Викторович – *соискатель кафедры процессов управления и информационной безопасности Пермского государственного университета.*

614000, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 12. Тел. (342) 212-02-40, e-mail: arsenyperm@mail.ru

ШИЛОВ Максим Михайлович – *старший преподаватель кафедры автоматики и вычислительной техники Санкт Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: shilov78@mail.ru

ШОЛАНОВ Корганбай Сагнаевич – *заведующий кафедрой робототехники и механотроники Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева.*

050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, д. 22

ШУЛЬМИН Алексей Сергеевич – *аспирант кафедры систем обработки информации и управления (ИУ-5) Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.*

301663, Тульская обл., г. Новомосковск, ул. Мира, д. 40, кв. 92. Тел. +7 (920) 742-85-97; +7 (48762) 4-78-93, e-mail: shulmin@nfurao.ru

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Жгун А.А., Жгун Т.В., Осадчий А.И. ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ПРИЁМА И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ.

Исследована модель скрытой передачи информации. Предложены условия синхронизации принимающей и передающих станций для сетей с относительно высоким уровнем помех. Получено аналитическое выражение вероятности синхронизации и изучено поведение функции, характеризующей наступление синхронизации для таких каналов. На основе проведённого моделирования даны рекомендации для определения параметров модели.

СКРЫТАЯ ПЕРЕДАЧА. ИНФОРМАЦИЯ. СИНХРОНИЗАЦИЯ. УРОВЕНЬ ПОМЕХ. СЕТИ. КАНАЛ.

Сороцкий В.А., Уткин М.А. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОГО ТОКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫХ КЛЮЧЕЙ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЯЧЕЙКОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ.

Предложена математическая модель, с помощью которой можно определить снижение мощности в нагрузке генератора вследствие протекания обратного тока восстановления тиристоров. Даны рекомендации по выбору режима работы генератора, в котором может быть снижено негативное влияние указанного эффекта.

КЛЮЧЕВОЙ ГЕНЕРАТОР. МНОГОЯЧЕЙКОВЫЙ. ТИРИСТОР. ИНЕРЦИОННОСТЬ ВЫКЛЮЧЕНИЯ.

Ахметов Д.Б., Коротков А.С. ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ РАДИОЧАСТОТНЫХ МЕТОК ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УЗЛА БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ.

Представлены результаты разработки приёмо-передающего устройства считывания информации радиочастотных меток RFID для интегрального узла беспроводной сенсорной сети. Предложена методика расчёта антенны устройства считывания меток на основе печатной платы.

ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО. БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ. СИСТЕМА RFID. РАМОЧНАЯ АНТЕННА. ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА.

Пономарев О.П., Смирнов Н.Н., Клишин С.М. ГИБРИДНЫЕ ЗЕКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛ С КРУГОВЫМ ПРОФИЛЕМ ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ.

Разработан усовершенствованный метод коррекции сферической аберрации источниками поверхностных и вытекающих электромагнитных волн в однозеркальной и многозеркальной антенных системах. Рассмотрена конструкция и результаты экспериментального исследования двухчастотной гибридной зеркальной антенны с поляризационной селекцией сигналов и комбинированием методов пеленгации объектов.

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СТАНЦИЯ. ГИБРИДНАЯ ЗЕРКАЛЬНАЯ АНТЕННА. ПОЛУСФЕРИЧЕСКИЙ ОТРАЖАТЕЛЬ.

Веремчук А.С., Волков В.Ф. ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАТАСТРОФОУСТОЙЧИВОСТЬЮ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ.

Рассмотрена проблема оптимизации затрат, связанных с внедрением технологий обеспечения непрерывности функционирования информационно-управляющих систем АСУ. Предложен подход, базирующийся на использовании метода стохастического динамического программирования.

УПРАВЛЕНИЕ. КАТАСТРОФОУСТОЙЧИВОСТЬ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Карпухин А.И., Осипов Е.В. О СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ К МОНИТОРИНГУ ИНФОРМАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ФЕДЕРАЛЬНЫХ ОРГАНОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВЛАСТИ.

Сделана попытка обозначить основные этапы системного подхода к оценке ситуации в сфере информатизации госсектора, позволяющего определять текущее состояние информационно-телекоммуникационных комплексов (ИТК) федеральных органов исполнительной власти (ФОИВ), осуществлять диагностику системных недостатков в их развитии и формировать обоснованные рекомендации и предложения по устранению этих недостатков.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. АУДИТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ (ИТК). СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД. ФЕДЕРАЛЬНЫЕ ОРГАНЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ВЛАСТИ (ФОИВ).

Заикина Н.В., Плешивцева Ю.Э. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛА С УЧЁТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ.

