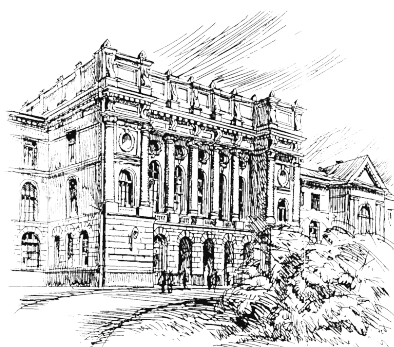


5(133)/2011



Научно-технические ведомости СПбГПУ

ИНФОРМАТИКА.
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ.
УПРАВЛЕНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

СЕРИЯ “ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ”

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

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

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

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

Журнал издается в пяти сериях:

Наука и образование;
Физико-математические науки;
Экономические науки;
Информатика, телекоммуникации, управление;
Гуманитарные и общественные науки.

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

Подписной индекс **18390** в каталоге “Газеты. Журналы” Агентства “Роспечать”.

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010

Содержание

Инфокоммуникационные технологии

Левин Е.К., Рагузин П.С., Татарникова М.Ю. Оценка вероятности ложного срабатывания системы автоматического распознавания голосовых команд.....	7
---	---

Проблемы передачи и обработки информации

Неелова Н.В. Модель определения первичного контента среди множества web-документов.....	13
Сафиуллин Н.Т., Поршнев С.В. Сравнительный анализ расчета мгновенной частоты через преобразование Гильберта и прямую квадратуру	18
Балашов Е.В., Коротков А.С., Румянцев И.А. Методы линеаризации усилителей мощности передатчиков систем мобильной связи – краткий обзор	25

Системный анализ и управление

Шарапова О.Ю. Оптимальное управление многомерными моделями процесса периодического индукционного нагрева	31
Гильманова Н.А. Метод трехфазовой декомпозиции для решения задачи построения маршрутов следования транспортных средств с учетом размещения грузов.....	35
Низамутдинова Р.И., Федорова Н.И. Поддержка принятия решений при управлении взаимодействующими строительными процессами.....	43

Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

Пятак И.М., Морозов Д.В., Пилипко М.М. Схемное решение блока компараторов двухразрядной ячейки конвейерного АЦП	49
--	----

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Потапенко А.Н., Канунникова Е.А., Потапенко Т.А. Метод инверсии для численного расчета распределенных систем типа «плоскость-проводник».....	53
Тименков Ю.В., Тименкова Д.В., Антышев Е.П. Модель потребления ресурсов для взаимозависимых процессов с учетом истории обращений	57
Елисеев В.В., Кузин А.К. Математическое моделирование и оценка прочности линейно-упругого тела в окрестности углового выреза.....	68
Бурлов В.Г., Магулян Г.Г., Матвеев А.В. Общий подход к моделированию систем обеспечения безопасности.....	73
Галиуллин Л.А., Зубков Е.В., Мочалов Д.И. Математическое моделирование режимов испытаний дизельных двигателей	77
Куриков Н.Н., Шабров Н.Н., Мелешенко Н.Г. Определение полей контактных давлений в проушинах прицепного шатуна звездообразного двигателя	81
Морозова Е.В. Математические модели функционирования технологического оборудования промышленного производства	91

Ураков А.Р., Тимеряев Т.В. Разбиение графа с минимизацией средних перемещений в подграфах..	96
Ахатова Ч.Ф. Методы и модели искусственного интеллекта в анализе данных и принятии решений	99

Приборы, информационно-измерительные системы

Кудряшов Э.А., Сушников В.А. Метод снижения погрешности нецентрального нагружения в одноточечном весоизмерительном устройстве с емкостным датчиком силы.....	107
---	-----

Электроника, технологии производства материалов электронной техники

Рихтер М.Р. Алгоритм трассировки при проектировании СБИС	111
---	-----

Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

Щесняк Е.Л., Васильюк И.П., Фоминых Ю.Г. Обеспечение комплексной безопасности образовательного учреждения на основе телекоммуникационных технологий	119
--	-----

Управление в социальных и экономических системах

Верзилин Д.Н., Шаныгин С.И., Черешнева Е.В. Концептуальные основы организационного моделирования социальных систем.....	123
Лепешкин О.М., Гаппоев Р.С. Оптимизация структуры комплекса технических средств в информационно-управляющих системах государственного управления	129
Большаков Б.Е., Шамаева Е.Ф. Мониторинг и оценка новаций в проектировании устойчивого инновационного развития с использованием измеримых величин.....	133

Сведения об авторах	143
---------------------------	-----

Аннотации.....	147
----------------	-----

Contents

Infotelecommunication technologies

Levin E.K., Raguzin P.S. Tatarnikova M.Y. <i>An estimation of the keyword false acceptance error of automatic speech recognition systems as a function of their acoustic similarity to non-keywords</i>	7
--	---

Information transfer and processing

Neelova N.V. <i>Detecting model of the author's copy among cluster of similar web-documents</i>	13
Safiullin N.T., Porshnev S.V. <i>Comparative analysis of computation the instantaneous frequency with Hilbert transform and direct quadrature</i>	18
Balashov E.V., Korotkov A.S., Rumyancev I.A. <i>Linearization methods of power amplifiers of mobile communication system transmitters – short review</i>	25

System analysis and control

Sharapova O.Yu. <i>Optimal control of multivariate model of process of periodic induction heating</i>	31
Gilmanova N.A. <i>A three-phase decomposition method for the capacitated vehicle routing problem with three-dimensional loading constraints</i>	35
Nizamutdinova R.I., Fedorova N.I. <i>Decision-making for cooperative processes management in construction engineering</i>	43

Radio engineering, aerials, SHF-devices

Piatak I.M., Morozov D.V., Pilipko M.M. <i>Circuit of two-digit cell for pipelined analog-to-digital converter</i>	49
---	----

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

Potapenko A.N., Kanunnikova E.A., Potapenko T.A. <i>The inversion method for numerical calculation of the distributed systems of type inversion method for numerical calculation of the distributed systems of type «plane-conductor»</i>	53
Timenkov Yu.V., Timenkova D.V., Antyshev E.P. <i>The model of consumption of computer resources by coupled processes</i>	57
Yelisseyev V.V., Kuzin A.K. <i>Mathematical modelling and evaluation of strength of linear elastic body in the vicinity of a corner indent</i>	68
Burlov V.G., Matveev A.V., Magulyan G.G. <i>The general approach of modelling system support of safety</i>	73
Galiullin L.A., Zubkov E.V., Mochalov D.I. <i>Mathematical modelling of diesel engines testing regimes</i> ...	77
Kurikov N.N., Shabrov N.N., Meleshchenko N.G. <i>Determination of contact pressure distribution in the eyes of a link rod of a radial engine</i>	81
Morozova E.V. <i>Mathematical models of industrial production equipment functioning</i>	91
Urakov A.R., Timeryaev T.V. <i>Graph partitioning with minimization of average travel in subgraphs</i>	96
Akhatova Ch.F. <i>Artificial intelligence method and models for data analysis and decision making</i>	99

Devices, information-measuring systems

Kudryashov E.A., Sushnikov V.A. <i>Method of decrease in an error noncentral loading in the one-dot weight device with the capacitor gauge of force</i>	107
--	-----

Electronics, electronic equipment material production technologies

Richter M.R. <i>Algorithm of trace at VLSI designing</i>	111
---	-----

Information and telecommunication technologies in education

Shesnyak E.L., Vasilyuk I.P., Fominykh Yu.G. <i>Maintenance of complex safety of educations on the basis of telecommunication technologies</i>	119
---	-----

Management in social and economic systems

Verzilin D.N., Shanygin S.I. <i>Conceptual bases of modelling of social systems and estimation of stability of social processes</i>	123
Lepeshkin O.M., Gappoev R.S. <i>Optimization of structure infocommunication technologies in automated control</i>	129
Bolshakov B.E., Shamaeva E.F. <i>Monitoring and novation assessment in the projecting of regional sustainable innovative development with the usage of different measures</i>	133
<i>About the authors</i>	143
<i>Abstracts</i>	147

УДК 004.934.1'1

Е.К. Левин, П.С. Рагузин, М.Ю. Татарникова

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ЛОЖНОГО СРАБАТЫВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД

В компьютерной телефонии широко применяются системы автоматического распознавания голосовых команд (САРГК), построенные с использованием моделей скрытых марковских процессов [1]. Данные модели учитывают сильную изменчивость произнесений голосовых команд и используются в качестве акустических моделей отдельных звуков речи. Последовательности моделей звуков речи образуют акустические модели голосовых команд. Совокупность акустических моделей команд образует сетевую структуру.