Исследованы методы оптимального управления инновационным энергосберегающим процессом индукционного нагрева алюминиевых заготовок, вращающихся в магнитном поле постоянного тока. На основе альтернансного метода оптимизации систем с распределёнными параметрами разработаны оптимальные по быстродействию алгоритмы управления с учётом основных технологических ограничений.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ. ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ. ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЯ. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ. АЛЬТЕРНАНСНЫЙ МЕТОД.

Русинов И.А., Барышникова Н.Ю. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ГРУЗОВ.

Рассмотрена формализация процессов перевалки грузов в контейнерах на основе теории массового обслуживания. Описаны модели процессов погрузки/выгрузки с учётом частичной взаимопомощи. Изучены аналитические модели показателей качества процессов в стационарных и динамических режимах.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ. КАНАЛЫ ПЕРЕРАБОТКИ ГРУЗОВ. АППАРАТ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ОПТИМИЗАЦИЯ. ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ.

Руденко Н.А., Комаров М.П. КЛЮЧЕВЫЕ СКВОЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОРГАНИЗАЦИИ И МЕТОДИКА ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ.

Предложена классификация процессов и методика выявления ключевых сквозных процессов в организации. Рассмотрено применение методики при реализации процессного подхода в органах государственной власти.

ПРОЦЕСНЫЙ ПОДХОД. ПРОЦЕССЫ ОРГАНИЗАЦИИ. КЛЮЧЕВОЙ СКВОЗНОЙ ПРОЦЕСС. МЕТОДИКА ВЫБОРА КЛЮЧЕВЫХ СКВОЗНЫХ ПРОЦЕССОВ. КРИТЕРИИ ВЫБОРА КЛЮЧЕВЫХ СКВОЗНЫХ ПРОЦЕССОВ. ОРГАНЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ. НАЛОГОВЫЕ ОРГАНЫ.

Крошилин А.В., Бабкин А.В., Крошилина С.В. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ.

В качестве особенностей построения систем поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для описания предметной области предложена семантическая сеть, основанная на универсальной алгебре. Применён аппарат нечётких множеств для принятия решений. Рассматриваемая модель может быть адаптирована под разные предметные области.

СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ. СЕМАНТИЧЕСКАЯ СЕТЬ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. НЕЧЁТКАЯ ЛОГИКА.

Арпабеков М.И. АДАПТИВНО-ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА.

Рассмотрены способы обработки забоя выемочным манипулятором с учётом обоснования параметров при совмещении нескольких движений в автоматизированном режиме в очистном забое с разрушаемым массивом добычи угля.

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС. ВЫЕМОЧНЫЙ МАНИПУЛЯТОР. ЗАКЛАДОЧНОЕ УСТРОЙСТВО. СЕЛЕКТИВНАЯ ВЫЕМКА. УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ.

Кузьменко В.А., Ванина Е.А. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ К ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДАМ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ.

Рассмотрена имитационная модель перетекания вещества на примере α-γ перехода в Al_2O_3. Проведены исследования с различной пористостью Al_2O_3.

КОРУНДОВАЯ КЕРАМИКА. КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ФЛЮЕНС НЕЙТРОНОВ.

Шилов М.М., Воробьёва О.С., Кракау Т.К. ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ И СРЕДСТВ НЕЧЁТКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ АВТОМАТИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ.

Изучена проблема разработки программно-аппаратных средств поддержки функционирования систем машинного зрения, ориентированных на встраиваемые интеллектуальные системы, а также методов преобразования информации, применимых для задач интеллектуальной обработки изображений в устройствах автоматики и робототехники.

МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ. МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ. СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ.

Шульмин А.С. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА В ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ СКРЫТЫХ ПРОЦЕССОВ

Приведено формализованное описание структуры процесса в операционной системе и его алгоритмической модели. Выделены параметры процесса и атрибуты генерации нового состояния процесса. Исследована сцепленность процессов при вызове системного сервиса. Предложен способ обнаружения скрытых процессов.

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ПРОЦЕСС В ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ. ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ. СКРЫТЫЕ ПРОЦЕССЫ.

Бубнов В.П., Тырва А.В., Хомоненко А.Д. ОБОСНОВАНИЕ СТРАТЕГИИ ОТЛАДКИ ПРОГРАММ НА ОСНОВЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ НАДЁЖНОСТИ.

Рассмотрена модель роста надёжности программ при отладке, описываемая с помощью нестационарной марковской системы обслуживания. Приведены граф переходов между состояниями системы обслуживания, система дифференциальных уравнений, примеры расчёта вероятностных характеристик. Предложены варианты использования модели для прогнозирования времени отладки программ с целью обоснования наилучшей стратегии. Затронуты вопросы задания начальных условий и исходных данных как параметров модели.

КАЧЕСТВО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ. СТРАТЕГИИ ОТЛАДКИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Спорягин К.В. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС НАСТРОЙКИ ТИПОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ.

Рассмотрен программный комплекс для настройки типовых регуляторов для многосвязных объектов управления произвольной размерности, призванный стать простым средством настройки параметров и имитационного моделирования многоконтурных систем управления технологическими процессами и предназначенный для инженеров-разработчиков АСУ ТП и наладчиков промышленных систем.

ТИПОВЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ. МНОГОСВЯЗНЫЕ ОБЪЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ. ИНЕРЦИОННОСТЬ. ЗАПАЗДЫВАНИЕ. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Садаков Д.С., Сараджишвили С.Э. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ПРОТОКОЛ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ФАЙЛООБМЕННОЙ СЕТИ.

Представлен рекомендательный протокол для децентрализованной файлообменной сети. Протокол имеет ряд нововведений для реализации поверх него децентрализованной рекомендательной системы.

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЕ СЕТИ. ОВЕРЛЕЙНЫЕ ПРОТОКОЛЫ. РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.

Ивановский Р.И. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КАК НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ.

Рассмотрены особенности процедур первичной обработки применительно к реальным экспериментам с дизельгенератором судовой энергетической системы. Изучены вопросы выделения полезного сигнала и фильтрации, связанные с большими объёмами вычислений. Представлены примеры вычислений и типовые программные структуры в среде Mathcad.

ЭКСПЕРИМЕНТ. ПРОЦЕДУРА. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ. ФИЛЬТРАЦИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Новоселов Ю.В. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ КОГНИТИВНЫХ ОБРАЗОВ.

Рассмотрена задача создания формальной модели для описания структуры и поведения динамических когнитивных образов (КО). В основу модели положен принцип иерархического разбиения КО на слои, содержащие фрагменты образа. На основе формальной модели разработана компьютерная программная среда построения динамических КО. Одним из достоинств предложенной среды является возможность выявления несогласованности временных интервалов отображения фрагментов разработанного КО на основе конечных автоматов.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ. ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ. КОГНИТИВНЫЕ ОБРАЗЫ. ОНТОЛОГИЯ. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММНАЯ СРЕДА СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ КОГНИТИВНЫХ ОБРАЗОВ. СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.

Припадчев А.Д. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ СИМПЛЕКС-МЕТОДА.

Обоснован и сформулирован метод определения наиболее эффективного функционирования воздушного судна (ВС), основанного на разработанном алгоритме выбора оптимального варианта с применением симплекс-метода.

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ. ПЕРЕМЕННЫЕ. ОГРАНИЧЕНИЯ. ЛИНЕЙНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ. СИМПЛЕКС-МЕТОД.

Корнейчук Б.В., Максимова Т.Г. СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МАРКОВСКОГО ТИПА.

Рассмотрены пять стохастических моделей марковского типа. Показана их применимость для исследования различных социальных процессов.

МАРКОВСКИЙ ПРОЦЕСС. СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ВЕРОЯТНОСТИ ПЕРЕХОДОВ. СОЦИАЛЬНАЯ СТРУКТУРА. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ. ДЕМОГРАФИЯ.

Носова О.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА СТРАХОВОГО ТАРИФА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЯ АПК С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ.

Рассмотрена задача определения размера страхового тарифа, при котором достигается баланс интересов страховой компании и предприятия агропромышленного комплекса. Решение задачи произведено с помощью программного обеспечения «Оценка и управление основной деятельностью страховой компании», разработанного автором.

СТРАХОВАНИЕ. СТРАХОВОЙ ТАРИФ. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ. АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС.

Пашковский А.В. МЕТОД СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАСЧЁТЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ.

Для расчёта магнитного поля линейного двигателя с постоянными магнитами использован метод стандартных элементов. Проанализирована точность и возможности метода на основе сравнения с результатами расчёта МКЭ.

МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. МЕТОД СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. КРАЕВЫЕ ПОЛЕВЫЕ ЗАДАЧИ. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ.

Садаков Д.С., Сараджишвили С.Э. МЕТОД СБОРА ИНФОРМАЦИИ О РЕСУРСАХ ДЛЯ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА, ОРИЕНТИРОВАННОЙ НА ЛВС.

Представлен новый разработанный метод сбора информации о ресурсах локальной вычислительной сети для системы информационного поиска. Метод характеризуется высокой скоростью обхода узлов локальной вычислительной сети и хорошим качеством получаемых результатов.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК. ЛОКАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ. АЛГОРИТМЫ ОБХОДА ГРАФА.

Тарасов С.Д. МЕТОД ТЕМАТИЧЕСКОГО СВЯЗАННОГО РАНЖИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ РЕФЕРИРОВАНИЯ СООБЩЕНИЙ.

Дан обзор современных методов и алгоритмов автоматического сводного реферирования. Рассмотрен разработанный автором метод тематического связанного ранжирования для задач автоматического сводного реферирования.

СВОДНОЕ РЕФЕРИРОВАНИЕ. АВТОМАТИЧЕСКОЕ СВОДНОЕ РЕФЕРИРОВАНИЕ. СВОДНЫЙ РЕФЕРАТ. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО СВОДНОГО РЕФЕРИРОВАНИЯ.