Речевой сигнал, несущий информацию о произнесенной команде, преобразуется во временную последовательность векторов параметров сигнала, описывающих изменения во времени его кратковременного спектра. Данная последовательность параметров сопоставляется с акустическими моделями команд. При сопоставлении по алгоритму Витерби в сетевой структуре находится наиболее вероятная модель. Соответствующая команда и является результатом распознавания произнесения.

Так как при произнесении команды непроизвольно произносятся и посторонние слова, то возможно ложное срабатывание САРГК на данные произнесения. Чтобы уменьшить число ложных срабатываний, в сетевую структуру моделей команд вводят акустические модели произнесений посторонних слов, которые, в свою очередь, состоят из моделей отдельных или суммарных звуков. В последнем случае имеют место обобщенные модели.

Решение о результате распознавания принимается с учетом сопоставления произнесений слов не только с акустическими моделями команд, но и с акустическими моделями посторон-

них слов. Если метрика (обычно это логарифм вероятности) сопоставления произнесения с акустической моделью ключевого слова (команды) больше метрики сопоставления с акустической моделью помехи, то принимается решение «произнесено ключевое слово». При более сложном алгоритме принятия решения каждому произнесению ставится в соответствие оценка доверия при сопоставлении его с моделью ключевого слова. Если эта оценка превышает некоторый порог обнаружения ключевого слова, то считается, что было произнесено данное слово. Несмотря на наличие в сетевой структуре моделей произнесений посторонних слов, из-за сильной изменчивости произнесений возможно ложное срабатывание системы на произнесение постороннего слова.

Использование акустических моделей помех может также привести к тому, что из-за сильной изменчивости произнесений голосовая команда трактуется как постороннее слово, и система на нее не реагирует – имеет место ложное подавление (пропуск) команды. Совокупность вероятностей ложного срабатывания (ложной тревоги) и ложного подавления характеризует качество САРГК.

Указанные показатели качества определяют при тестировании системы на достаточно представительной по составу слов и дикторов звуковой базе. При заданной относительной частоте подавления (пропуска) ключевого слова (*false reject rate* – *FRR*) фиксируется относительная частота ложного срабатывания (ложной тревоги – *false alarm rate* – *FAR*) системы на произнесение неключевого слова. В условиях слитной речи, когда ложное срабатывание может возникнуть на стыке произнесений слов, под количеством

произнесений неключевых слов обычно понимают величину, пропорциональную длительности тестирующей звуковой базы за вычетом общей длительности произнесений ключевых слов [2]. Частоты FRR и FAR являются точечными оценками вероятностей ложного срабатывания системы и ложного пропуска ключевого слова.

К сожалению, указанный метод определения параметров качества системы обуславливает сильную зависимость данных параметров не только от вида ключевого слова, но и от звуковой базы: состава дикторов и неключевых слов. Особенно это касается вероятности ложной тревоги. Величина FAR имеет сильную зависимость от количества фрагментов звуковой базы, созвучных ключевому слову, но к нему не относящихся. Поэтому параметры качества используют лишь для сравнения систем на заданной звуковой базе. Нет возможности сравнивать системы, если их тестирование проводилось на разных базах.

Ряд вопросов возникает и при анализе существующего способа подсчета числа ложных тревог при тестировании системы. Например, при ключевом слове «вопрос» система сработала на произнесение слова «вопросами», которое содержит все звуки ключевого слова. Считать ли ложной тревогой срабатывание системы на произнесение данной словоформы ключевого слова? Необходимо оговорить условия, при которых результат распознавания следует считать ложной тревогой. Второй вопрос возникает при подсчете числа ложных тревог в условиях сильной созвучности неключевого слова с ключевым. Например, результатом распознавания является слово «опрос» при наличии ключевого слова «вопрос». Считать данный случай ложной тревоги равноценным ошибочному срабатыванию системы, например, на менее созвучное слово «Россия», неверное, неправильно.

В данной статье рассматривается решение задачи получения оценок вероятности ложной тревоги, слабо зависящих от состава слов тестовой звуковой базы и более объективно (по сравнению с известными методами получения данных оценок) характеризующих качество САРГК.

Оценка ложной тревоги с учетом созвучности

В работах [3, 4] предлагается и анализируется метод определения числа фрагментов тестовой звуковой базы, которые могут вызвать ложное срабатывание системы, в связи с чем их можно

трактовать как произнесения неключевых слов при определении вероятности ложного срабатывания системы. Использование данного метода позволяет снизить зависимость оценки вероятности ложного срабатывания от словарного состава тестовой звуковой базы. Кроме того, анализируется зависимость вероятности ложного срабатывания системы от степени созвучности произнесений ключевого и неключевого слов. Данная зависимость позволяет более точно оценить устойчивость системы к воздействию произнесений посторонних слов. К сожалению, в указанных работах использование звуковых баз малого объема обусловило проведение лишь приближенного анализа метода. В настоящей статье проводится более полный анализ. Суть рассматриваемого метода заключается в следующем.

Анализ ложных тревог, проведенный по результатам экспериментов, показал наличие в произнесениях, вызвавших ложное срабатывание, усеченной последовательности звуков ключевого слова, в которую могут быть вставлены звуки неключевого слова.

Предлагается для каждого ключевого слова выделять различные структуры помех – созвучных фрагментов базы, вызвавших ложное срабатывание системы, и для каждой структуры определять количество фрагментов базы, которые могли бы вызвать ложное срабатывание системы.

Рассмотрим следующий пример. Транскрипция [г а1 с' і0 ј а4] ключевого слова «Россия», состоит из шести знаков. Созвучный фрагмент звуковой базы «профессор», вызвавший ложное срабатывание, имеет транскрипцию [р г а1 ф' е0 s а4 г], содержит три знака г, а1, а4, входящих в состав транскрипции ключевого слова.

Помеха имеет вариант «0 г а1 000 а4 0» структуры типа «0200010», т. е. два звука помехи, входящих в состав звуков ключевого слова, образуют слитную подпоследовательность звуков, которая имеется в ключевом слове, а один «созвучный» звук стоит отдельно. Между парой звуков и одним звуком стоят три транскрипционных знака, отсутствующих в транскрипции ключевого слова. «Созвучные» звуки помехи окружены звуками, отсутствующими в ключевом слове. Данному типу помехи соответствует девять фрагментов звуковой базы, четыре из которых вызвали ложное срабатывание системы, следовательно, для данного типа помехи $FAR=4/9$.

Если имеется достаточно большое количество



произнесений слова «профессор», то можно определить интервальную оценку вероятности ложной тревоги для пары: (ключевое слово – «Россия») – (помеха – «профессор») с приемлемой для ее практического использования погрешностью. Данная вероятность для ключевого слова «Россия» не изменится, если в другой тестовой базе сохранится тот же диктор и то же слово-помеха «профессор». Вероятность определяется лишь степенью изменчивости произнесения слова «профессор», ключевым словом и характеристиками САРГК.

Однако практическая ценность такой характеристики системы мала, т. к. в иной тестовой базе может отсутствовать слово «профессор» или же число его произнесений окажется недостаточным для получения оценки вероятности с малой погрешностью. Целесообразно рассмотреть возможность получения оценки для заданного типа структуры. Математическое ожидание числа m ложных срабатываний (1):

$$M\{m\} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} p_{i,j} n_{i,j}. \quad (1)$$

Здесь $p_{i,j}$ – вероятность ложного срабатывания при i -м варианте структуры и j -м сочетании «неключевых» звуков в структуре помехи; $n_{i,j}$ – число фрагментов базы, соответствующих i -му варианту структуры и j -му сочетанию «неключевых» звуков; N , M_i – число вариантов структуры и число сочетаний «неключевых» звуков для i -го варианта структуры. Предположим, что $p_{i,j}$ слабо зависит от варианта i структуры и вида j сочетаний «неключевых» звуков в структуре помехи, а, в основном, определяется типом k структуры. Тогда $p_{i,j} \approx p(k)$, и вероятность ложной тревоги для заданного типа k структуры (2)

$$p_{FA}(k) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} p_{i,j} n_{i,j} / \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M_i} n_{i,j} \approx p(k). \quad (2)$$

В этом случае число ложных срабатываний может оказаться достаточно большим для получения оценки вероятности с малой погрешностью. Если объем тестирующих баз достаточно велик, то можно получить с приемлемой для практики точностью оценку вероятности для i -го варианта структуры (3):

$$p_{FA}(k, i) = \sum_{j=1}^{M_i} p_{i,j} n_{i,j} / \sum_{j=1}^{M_i} n_{i,j} \approx p(k, i). \quad (3)$$

Здесь принято, что $p_{i,j} \approx p(k, i)$ – вероятность ложной тревоги для i -го варианта структуры k -го типа.