Шоланов К.С., Арпабеков М.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА.

Рассмотрены способы обработки забоя выемочным манипулятором с учётом обоснования параметров при совмещении нескольких движений в автоматизированном режиме в очистном забое с разрушаемым массивом добычи угля.

МНОГОПОДВИЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ С ЗАМКНУТЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ЦЕПЯМИ. ГОРНЫЙ ВЫЕМОЧНЫЙ МАНИПУЛЯТОР.

Кулешов И.А., Дуплинский М.А., Малахов Ю.А. АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ.

Проведён анализ методов моделирования сетей. Рассмотрены основные достоинства и недостатки аналитических и имитационных методов моделирования.

СЕТИ СВЯЗИ. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ.

Игнатова Е.И. ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

Сформулированы задачи моделирования исполнительных систем манипуляционных роботов. Рассмотрены функциональные схемы систем управления манипуляторами и роботами различных типов и сформулированы задачи их компьютерного моделирования. Проанализированы математические модели, необходимые для решения поставленных задач.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ РОБОТОВ. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Игнатова Е.И., Ростов Н.В. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РОБОТОВ.

Обсуждены формулировки прямых и обратных задач кинематики, решаемых при компьютерном моделировании манипуляционных роботов. Рассмотрены различные варианты постановок обратной задачи о положениях звеньев с использованием однородных координат и проанализированы методы их итерационного решения. Приведён пример вычисления методом Гаусса–Ньютона траекторий звеньев шестизвенного робота при движении схвата по программной траектории с постоянной ориентацией, заданной вектором направляющих косинусов.

РОБОТЫ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ. ИТЕРАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ. ОРИЕНТАЦИЯ СХВАТА. НАПРАВЛЯЮЩИЕ КОСИНУСЫ.

Червяков Н.И., Бабенко М.Г. ЛИНЕЙНЫЕ РЕКУРРЕНТНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ.

Проанализировано построение генератора псевдослучайных последовательностей на эллиптической кривой на основе арифметической прогрессии. Предложено построение датчика псевдослучайных чисел на эллиптической кривой, где все арифметические операции выполняются в системе остаточных классов.

ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ. ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ КРИВАЯ. СТАТИСТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. КРИПТОГРАФИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.

Черников А.В., Пенский О.Г. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ В ЖИЛОМ ЗДАНИИ.

Рассмотрен комплексный подход к построению системы создания/поддержания влажности в помещении с помощью нечёткой и чёткой логики. Сделаны выводы о применимости системы.

КЛИМАТОТЕХНИКА. НЕЧЁТКАЯ ЛОГИКА. ВЛАЖНОСТЬ ПОМЕЩЕНИЯ. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.

Полянский А.В., Львов А.С., Ларичев А.В. МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ДОМЕННОГО КОКСА НА БАЗЕ ПРИБОРОВ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ.

Рассмотрены проблемы и предложено решение задачи связанного многопараметрического контроля качества доменного кокса на нижнем уровне АСУ ТП. Использование высоконадёжных микроконтроллеров, реализующих алгоритм нейросетевой аппроксимации, делает возможным создание автономных приборов одновременного контроля зольности, насыпной плотности и влажности кокса в бункере.

КАЧЕСТВО КОКСА. МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ. РАДИОИЗОТОПНЫЕ ПРИБОРЫ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ КОНФИГУРАЦИИ. НЕЙРОСЕТЕВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ.

Чеканов В.С., Рахманина Ю.А. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ СЛОЯ ЧАСТИЦ НА ЭЛЕКТРОДАХ ПРИ ЭЛЕКТРООЧИСТКЕ.

Рассмотрено математическое моделирование процесса образования и удержания слоя загрязняющих частиц диэлектрических жидкостей на электродах при электроочистке. В результате моделирования сравнивались электрические силы, удерживающие частицы у электрода и гравитационные силы; показано соотношение размеров частиц и напряжения на электродах, при которых гравитационные силы можно не учитывать. Проведена оценка влияния броуновского (теплового) движения на толщину слоя удерживаемых у электрода частиц при электроочистке.

ЭЛЕКТРООЧИСТКА. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. СЛОЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ЧАСТИЦ. ДИСПЕРСИОННАЯ СРЕДА. ДИСПЕРСНАЯ ФАЗА.

Нагорный В.С., Машков И.А. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛИЗАЦИИ СТРУИ ПРИ ЭГД УПРАВЛЕНИИ СТРУЯМИ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.

Представлены результаты численных расчётов динамического коэффициента турбулентной вязкости для ламинарных струй воздуха в зависимости от числа Рейнольдса и безразмерного отношения расстояния от среза сопла к диаметру формирующего струю сопла.

СТРУЯ. ТУРБУЛИЗАЦИЯ. ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ.

ANNOTATION

KEYWORDS

Zhgun A.A., Zhgun T.V., Osadchy A.I. RESEARCH OF SYNCHRONISATION OF RECEPTION AND INFORMATION TRANSFER IN STEGANOGRAPHIC SYSTEM.

The article is devoted to the analysis the model of hidden information transmission. Synchronization conditions of accepting and transmission stations for networks with relatively high noise level are proposed. The formula of synchronization probability is calculated and the behavior of function which characterizes the beginning of synchronization for such channels is analyzed. On the base of the developed modelling, guidelines for detection the model parameters are made.

HIDDEN TRANSMISSION. SYNCHRONIZATION. NOISE LEVEL. NETWORKS. CHANNEL.

Sorotsky V.A., Utkin M.A. AN INFLUENCE OF REVERCE RECOVERY THYRISTORS CURRENT ON MULTICELL GENERATORS POWER CHARACTERISTICS.

The paper offers a mathematical model for determination of output power reduction due to reverse recovery current of thyristors. It includes the recommendations how to choose operation mode of generator in order to reduce the negative impact of the effect in question.

SWITCH GENERATOR. MULTICELL. THYRISTOR. SWITCHING OFF INERTIA.

Akhmetov D.B., Korotkov A.S. TRANSCEIVER NODE OF WIRELESS SENSOR NETWORK WITH INTEGRATED RFID READER.

The results of developing of RFID reader for transceiver node of wireless sensor network and procedure for developing RFID reader antenna are performed.

TRANSCEIVER. WIRELESS SENSOR NETWORK. RFID SYSTEM. LOOP ANTENNA. PRINTED CIRCUIT BOARD.

Ponomarev O.P., Smirnov N.N., Klishin S.M. HIBRID ANTENNAS BASED ON CIRCULAR REFLECTORS FOR THE MULTIFUNCTION RADARS.

The update method of correction of spherical aberration by the surface- and leaky- waves sources in single- and multireflector antennas is developed. The design and numerical investigation of dual band hybrid antenna with polarizing selection of signals and combining methods of direction finding are discussed.

RADAR. HIBRID ANTENNA. HEMISPHERICAL REFLECTOR.

Veremchuk A.S., Volkov V.F. OPTIMIZATION OF DISASTER TOLERANCE INFORMATION SYSTEMS.

The problem of optimisation of the expenses connected with introduction of technologies of maintenance of a continuity of functioning of information-operating systems to the automatic control system is considered. The approach which is based on use of a method of stochastic dynamic programming is offered.

MANAGEMENT. DISASTER TOLERANCE. OPTIMIZATION.

Karpuhin A.I., Osipov E.V. ABOUT THE SYSTEM APPROACH TO MONITORING OF INFORMATION COMPLEXES OF FEDERAL ENFORCEMENT AUTHORITIES.

In the article is made the attempt to designate the basic stages of systems approach to the estimation of situation in the sphere of informatisation of public sector, which makes it possible to define the current state of information-telecommunication complexes (ITC) of the enforcement authorities (FEA), to accomplish diagnostics of system lacks in their development and to form the substantiated recommendations and proposal on the elimination of these deficiencies.

INFORMATION TECHNOLOGY. AUDIT OF AN INFORMATION TECHNOLOGY. INFORMATION-TELECOMMUNICATION COMPLEXES. SYSTEMS APPROACH. FEDERAL ENFORCEMENT AUTHORITIES.

Zaikina N.V., Pleshivtseva Yu.E. OPTIMAL CONTROL OF INDUCTION HEATING PROCESS WITH CONSIDERATION OF TECHNOLOGICAL CONSTRAINTS.

The main goal of presented investigations consists in development of optimal control methods for innovative energy-efficient induction heating process of aluminium billets rotating in a DC magnetic field. Time-optimal control algorithms with consideration of main technological constraints are developed based on alternance method for optimization of systems with distributed parameters.

OPTIMAL CONTROL. TECHNOLOGICAL CONSTRAINTS. INDUCTION HEATING. TEMPERATURE FIELD. THERMAL STRESSES. NUMERICAL MODEL. ALTERNANCE METHOD.

Rusinov I.A., Baryshnikova N.Y. FORMALIZATION OF THE PROCESSING OF CONTAINER CARGO.

In article formalisation of processes of transfer of cargoes in containers on the basis of the theory of mass service is considered. Models of processes of loading/unloading taking into account partial mutual aid are stated. Analytical models of indicators of quality of processes in stationary and dynamic modes are considered.

FORMALIZATION. CARGO HANDLING CHANNELS. THE DEVICE OF MASS SERVICE. MODELLING. OPTIMIZATION. DYNAMIC MODES.

Rudenko N.A., Komarov M.P. KEY CROSS-CUTTING PROCESSES IN ORGANIZATION AND METHODS OF THEIR DETECTION.