Если объем тестовой базы недостаточен для получения интервальных оценок вероятности с достаточно малым интервалом, то необходимо перейти к более обобщенным характеристикам устойчивости системы к ложным срабатываниям.

За счет взаимного влияния соседних звуков на их произнесение (явление коартикуляции) значимость различных транскрипционных знаков слова-помехи, совпадающих со знаками ключевого слова, для созвучности разная. Если знаки ключевого и неключевого слов имеют одинаковое окружение с обеих сторон, то соответствующий звук неключевого слова с относительно высокой точностью соответствует акустической модели трифона (модели скрытого марковского процесса) ключевого слова. Если окружение совпадает только с одной стороны, то точность соответствия звука модели снижается. Если окружение звука неключевого слова полностью отличается от окружения соответствующего звука ключевого слова, то точность соответствия звука модели является самой низкой.

Введем параметры, характеризующие созвучность ключевого и неключевого слов:

w – число транскрипционных знаков ключевого слова;

a – число одинаковых транскрипционных знаков ключевого и неключевого слов;

e – число одинаковых транскрипционных знаков ключевого и неключевого слов, имеющих слева и справа одинаковое окружение;

s – число одинаковых знаков ключевого и неключевого слов, имеющих одинаковое окружение только с одной стороны;

d – число одинаковых знаков ключевого и неключевого слов, имеющих разное окружение с каждой стороны;

i – число ложных тревог (срабатываний);

g – число фрагментов звуковой базы, созвучных ключевому слову и соответствующих данной структуре помехи.

Совокупность параметров $\{w, e, s, d\}$ определяет степень созвучности ключевого и неключевого слов, поэтому от нее зависит обобщенная оценка вероятности ложной тревоги для группы ключевых слов с числом w транскрипционных знаков.

Если используется не одно ключевое слово, а целый список, то число ложных срабатываний и количество фрагментов базы созвучных списку слов определяется соответствующими числами

для каждого ключевого слова в отдельности. Если ложные срабатывания разных ключевых слов вызваны различными структурами помех, то для списка этих слов ложные срабатывания и созвучные фрагменты базы суммируются. Если структуры помех одинаковы для разных слов, то следует суммировать лишь случаи различающихся помех, соответствующие одной структуре помехи.

Оценка вероятности ложной тревоги по результатам тестирования САРГК

Проведено тестирование системы, разработанной ООО «Центр речевых технологий» (ЦРТ). Система использует акустические модели трифонов – отдельных звуков с учетом зависимости их произнесения от соседних звуков – учитывается явление коартикуляции. Всего используется 4600 моделей. В качестве параметров речевого сигнала применяются коэффициенты кепстра сигнала [1], а также их первые и вторые производные во времени. Общее количество параметров, описывающих кратковременный спектр сигнала на интервале его квазистационарности (20 мс), равно 39.

Тестирование проводилось на двух звуковых базах (базы 1 и 2) с использованием следующего состава ключевых слов: «была, вечером, говорила, даже, действительно, женщина, кажется, комнату, меня, надо, ничего, обыкновенно, очень, подумал, понимаешь, последнее, сегодня, сказал, тебе, телефону, хорошо». В каждом сеансе распознавания использовалось одно ключевое слово. В условиях слитной речи (при тестировании читался текст) появление пауз – явление относительно редкое, поэтому при обработке результатов тестирования наличие пауз не учитывалось.

Базы 1, 2 – результат прочтения четырьмя дикторами (две женщины, двое мужчин) текстов двух рассказов. Соответствующие звуковые файлы (частота дискретизации – 8 кГц, глубина квантования – 16 двоичных разрядов) – это результат прохождения микрофонных сигналов через фильтр, имитирующий частотную характеристику стандартного телефонного канала. База 1 длительностью 2826 с содержит 6221 слово, а база 2 имеет длительность 1812 с и содержит 3964 слова.

На основе результатов тестирования проводилось суммирование чисел i, g ложных срабатываний и фрагментов базы, созвучных каждому ключевому слову, по парам «слово – тип структуры помехи». Затем для каждой пары значений (i, g) вычислялись границы доверительного интервала оценки вероятности ложной тревоги [5]:

$$p_1 = \frac{g}{t^2 + g} \left[w + \frac{t^2}{2g} - t \sqrt{\frac{w(1-w)}{g} + \left(\frac{t}{2g} \right)^2} \right]; \quad (4)$$

$$p_1 = \frac{g}{t^2 + g} \left[w + \frac{t^2}{2g} + t \sqrt{\frac{w(1-w)}{g} + \left(\frac{t}{2g} \right)^2} \right]. \quad (5)$$

Здесь $w = i/g$. В формулах использовалось значение $t = 1,645$, что соответствует доверительной вероятности равной 0,9. Результаты отбора слов, для которых в обеих базах есть одинаковый тип структуры помехи, представлены в табл. 1 (приведены только пары «слово – тип помехи», встречающиеся в обеих базах, а отношение половины доверительного интервала к его середине меньше 25 %).

На основе проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы. Во-первых, видно,

Таблица 1

Значения интервальных оценок для ключевых слов с общей структурой помех

Середина интервала / границы интервала					
Номер базы	Была 010	Говорила 050	Даже 010	Надо 010	Тебе 030
2	0,0086 0,010 – 0,0067	0,8523 0,97 – 0,74	0,0076 0,0095 – 0,0057	0,0056 0,0069 – 0,0043	0,5638 0,67 – 0,46
1	0,0073 0,0087 – 0,0059	0,8083 0,94 – 0,68	0,0108 0,012 – 0,009	0,003 0,0037 – 0,0023	0,6462 0,75 – 0,54
Отношение середин интервалов («база 2/база 1»)					
	1,18	1,05	0,70	1,87	0,87



что с увеличением у слова-помехи числа транскрипционных знаков, одинаковых со знаками ключевого слова, растет вероятность ложной тревоги. Во-вторых, несмотря на изменение состава неключевых слов базы для одинаковых пар «ключевое слово-тип структуры помехи» интервальные оценки перекрываются или очень близки. Можно говорить о том, что рассмотренный метод оценки вероятности ложной тревоги снижает зависимость оценки от состава неключевых слов базы, что позволяет прогнозировать оценку вероятности ложной тревоги для данного ключевого слова при смене состава слов звукового материала.

При прогнозе вероятности p_{FA_real} ложной тревоги для заданного ключевого слова применительно к конкретному звуковому материалу следует воспользоваться формулой

$$p_{FA_real} = \sum_{i=1}^N p_{FA,i} p_i \quad (6)$$

Здесь $p_{FA,i}$ – вероятность ложного срабатывания для i -й помеховой структуры; N – общее число помеховых структур, учитываемых при расчете; p_i – вероятность появления i -й помеховой структуры в звуковом материале.

Рассмотрим возможность получения более

обобщенной оценки вероятности ложной тревоги. Сгруппируем значения числа ложных тревог и «созвучных» фрагментов звуковой базы по набору параметров $\{w, e, s, d\}$. Данные представлены в табл. 2.

Из анализа таблицы следует, что для фиксированного набора значений $\{w, e, s, d\}$ точечная оценка (i/g) вероятности ложной тревоги меняется мало при смене состава слов базы. Она может служить обобщенной оценкой вероятности ложной тревоги для заданного перечня ключевых слов. В табл. 3 приведены значения относительной частоты ложной тревоги (i/g) для параметров $\{w, e, s, d\}$ созвучности, имевших одинаковые значения в базах 1 и 2. Из таблицы следует, что значения относительной частоты ложной тревоги при одинаковых параметрах созвучности для разных баз отличаются не более, чем на 36 %. Можно сделать вывод о малой зависимости обобщенных оценок вероятности ложной тревоги для фиксированного набора ключевых слов от состава слов звуковой базы.

В табл. 4 для справки приведены значения относительной частоты ложной тревоги для ключевых слов, определенные с учетом созвучности, которым соответствуют значения отношений $|p1-p2|/(p1+p2) < 0,4$.

Таблица 2

Сгруппированные значения ложных тревог и созвучных фрагментов

База 1							
w	e	s	d	i	g	i/g	$ p1-p2 /(p1+p2)$
4	0	0	1	336	75419	0,0044	<0,3
4	0	0	2	201	6364	0,032	<0,3
4	0	2	0	193	4341	0,044	<0,3
4	0	2	1	95	318	0,30	<0,3
4	1	2	0	92	239	0,38	<0,3
6	0	0	1	38	23145	0,0016	<0,3
6	0	0	2	44	6631	0,0066	<0,3
6	0	2	1	22	357	0,062	<0,4
6	1	2	0	41	428	0,096	<0,3
7	0	2	1	34	304	0,11	<0,3
7	4	2	0	40	49	0,82	<0,3
8	5	2	0	28	32	0,88	<0,3
База 2							
4	0	0	1	216	43328	0,0050	<0,3
4	0	0	2	90	3482	0,026	<0,3
4	0	2	0	89	1945	0,046	<0,3
4	0	2	1	42	122	0,34	<0,3
4	1	2	0	60	189	0,32	<0,3
6	0	0	2	23	3318	0,0069	<0,4
6	1	2	0	22	149	0,15	<0,4
7	0	2	1	27	195	0,14	<0,3
8	4	2	0	24	44	0,54	<0,3

Таблица 3

Значения i/g для параметров $\{w, e, s, d\}$ созвучности

w	e	s	d	i/g База 1	i/g База 2	База 1/ База 2
4	0	0	1	0,0044	0,0050	0,88
4	0	0	2	0,032	0,026	1,23
4	0	2	0	0,044	0,046	0,95
4	0	2	1	0,30	0,34	0,88
4	1	2	0	0,38	0,32	1,19
6	0	0	2	0,0066	0,0069	0,96
6	1	2	0	0,096	0,15	0,64
7	0	2	1	0,11	0,14	0,78

Таблица 4

Оценки вероятности для $|p1-p2|/(p1+p2) < 0,4$

Слово	i/g (База 2)	i/g (База 1)	«База 1/ База 2»
была	1,60E-02	1,49E-02	1,08
даже	1,45E-02	1,64E-02	0,89
меня	3,63E-03	5,05E-03	0,72
надо	1,00E-02	1,10E-02	0,91
очень	5,86E-03	6,53E-03	0,90
тебе	1,51E-02	1,32E-02	1,14
ничего	7,27E-03	6,17E-03	1,18
сказал	4,57E-03	5,16E-03	0,88
подумал	1,03E-02	3,53E-03	2,90
сегодня	5,18E-03	3,27E-03	1,58
говорила	8,13E-03	5,89E-03	1,38

Здесь $p1, p2$ – границы интервальных оценок вероятности, найденные по формулам (4), (5).

Видно, что оценки, соответствующие разным базам, могут значительно различаться. Например, для слова «подумал» оценки различаются в 2,9 раза. Такие различия объясняются тем, что в

базах присутствуют различные типы структур помех для данного ключевого слова, и вероятности ложного срабатывания системы на эти помехи могут значительно различаться.

Проведенный анализ результатов тестирования САРГК показал, что при изменении состава слов звуковой базы оценка вероятности ложной тревоги с учетом типа структуры фрагмента звуковой базы, вызвавшего ложное срабатывание, меняется мало. При изменении состава слов звуковой базы среднее значение интервальной оценки вероятности ложной тревоги для пары «ключевое слово – помеха заданной структуры» менялось не более чем на 87 %. При этом отношение половины доверительного интервала к его середине не превышало 25 %.

Возможно прогнозирование значения вероятности ложной тревоги для пары «ключевое слово – помеха заданной структуры» на звуковом материале с составом слов, отличающимся от состава слов тестовой звуковой базы. Погрешность прогноза для середины интервальной оценки в данном случае не превышает 87 %. Подсчитав количество фрагментов звукового материала, являющихся помехами с определенной структурой, можно определить число ложных срабатываний для каждого ключевого слова.

При смене состава произносимых слов слабо (менее, чем на 36 %) меняются обобщенные оценки вероятности для перечня ключевых слов, что позволяет сравнивать различные САРГК по данному показателю их качества на тестовых звуковых базах с разными составами произнесенных слов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xuedong, Huang Spoken language Processing: A guide to theory, algorithm and system development [Текст] / Huang Xuedong, Acero Alex, Hon Hsiao-Wuen. –Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, NJ 07632, 2002. –Р. 960.
2. The Spoken Term Detection (STD) 2006 Evaluation Plan [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.nist.gov>
3. Левин, Е.К. Оценка вероятности ложного срабатывания системы автоматического распознавания голосовых команд [Текст] / Е.К. Левин, П.С.Рагузин // Проектирование и технология электронных средств. –2009. –№ 4. –С. 57–61.
4. Левин, Е.К. Зависимость ложного срабатывания системы распознавания голосовых команд от параметров произнесений посторонних слов [Текст] / Е.К.Левин, П.С.Рагузин // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Матер. докладов IX Междунар. науч.-техн. конф. –Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011. –Т. 1. –С. 185–188.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие [Текст] / В.Е. Гмурман; 12-е изд., перераб. –М.: Высш. образование, 2006. –С. 479.

МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО КОНТЕНТА СРЕДИ МНОЖЕСТВА WEB-ДОКУМЕНТОВ

По оценкам специалистов «Яндекс» более 30 % документов в Интернете не уникальны. Это снижает эффективность поиска нужной информации пользователем и создает трудности для поисковых систем, обусловленные увеличением индексных баз за счет избыточной информации, что, в свою очередь, приводит к росту затрат на обслуживание и хранение данных, а также требует большей ресурсной подготовки. Современные направления, связанные с оценкой релевантности и схожести документов [1, 2], позволяют сформировать множество web-документов с оценкой дубли или нечеткие дубли. Тем самым обозначая сопутствующую проблему детектирования дублей – определение первичного контента, ссылка на который будет показываться пользователю при формировании поисковой выдачи.

Существующие методы определения авторства. Можно указать несколько направлений, влияющих на выбор документа, который будет представлен пользователю в поисковой выдаче: авторство, авторитетность документа, тематичность и полнота раскрытия тематики всего web-ресурса, популярность web-ресурса.

Основной параметр выделения первичного web-документа среди копий – авторство. Для определения текстового оригинала разработано несколько методов [3, 4], основанных на человеческом вмешательстве, что неприемлемо для обработки больших объемов информации. Д.В. Хмелевым [5] и последователями [6] предложен способ определения авторства текстов, основанный на формальной математической модели последовательности букв текста как реализации цепи А.А. Маркова. Исследования показали, что наиболее точные результаты дает определение частоты пар букв в их естественных последо-

вательностях в тексте. Однако в работе [7] был предложен способ, основанный на сложностном подходе, позволяющем эффективно измерять близость словаря анонимного произведения к словарю автора, давшего более точный результат. Современные подходы идентификации авторства [8] базируются на модели представления текстовой информации и выделения определенных информативных групп характеристик текста.

Все рассмотренные методы представляют собой вероятностную оценку принадлежности неавторизованного текста известным авторам по матрицам переходных характеристик корпусов текстов, определенных авторов, либо путем идентификации автора с помощью разновидностей искусственных нейронных сетей и аппарата опорных векторов.

В случае определения авторства в рамках web-документов поименованных и проверенных авторов как таковых не существует. Однако строить предположение об авторстве можно на основе иных текстов сайта рассматриваемого документа. Таким образом, ниже предлагается описание модели определения вероятности авторства рассматриваемого web-документа по отношению к текстовой составляющей всего сайта.

Метод оценки авторства web-документов. Обозначим через $D' = \{D'_1, D'_2, \dots, D'_n\}$ обрабатываемое множество дублей, каждый такой дубль является web-документом, принадлежащим соответственно сайтам $A_1, A_2, \dots, A_n$, при этом сайты не пересекаются $A_i \neq A_j$, и каждый имеет помимо рассматриваемого документа другие страницы $A_i = \{D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{im}\}$. На каждой странице присутствует своя текстовая информация B_{ij} . Алгоритм определения авторства выглядит следующим образом.

1. На сайте A_i каждого документа D'_i отбирается l страниц с текстовой составляющей, которые объединяются в обучающие тексты $B_i = B_{i1} \cup B_{i2} \cup \dots \cup B_{il}$. Количество страниц отбирается исходя из требуемого объема обучающей выборки – 100 тыс. букв. Если средний объем текста составляет 3 тыс. букв, то требуется около 30 страниц (для полноценного сайта характерно гораздо большее число страниц).

2. Так как текстовые составляющие рассматриваемых документов являются копиями, обозначим их через $B' = B'_1 = B'_2 = \dots = B'_n$. Тогда запись объединения текстов сайта и рассматриваемого текста примет вид $B_i B' = B_i \cup B'$.