The clause suggest the classification of processes and methodology to identify key cross-cutting processes in the organization. We consider the application of the technique in the implementation of the process approach in government.

PROCESS APPROACH. PROCESSES OF THE ORGANIZATION. KEY CROSS-CUTTING PROCESS. METHOD FOR CHOICE OF KEY CROSS-CUTTING PROCESSES. CRITERIA FOR CHOICE OF KEY CROSS-CUTTING PROCESSES. GOVERNMENTS. TAX AUTHORITIES.

Kroshilin A.V., Babkin A.V., Kroshilina S.V. THE PARTICULARITIES OF THE BUILDING DECISION SUPPORT SYSTEM ON BASE OF THE FUZZY LOGIC.

In article as particularities of the building decision support system on base of the ill-defined logic for description of the application domain is offered semantic network, founded on universal algebra. The device of indistinct sets is applied to decision-making. The offered model can be adapted under different subject domains.

DECISION SUPPORT SYSTEM. SEMANTIC NETWORK. MODELLING. FUZZY LOGIC.

Arpabekov M.I. ADAPTIVE- PROGRAM CONTROL OF THE ROBOTORISED COMPLEX.

Haring used different methods of coal face mining by automatic removal manipulators (RM) the natural pheromena of coal breaking by cutting were established theoretically and experimentally. Both manoeuvrability and steadyness of some combined manipulators working under automatic and adaptive programming control were taken into consideration. Local coal seams were mined by robotorised complexes.

ROBOTORISED COMPLEX. EXCAVATIONAL MANIPULATOR. STOWAGE CONFORMATION. SELECTIVE EXCAVATION. COAL SEAMS.

Kuzmenko V.A., Vanina E.A. APPLICATION OF THE THEORY OF CELLULAR AUTOMATA TO THE PHASE TRANSITION UNDER REACTOR IRRADIATION.

In the article is discussed a simulation model of flowing substance, on the example of α-γ transition in Al_2O_3. Also were conducted studies with different porous Al_2O_3.

CORUNDUM CERAMICS. CELLUAR AUTOMATONS. SIMULATION MODELING NEUTRON FLUENCE.

Shilov M.M., Vorobyova O.S., Krakau T.K. THE MACHINE VISION SYSTEMS AND FUZZY LOGIC APPROACH FOR INTELLECTUAL SYSTEMS OF AUTOMATION AND ROBOTICS.

The problem of machine vision systems development which is oriented on embedded systems and methods of visual information processing which are applicable in intelligent systems are under consider.

MOBILE ROBOT. MICROCONTROLLER CONTROL SYSTEM. INTELLIGENT IMAGE PROCESSING. MACHINE VISION SYSTEM.

Shulmin A.S. FORMALIZES DESCRIPTION OF PROCESS IN THE OPERATING SYSTEM AND ITS USAGE WHILE REVEALING HIDDEN PROCESSES.

The article is about formalized description of process in the operating system: its structure and its algorithmic model. Parameters of process and attributes for generation the new state of the process are determined. Interconnection of the process while the system service routine is running is analyzed. A new method for revealing the hidden process is suggested.

OPERATING SYSTEMS. PROCESS AS A PART OF THE OPERATING SYSTEMS. THE COMMON THEORY OF PROCESSES. HIDDEN PROCCESSES.

Bubnov V.P., Tyrva A.V., Khomonenko A. D. THE REASONING OF TESTING STRATEGY ON BASIS OF NONSTATIONARY SOFTWARE QUALITY MODEL.

The software reliability growth model on testing stage with means of nonstationary Markov chains is described. The graph of service system states transitions is presented as well as the system of differential equations and examples of the probabilistic characteristics calculations. The ways of using the model to forecast required testing time and choose more efficient strategy are proposed. The problem of starting conditions and source data as model parameters is shortly discussed.

SOFTWARE QUALITY. TESTING STRATEGY. MODELLING.

Sporyagin K.V. SOFTWARE FOR TYPICAL CONTROLLER ADJUSTMENT FOR ARBITRARY DIMENSION MULTIVARIABLE OBJECTS.

Software for typical controller adjustment for arbitrary dimension multivariable objects is presented in the article. This software has to be convenient tool for parameters adjustment and simulation multiple-input, multiple-output (MIMO) systems and has to be used by industrial control engineers.

TYPICAL CONTROLLERS. MIMO OBJECTS. RESPONSE TIME. TIME DELAY. SIMULATION.

Sadakov D.S., Saradgishvili S.E. DECENTRALIZED RECOMMENDATION PROTOCOL FOR PEER-TO-PEER NETWORKS.

This article describes a new recommendation protocol for the BitTorrent P2P network that will allow for a better recommendation system to be built. The protocol adds features on top of Tribler's BuddyCast protocol that will allow more features in the overlaid recommendation system.

PEER TO PEER NETWORKS. OVERLAY NETWORK PROTOCOL. RECOMMENDATION SYSTEM.