3. Рассчитывается длина сжатых текстов $B_i B'$ и B_i с помощью функции сжатия f_r , в качестве которой предлагается использовать алгоритм *gagw* версии 2.00, показавший наилучшие результаты [6].

4. Для каждого документа D'_i определяется разность между длинами, рассчитанных сжатых текстов: $f_a(B', D'_i) = |f_r(B_i B')| - |f_r(B_i)|$.

5. Чем меньше полученная разность, тем больше вероятность того, что текст B' на странице D'_i является авторским по отношению к ресурсу A_i .

Принцип цитируемости. Для выделения одного документа среди множества дублей можно использовать принцип цитируемости. Но он имеет ряд ограничений: не учитывается тематика и значимость цитирующего ресурса. В современных поисковых системах используется ссылочный поиск и статическая ссылочная популярность (*PageRank* в Google, *ВИЦ* в Яндекс, *ИЦ* в Апорте), позволяющая поисковым системам справиться с примитивным текстовым спамом и учитывающая указанные ограничения. Взвешенный индекс цитирования (как и другие ссылочные факторы ранжирования) рассчитывается из ссылочного графа [9]:

$$PR = (1 - d) + d \sum_{i=1}^n \frac{PR_i}{C_i}, \quad (1)$$

где PR – *PageRank* рассматриваемой страницы; d – коэффициент затухания, означающий вероятность того, что пользователь, зашедший на страницу, перейдет по одной из ссылок; PR_i – *PageRank* i -й страницы, ссылающейся на страницу; C_i – общее число ссылок на i -й странице.

Алгоритмы, применяемые в современных поисковых системах, являются скорее лишь ва-

риантами (1), сохранившими идею, изменив вид формулы. Но качество и количество ссылок напрямую влияют при выделении страницы среди множества копий.

Полнота тематики информационного ресурса. Еще один фактор ценности документа – возможность получения большей информации по теме рассматриваемого документа, что говорит о наличии тематически близких *web*-документов на сайте.

Введем понятие *тематической ценности документа* V . В данном контексте ценность документа V_i будет иметь прямую зависимость от тематической принадлежности всего сайта к тематике рассматриваемого документа:

$$V \approx \cos(T_A, T_D) = \frac{\bar{T}_A \cdot \bar{T}_D}{|\bar{T}_A| \cdot |\bar{T}_D|}, \quad (2)$$

где T_A и T_D соответственно обозначение вектора тематичности сайта и рассматриваемого документа.

N -мерный вектор тематичности строится как вектор весов слов. N – число слов в словаре коллекции. Вес каждого слова j в документе D_i рассчитывается по формуле:

$$P_{ij} = \text{count}_{ij} \cdot IDF_{w_j}, \quad (3)$$

где count_{ij} – число вхождений слова в документ, IDF_{w_j} – обратная частота слова в коллекции. После расчета веса каждого слова в документе вектор нормируется:

$$P_{ij}^* = \frac{P_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m P_{ki}^2}}. \quad (4)$$

Аналогичным образом строится вектор и для всего сайта, при этом текст сайта получается объединением текстов всех входящих в него документов.

Таким образом, модель определения тематической ценности документа можно представить в следующем виде:

1) определяется словарь коллекции, в которой отсутствуют редкие и стоп-слова, т. е. IDF слов, формирующих словарь, лежит в диапазоне значимых слов [10];

2) строится N -мерный вектор тематичности $\bar{T}_{D_i}$ для рассматриваемого документа $D_i \in A_i$, используя формулы (2) и (3);

3) строится N -мерный вектор тематичности $\bar{T}_{A_i}$ для всего сайта $A_i = \{D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{im}\}$, используя формулы (2) и (3);



4) с помощью формулы (1) устанавливается близость векторов $\bar{T}_{D_i}$ и $\bar{T}_{A_i}$. Чем ближе вектора, тем выше тематическая ценность рассматриваемого документа V_i .

Дополнительные оценки ценности ресурса. В качестве дополнительной оценки ценности сайта также можно рассматривать его юзабилити, «метку чистоты», время появления D_i .

Под «меткой частоты» будем понимать вероятность того, что сайт не участвует в краже контента. Предположим, что сайт участвовал в определении авторства n раз, все испытания были независимыми, т. к. рассматривались разные страницы сайта A_i . При этом событие «авторский контент» наступило в m из них. Следовательно, частота появления данного события – это отношение m/n . Согласно теории вероятности при увеличении числа испытаний частота m/n делается все ближе и ближе к определенной величине p , которая будет в рассматриваемом случае показателем чистоты сайта. Таким образом, «метка чистоты» будет определена системой:

$$\begin{cases} p_i = 1, & \text{если } A_i \text{ ни разу не участвовал} \\ & \text{в проверке авторства;} \\ p_i = \frac{m}{n}, & \text{если } A_i \text{ хоть раз участвовал} \\ & \text{в проверке авторства.} \end{cases}$$

В качестве критерия юзабилити A_i и D_i можно предложить использовать поведенческие показатели: среднюю посещаемость сайта $\bar{G}_A$ и страницы $\bar{G}_D$, среднее время пребывания посетителя на сайте $\bar{T}_A$ и на странице $\bar{T}_D$, средний показатель отказа сайта $\bar{F}_D$. Также для оценки важно ввести возраст страницы age_d . Для оценки юзабилити страницы используем функцию $f_u(\text{age}_d, \bar{G}_A, \bar{G}_D, \bar{T}_A, \bar{T}_D, \bar{F}_D) \rightarrow U(A_i, D_i)$. Показатель юзабилити будет лежать в промежутке $[0;1]$. Наиболее удобный сайт соответствует единице, менее популярный – нулю.

Возрастной показатель страницы age_d также можно использовать как отдельный параметр для уточнения авторства. Та страница, чей возраст больше, имеет наибольшую вероятность авторства. В качестве нормировки данного показателя используем формулу $\text{age}'_d(D_i) = \frac{\text{age}_d(D_i)}{(\text{age}_d(D))_{\max}}$, т. е. отношение возрастного показателя рассматриваемой страницы к максимальному возрастному показателю во множестве рассматриваемых документов.

Также во множестве рассматриваемых документов могут встретиться «добросовестные» ресурсы, указывающие авторство статьи. Для этого каждой проверяемой странице в соответствие ставится маркер M_i , показывающий, сколько раз в рассматриваемом множестве сослались на данный источник. Для нормировки результата каждый маркер делится на количество страниц в кластере n :

$$M'(D_i) = \frac{M(D_i)}{n-1}.$$

Итоговая формула определения первичного контента. Основываясь на логических соображениях и степени влияния каждого из перечисленных факторов, составлена интегральная оценка (5) определения первичного документа во множестве дублей. Корректирующие коэффициенты позволяют задать степень влияния каждого фактора:

$$F_a(D_i) = (k_1 \frac{1}{f_a} + k_2 \cdot \text{age}'_d) \times (1 + k_3 \cdot PR_a) \cdot k_4^V \cdot k_5^U \cdot k_6^{M'} \cdot p_i, \quad (5)$$

где f_a – показатель авторства документа D_i ; age'_d – возрастной нормированный показатель документа D_i ; PR_a – показатель цитируемости документа D_i ; V – тематическая ценность документа D_i ; U – показатель юзабилити документа D_i ; M' – маркер источника документа D_i ; p_i – «метка чистоты» документа D_i ; $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – некие коэффициенты.

Документ, получивший наибольшее значение по данной формуле, будет считаться первичным контентом и выдаваться пользователю при запросе. Общая схема определения первичного web-документа представлена на рис. 1.

Поиск оптимальных коэффициентов. Для подбора коэффициентов (5) в данной статье использован итерационный метод Ньютона. Процесс подбора коэффициентов заключался в первоначальной установке значений функции определения авторства с помощью экспертных оценок, далее устанавливались начальные коэффициенты, вычислялась функция для всех точек и находился средний абсолютов по разности вычисленных значений и значений экспертов. В процессе подбора коэффициентов видоизменена формула (5) и введены дополнительные коэффициенты, позволившие приблизить результат к экспертным оценкам, т. е. улучшить его. С помощью MS Excel, используя инструмент «Поиск

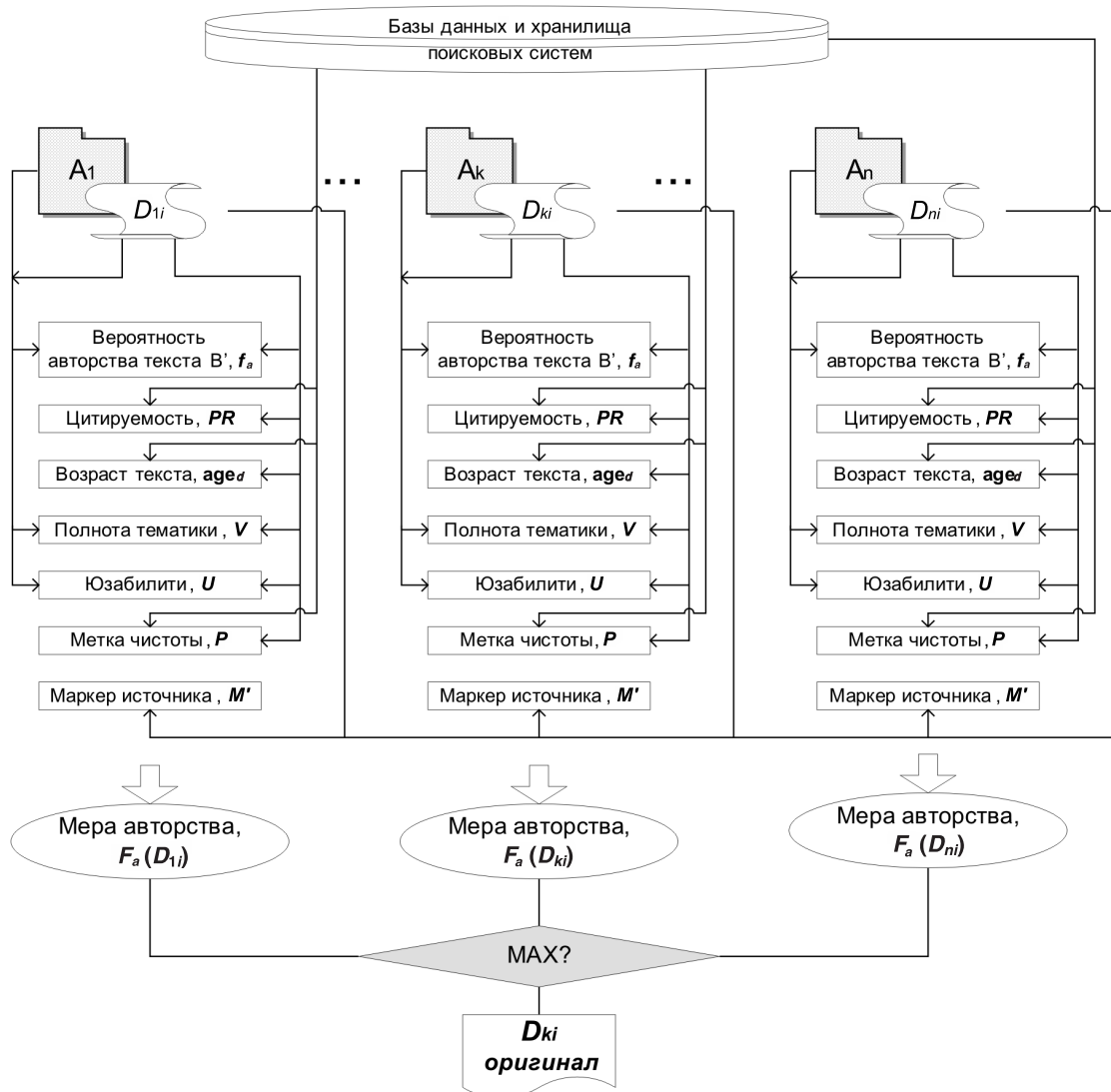


Рис. 1. Схема определения первичного документа

решений», получена следующая формула определения авторства:

$$F_a(D_i) = (0,021063 \cdot \frac{1}{f_a + 0,113003} + 0,043212 \cdot age'_d + 0,001 \cdot V) \cdot (1 + 0,304832 \cdot PR_a) \times (1,006625)^{U+0,04412} \cdot (1,001324)^{M+0,07873} \times \exp(p_i \cdot 1,057178) - 0,06919$$

Область значения функции – $[0;1]$. Выведенная формула дала отклонение от экспертных оценок в среднем на 0,0378. Найденный результат в рамках данной работы достаточен, и получение меньшей ошибки неактуально.

Практические результаты. Для оценки раз-

работанного алгоритма написана программа, рассчитывающая показатель $F_a(D_i)$. В качестве тестовой коллекции подготовлено 10 групп по 15 текстов, в каждой из которых был свой уникальный контент, но каждый текст в группе обладал разными уровнями тематичности ресурса, показателя посещаемости, возраста документа. Так как определить со стопроцентной вероятностью документ, который должен являться первичным, нельзя, предложено оценивать качество работы полученного алгоритма путем сопоставления результатов ранжирования по формуле (5) и результатов ранжирования всех рассматриваемых текстов в каждой группе с помощью шкалы рангов, построенной по экспертным оценкам.

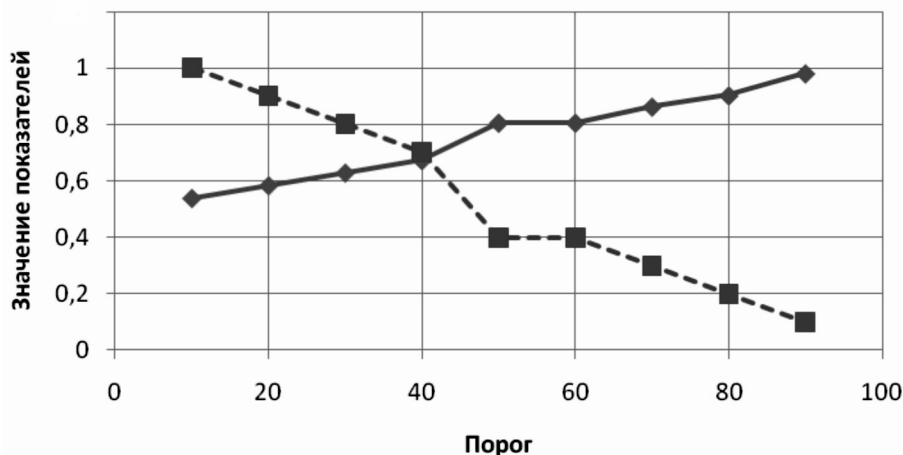


Рис. 2. Качество поиска первичного контента при разных порогах
(—◆—) средний процент; (—■—) количество совпадений

Результаты вычислений, рассчитанные для 10 групп текстов при разных порогах совпадения со шкалой экспертов представлены на рис. 2.

Оптимальный результат по количеству совпадений в 70 % при среднем проценте совпадений со шкалой рангов 67,3 % наблюдается при пороге 40 %. Также следует отметить, что наивысший ранг получают документы, вероятность авторства которых по отношению к сайту высокая, или документы, популярность которых выше других, что соответствует логике выбора первичного документа.

В статье предложен метод определения первичного документа, показавший хорошую эффективность, о чем свидетельствует показатель совпадений в 70 % со шкалой экспертов. Использование разработанного метода возможно не только в рамках поисковых систем, но и как самостоятельное направление по оценке авторства коротких текстов, полноты тематики и расчета популярности того или иного ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rinaldi, A.M.** An ontology-driven approach for semantic information retrieval on the web [Text] / A.M. Rinaldi // ACM Transactions on Internet Technology. —NY, USA: ACM, 2009. — Vol. 9. — № 3.
2. **Budanitsky, A.** Evaluating WordNet-based measures of lexical semantic relatedness [Text] / A. Budanitsky, G. Hirst // Computational Linguistics. —Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2006. —Vol. 32. —№ 1. —P. 13–47.
3. **Милов, Л.В.** От Нестора до Фонвизина. Новые методы определения авторства: Научное издание [Текст] / Л.В. Милов, Л.И. Бородин, Т.В. Иванова [и др.]; под ред. Л.В. Милова. —М.: Прогресс, 1994.
4. **Holmes, D.I.** The Evolution of Stylometry in Humanities Scholarship [Text]/ D.I. Holmes // Literary and Linguistic Computing. —Oxford University Press, 1998. —Vol. 13. — № 3. —P. 111–117.
5. **Хмелёв, Д.В.** Распознавание автора текста с использованием цепей А.А. Маркова [Текст] / Д.В. Хмелёв // Вестн. МГУ. Сер. 9. Филология. —2000. —№ 2. —С.115–126.
6. **Кукушкина, О.В.** Определение авторства текста с использованием буквенной и грамматической информации [Текст] / О.В. Кукушкина, А.А. Поликарпов, Д.В. Хмелёв // Проблемы передачи информации. —2001. —Т. 37. —№ 2. —С. 96–108.
7. **Хмелёв, Д.В.** Сложностной подход к задаче определения авторства текста [Текст] / Д.В. Хмелёв // Тр. и матер. Междунар. конгресса Русский язык: исторические судьбы и современность. —М.: МГУ, 2001. —С. 426–427.
8. **Романов, А.С.** Идентификация автора текста с помощью аппарата опорных векторов [Текст] / А.С. Романов, Р.В. Мещеряков // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По материалам ежегодной Междунар. конф. Диалог-2009. —М.: РГГУ, 2009. —Вып. 8 (15). —С. 432–437.
9. **Page, L.** The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web [Text] / L. Page, S. Brin, R. Motwani [et al.] // Technical Report. —Stanford University, 1998.
10. **Неелова, Н.В.** Функция удаления нейтральных слов при вычислении нечетких дублей лексическим методом Джаккарда [Текст] / Н.В. Неелова // Интеллектуальные и информационные системы: Матер. Всерос. науч.-техн. конф. —Тула: Изд-во Тульского гос. ун-та, —2009 —С. 149–151.