Ivanovsky R.I. PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA POWER OBJECTS AS THE INITIAL STAGE OF THEIR MODELING.

Features of procedures of a preprocessing with reference to real experiments with the diesel-generator a ship power system are considered. Problems of allocation of a useful signal and the filtrations connected with great volumes of calculations are solved. Examples of calculations and typical program structures in MathCAD are presented.

EXPERIMENT. PROCEDURE. PREPROCESSING. POWER OBJECT. FILTRATION. SIMULATION.

Novoselov Y.V. DEVELOPING AND APPLICATION OF COMPUTER PROGRAM STUDIO FOR DYNAMIC COGNITIVE IMAGES CREATION.

The problem of formal model creation for describing structure and behavior of dynamic cognitive images (CI) is considered. The foundation of this model is the principle of hierarchical decomposition of cognitive image on layers, containing image fragments. On the base of formal model computer developer studio of creating of cognitive images is created. One of the advantages of developed studio is the ability of time interval unconformity revelation of CI fragments displaying based on finite state machines.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE. FORMAL MODEL. COGNITIVE IMAGES. ONTOLOGY. COMPUTER PROGRAM STUDIO FOR DYNAMIC COGNITIVE IMAGES CREATION. DESCISION SUPPORT MAKING SYSTEM.

Pripadchev A.D. MATHEMATICAL MODELING OF FLYING STOCK STRUCTURE ON THE BASIS OF SIMPLEX–METHOD.

The method of definition of the most effective function of an aircraft based on the developed algorithm of optimal variant choice with use of simplex method is validated and formulated in this article.

TARGET ORIENTED. VARIABLE. RESTRICTIONS. LINEAR PROGRAMMING. SIMPLEX–METHOD.

Korneychuk B.V., Maximova T.G. THE STOCHASTIC MARKOV MODELS OF TRANSITION PROCESSES.

Five stochastic Markov models of transition processes were conceded. Applications for an analysis of different social processes were examined.

MARKOV PROCESS. STOCHASTIC MODEL. TRANSITION PROBABILITIES. SOCIAL STRUCTURE. FORECASTING. DEMOGRAPHY.

Nosova O.V. DEFINITION OF THE SIZE OF THE INSURANCE TARIFF FOR THE ENTERPRISE OF AGRICULTURE BY MEANS OF IMITATING MODEL.

The problem of definition of the size of the insurance tariff at which the balance of interests of the insurance company and the agriculture enterprise is reached is considered. The problem decision is made by means of the software «the Estimation and management of primary activity of the insurance company», developed by the author.

INSURANCE. THE INSURANCE TARIFF. IMITATING MODEL. AGRICULTURE.

Pashkovsky A.V. STANDARD ELEMENTS METHOD IN COMPUTING OF THE MAGNETIC FIELD OF THE LINEAR ENGINE WITH CONSTANT MAGNETS.

The standard elements method is used for calculation of a magnetic field of the linear engine with constant magnets. Accuracy and opportunities of the method are analyzed on the basis of comparison with results of calculation FEM.

METHOD OF FINAL ELEMENTS. METHOD OF STANDARD ELEMENTS. REGIONAL FIELD PROBLEMS. THE NUMERICAL DECISION.

Sadakov D.S., Saradgishvili S.E. AN EFFECTIVE METHOD OF CRAWLING IN LOCAL AREA NETWORKS FOR INFORMATION RETRIEVAL.

This article describes a new effective method of crawling resources of a LAN to be used in an information retrieval system. The method is relatively faster than methods of other IR systems for LAN environments, and yields good overall results.

INFORMATION RETRIEVAL. LOCAL AREA NETWORKS. WEB CRAWLING.

Tarasov S.D. MULTITOPIC RELATIONS BASED RANKING METHOD FOR MULTIDOCUMENT SUMMARIZATION OF NEWS REPORTS.

An approach to modern methods and algorithms of multidocument summarization is described. In this paper the method developed by the author thematically related rankings to automatically generate summary abstracts is considered.

MULTIDOCUMENT SUMMARIZATION. AUTOMATIC CREATION OF ABSTRACTS. SUMMARY. METHODS AND ALGORITHMS OF MULTIDOCUMENT SUMMARIZATION.

Cholanov K.S., Arpabekov M.I. DINAMIC OF THE MINING OF THE EXCAVATIONAL MANIPULATOR.

Haring used different methods of coal face mining by automatic removal manipulators (RM) the natural pheromena of coal breaking by cutting were established theoretically and experimentally. Both manoeuvrability and steadyness of some combined manipulators working under automatic and adaptive programming control were taken into consideration. Local coal seams were mined by robotorised complexes.

MULTIMOBILE MECHANISMS WITH THE CLOSED KINEMATIC CHAINS. MOUNTAIN MANIPULATOR.