УДК 004.67

Н.Т. Сафиуллин, С.В. Поршнева

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТА МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ЧЕРЕЗ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГИЛЬБЕРТА И ПРЯМУЮ КВАДРАТУРУ

Понятие аналитического сигнала (АС), предложенное в 1946 г. Габором [1], позволило ввести определения амплитуды, фазы и мгновенной частоты сигнала $u(t)$. По Габору АС $w(t)$, соответствующий действительной функции $u(t)$, определяется для всех функций, принадлежащих классу $L^P(-\infty, +\infty)$,

$$w(t) = u(t) + jv(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}, \quad (1)$$

где $v(t)$ – сигнал, сопряженный к исходному сигналу по Гильберту,

$$v(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(\tau)}{t - \tau} d\tau = H(u), \quad (2)$$

здесь $H(u)$ – оператор, описывающий преобразование Гильберта; $a(t)$ – функция, имеющая физический смысл огибающей сигнала $u(t)$,

$$a(t) = |w(t)| = \sqrt{u^2(t) + v^2(t)}. \quad (3)$$

Использование АС, определенного в соответствии с (1), позволяет естественным путем ввести для сигнала $u(t)$ понятие фазы $\varphi(t)$

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \arctg\left(\frac{v(t)}{u(t)}\right) = \\ &= \arccos\left(\frac{u(t)}{a(t)}\right) = \arcsin\left(\frac{v(t)}{a(t)}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

и мгновенной частоты $\omega(t)$ сигнала

$$\omega(t) = \dot{\varphi}(t) = \frac{u(t)\dot{v}(t) - \dot{u}(t)v(t)}{a^2(t)}. \quad (5)$$

После опубликования работы [1] на протяжении нескольких десятилетий вопросы, связанные с различными аспектами применения ПГ и трактовки характеристик сигналов, вычисляемых в соответствии с (1)–(5), стали предметом многочисленных научных исследований. При этом их авторы высказывали диаметрально противоположные мнения о физической сущности огибающей и мгновенной частоты сигнала, вводимых через ПГ, и правомерности использования данных величин для обработки сигналов и объяснения работы радиотехнических устройств [2–12]. Например, в [2] говорится, что «в общем случае $A(t)$ и

$\Theta(t)$ (огибающая и мгновенная фаза – прим. авт.), формально полученные посредством описанной процедуры, не будут медленными функциями и, называя их мгновенной амплитудой и фазой, мы не извлечем из этого никаких оправданных последствий». А в [3], в свою очередь, утверждается: «...любое определение и применение колебательных характеристик правильно, лишь постольку это определение и применение согласуется с тем, что дает аналитический сигнал. Иначе говоря, нет колебательных задач, в которых амплитуду, фазу и частоту следует вводить иначе, без аналитического сигнала». Отметим, что после выхода в свет монографии [3] произошло заметное снижение интереса исследователей к обсуждаемым проблемам, продолжавшееся вплоть до середины 90-х гг. XX в.

Возобновление исследований возможности использования ПГ в задачах обработки реальных сигналов было обусловлено необходимостью обработки сигналов $u(t)$, получаемых с выхода доплеровского радиолокатора непрерывного излучения диапазона СВЧ при измерении параметров движения снаряда в стволах артиллерийских систем и стрелковых вооружений во время выстрела (типичные частоты электромагнитных волн (ЭВ), используемые в данных радиолокаторах, 10 ГГц и 33 ГГц) [4]:

$$u(t) = a(t) \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} x(t)\right), \quad (6)$$

где λ – длина ЭВ; $a(t)$ – функция, описывающая амплитудную модуляцию, обусловленную откатом ствола и воздействием случайных факторов; $x(t)$ – перемещение боеприпаса в стволе.

Данные сигналы, зарегистрированные в цифровой форме на конечном временном интервале, представляют собой частотно-модулированные (ЧМ) сигналы, у которых зависимость мгновенной частоты от времени описывается некоторой монотонно возрастающей функцией. В зависимости от типа артиллерийской системы, а также от частот используемых ЭВ, длительности сигналов, полу-

чаемых в рассматриваемой задаче, варьируются в диапазоне от 1 до 10 мс, а полосы частот, занимаемые данными сигналами в спектральной области, – соответственно, в диапазонах [0,50] КГц до [0,400] КГц. Здесь обработка сигнала состоит в нахождении по значениям радиолокационного сигнала u_i , измеренным в узлах дискретной временной сетки конечной длительности $t_i, i = 1, N$, мгновенных значений фазы $\varphi(t_i)$ и частоты $f(t_i)$ сигнала и далее соответствующих перемещения и скорости движения боеприпаса:

$$\begin{aligned} x(t_i) &= \frac{\lambda}{4\pi} \varphi(t_i), \\ v(t_i) &= \frac{\lambda}{4\pi} f(t_i). \end{aligned} \quad (7)$$

В связи с тем, что рассматриваемые сигналы относятся к классу цифровых сигналов конечной длительности, т. е. не принадлежат пространству $L^P(-\infty, +\infty)$, потребовалось проведение целенаправленных исследований возможности использования ПГ для анализа данного класса сигналов. Полученные результаты, изложенные в [5], помогли сделать следующие выводы,

а также предложить соответствующие алгоритмы, позволяющие по функции $\omega_{\text{выч}}(t)$ находить функцию $\omega(t)$:

1) для широкополосных сигналов конечной длительности $a(t)\cos(\varphi(t))$ понятие огибающей, определяемой через амплитуду соответствующего АС, является физически содержательным для сигналов как с узкополосной, так и с широкополосной несущей;

2) при перекрытии спектров функции амплитудной модуляции $a(t)$ и несущей $\cos(\varphi(t))$ вычисляемая огибающая сигнала $a_{\text{выч}}(t)$ имеет систематическую погрешность $\Delta a(t)$ ($a_{\text{выч}}(t) = a(t) + \Delta a(t)$), которая может быть уменьшена полосовой фильтрацией функции $a_{\text{выч}}(t)$;

3) причина искажения вычисляемой огибающей сигнала конечной длительности $a(t)\cos(\varphi(t))$ – перекрытие спектров функций, описывающих закон амплитудной модуляции $a(t)$ и несущей $\cos(\varphi(t))$;

4) в связи с тем, что $a_{\text{выч}}(t) \neq a(t)$, вычисляемый закон изменения частоты широкополосного сигнала конечной длительности во времени