Kuleshov I.A., Duplinskii M.A. Malaxov U.A., CHOICE OF A METHOD OF MODELLING COMMUNICATION NETWORKS.

In clause problems of modelling of communication networks in view of features of construction of modern communication networks are considered. The basic merits and demerits of analytical and imitating methods of modelling.

COMMUNICATION NETWORKS. MODELS. ANALYTICAL MODELS.

Ignatova E.I. PROBLEMS OF MODELING AND COMPUTER-AIDED INVESTIGATION FOR ROBOTIC SYSTEMS.

The different kind of servo systems for manipulators and robots are considered and the problems for their dynamics analysis with the use of a computer are discussed. The functional schemes of control systems for manipulators and robots are considered, and the problems for their investigation are formulated. The mathematical models for simulation of the corresponding systems are presented.

ROBOTIC SYSTEMS. SERVO SYSTEMS. CONTROL SYSTEMS. DYNAMICS ANALYSIS. COMPUTER-AIDED INVESTIGATION.

Ignatova E.I., Rostov N.V. KINEMATIC PROBLEMS FOR ROBOT SIMULATION.

The general formulations of forward and inverse kinematic problems for manipulators are discussed. Some statements of the inverse kinematics with the use of homogeneous coordinates are considered. The solving of corresponding problems by means of iterative methods is analyzed. An example of the joint trajectories calculation for 6-link robot with given gripper orientation is presented.

ROBOTS. COMPUTER-AIDED SIMULATION. FORWARD AND INVERSE KINEMATICS. ITERATIVE METHODS. GRIPPER ORIENTATION. DIRECTIONAL COSINES.

Chervaykov N.I., Babenko M.G. LINEAR RECURRENT SEQUENCES ON ELLIPTIC CURVE.

In article construction of the generator of pseudorandom sequences on an elliptic curve on the basis of an arithmetic progression is analysed. We offer construction of the gauge of pseudorandom numbers on an elliptic curve where all arithmetic operations are carried out in system of residual classes is offered.

PSEUDORANDOM SEQUENCES. ELLIPTIC CURVE. STATISTICAL SECURITY. CRYPTOGRAPHIC SECURITY.

Chernikov A.V., Pensky O.G. SYSTEM ENGINEERING OF MAINTENANCE OF HUMIDITY IN A RESIDENTIAL BUILDING.

In article the complex approach of construction of system of creation, maintenance of humidity in the room, with help fuzzy and unfuzzy logic is considered. Terminating connections about applicability of system are made.

CLIMATE TECHNIQUES. FUZZY LOGIC. CLIMATE OF THE ROOM. CONTROL SYSTEM.

Polyanskiy A.V., Lvov A.S., Larichev A.V. THE MULTIPARAMETER CONTROL OF BLAST-FURNACE COKE QUALITY USING INSTRUMENTS WITH NEURONET ORGANIZATION.

In the article problems of linked multiparameter control of blast-furnace coke quality are described and the solution of the control task on low level of industrial control is noticed. Application of high-reliable microcontrollers implementing the neuronet approximation algorithm enables the creation of independent instruments intended for the simultaneous control of coke ash content, apparent density and humidity in a storage bunker.

COKE QUALITY. MULTIPARAMETER CONTROL. RADIOISOTOPE INSTRUMENTS. CALCULATOR OF CONFINED CONFIGURATION. NEURONET APPROXIMATION.

Chekanov V.S. Rahmanina J.A. MATHEMATICAL MODELLING OF FORMATION OF PARTICLE LAYER ON ELECTRODES IN ELECTROCLEANING PROCESS.

In article mathematical modelling of process of formation and deduction of polluting particles layer of dielectric liquids on electrodes is considered at electroclearing. As a result of modelling ,the electric forces keeping particles at an electrode and gravitational forces were compared, the parity of the sizes of particles and pressure on electrodes at which gravitational forces can be considered is shown. The estimation of influence of Brown (thermal) movement for a thickness of a layer of particles kept at an electrode is spent at electroclearing.

ELECTROCLEARING. MODELLING. ELECTRIC FIELD. A LAYER OF POLLUTING PARTICLES. THE DISPERSIVE ENVIRONMENT. A DISPERSE PHASE.

Nagorniy V.S., Mashkov I.A. NUMERICAL SIMULATION OF JET TURBULIZATION IN ELECTROGASDYNAMIC (EGD) JET CONTROL IN AUTOMATIC SYSTEMS.

Results of numerical calculations dynamic factor of turbulent viscosity for laminar air of jets depending on Reynolds's number and the dimensionless attitude of distance from a cut nozzle by the diameter forming a jet nozzle.

JET. CALCULATION. TURBULIZATION. NUMERICAL CALCULATION.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 2 (97) 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
А.А. Родионова – менеджер по работе с клиентами
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 29.04.2010. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 24,18. Уч.-изд. л. 24,18. 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.