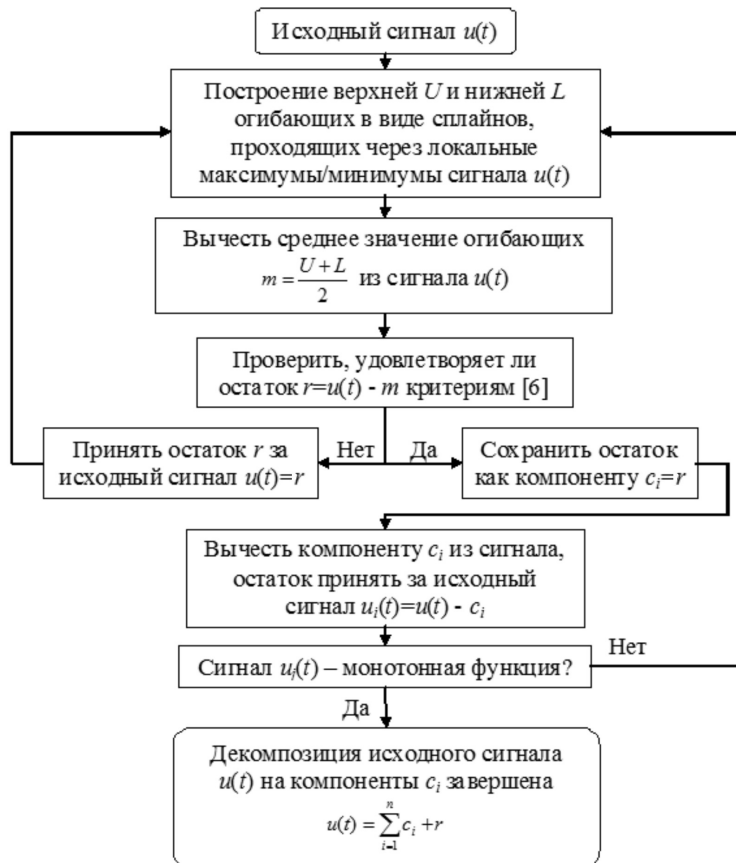


Рис. 1. Схема алгоритма, реализующего метод EMD



Рис. 2. Схема алгоритма, реализующего метод ПК (DQ)

$\omega_{\text{выч}}(t)$ также имеет систематическую погрешность ($\omega_{\text{выч}}(t) = \omega(t) + \Delta\omega(t)$).

ПГ вновь оказалось востребованным в 1998 г., когда Н. Гуанг предложил новый метод анализа нестационарных временных рядов, получивший название «преобразование Гуанга–Гильберта» (ННТ) [6]. Данный метод основан на разделении исходного сигнала на квазигармонические компоненты $c_i(t)$ с помощью алгоритма эмпирической модовой декомпозиции (EMD), блок-схема которого представлена на рис. 1. Далее, в методе ННТ производится расчет значений огибающей и мгновенной частоты каждой из выделенных компонент (или мод, как их чаще называют в иностранной литературе) в соответствии с (1)–(5).

Анализ опыта использования метода ННТ для анализа реальных сигналов, имеющих конечную длительность, привел к тому, что результаты, имеющие однозначную трактовку с физической точки зрения, удастся получить только на первом этапе реализации данного метода (т. е. при декомпозиции). В то время как при формальном применении ПГ к выделенным модам в ряде случаев значения МЧ противоречили физическим представлениям об изучаемых процессах [7].

В 2009 г. Н. Гуанг предложил новый способ расчета МЧ сигнала, в котором используется прямая квадратура (ПК или DQ – Direct Quadrature) [7]. В основе метода ПК, блок-схема которого представлена на рис. 2, лежит разложение исходного сигнала $u(t)$ на амплитудную $a(t)$ и фазовую $\varphi(t)$ составляющие эмпирическим способом с дальнейшим расчетом МЧ в (5). Этот метод, по мнению его автора, позволяет получать результаты, намного превосходящие ПГ по точности. В связи с этим

представляет практический интерес проведение сравнения точностных характеристик цифровых ЧМ сигналов конечной длительности, получаемых с помощью ПГ и метода ПК.

Анализ результатов обработки ЧМ сигнала

Рассмотрим результаты обработки модели радиолокационного сигнала, частотно-временные характеристики которого подобны сигналу, получаемому при измерении параметров движения реального боеприпаса в стволе артиллерийской системы: длительность сигнала $T_s = 8,96$ мс, полоса частот в спектральной области – $[0; 30]$ КГц, частота дискретизации сигнала 7,3 МГц. Закон изменения частоты данного сигнала во времени представлен на рис. 3 а (график 1) (отметим, что здесь приходится использовать закон изменения частоты сигнала, заданный таблично в связи с отсутствием адекватно описывающих его аналитических выражений).

Результаты вычисления МЧ модели радиолокационного сигнала в соответствии с ПГ представлены на рис. 3 а (график 2). Отметим, что на практике вместо численного вычисления интеграла

$$v(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{T_s} \frac{\sin(\varphi(\tau))}{t - \tau} d\tau \quad (8)$$

оказывается удобным использовать известное соотношение между спектром исходного сигнала $F(\omega)$ и спектром соответствующего ему АС $W(\omega)$ [3]:

$$W(\omega) = \begin{cases} 2F(\omega), \omega > 0, \\ F(0), \omega = 0, \\ 0, \omega < 0. \end{cases} \quad (9)$$

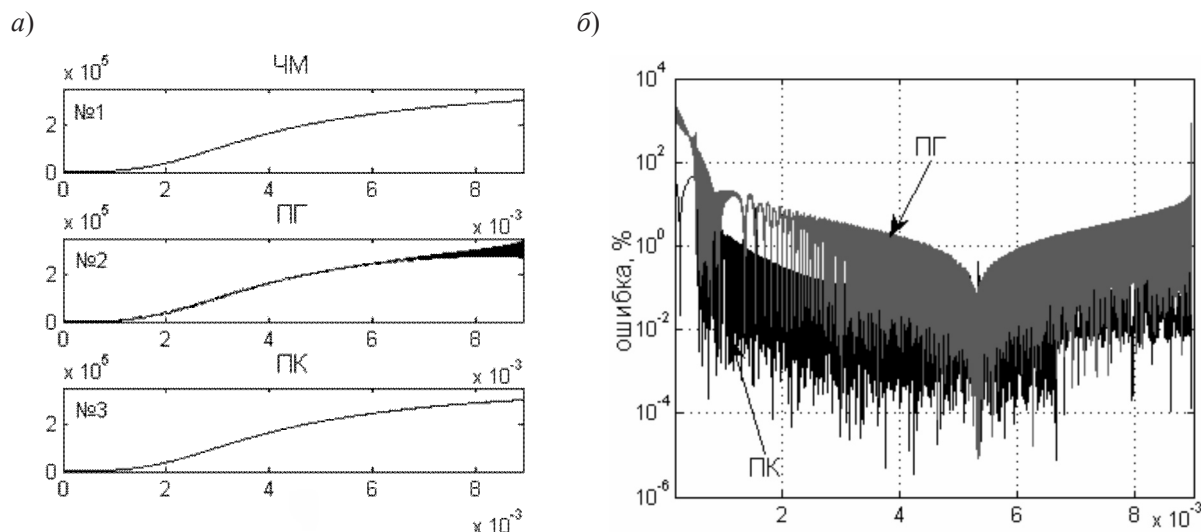


Рис. 3. Зависимости мгновенной частоты (а) и логарифма относительной погрешности вычисления МЧ (б) модели радиолокационного сигнала от времени

График 3 демонстрирует результаты вычисления МЧ модели радиолокационного сигнала в соответствии с методом ПК.

Зависимость относительной погрешности вычисления МЧ модели радиолокационного сигнала каждым из методов

$$\Delta\omega = \frac{|\omega_{\text{выч}}(t) - \omega(t)|}{\omega(t)} \quad (10)$$

представлена на рис. 3 б, из которого видно, что для рассматриваемого сигнала, за исключением участков на краях интервала существования сигнала, где оба метода показали неудовлетворительную точность (относительная погрешность каждого может превышать 50 %), точность метода ПК оказалась на порядок выше ПГ. Результат, полученный с помощью ПГ, является вполне ожидаемым и объясняется наличием описанной выше систематической составляющей $\Delta a(t)$.

В научной литературе не удалось обнаружить объяснений причин возникновения систематической погрешности при обработке дискретного ЧМ сигнала конечной длительности методом ПК, в отличие от ПГ. Вероятно, это связано с тем, что метод ПК изначально является чисто эмпирическим и какой-либо строгой теоретической базы под собой, по сути, не имеет. Отсутствие аналитических выражений, дающих четкие численные соотношения между исходным сигналом и полученной огибающей кривой, – один из наиболее серьезных недостатков метода ПК, что признается и автором [6, 7].

Анализ результатов обработки ЛЧМ сигнала

В связи с необходимостью объяснения обнаруженных недостатков метода ПК представляется целесообразным провести анализ результатов обработки ЧМ сигналов, законы изменения фазы и частоты которых описываются аналитическими выражениями, например, сигналов с линейным законом частотной модуляции (ЛЧМ):

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \omega_1 + (\omega_2 - \omega_1)t / T, \\ \varphi(t) &= \varphi_0 + \omega_1 t + \frac{(\omega_2 - \omega_1)t^2}{2T}, t \in [0; T], \\ u(t) &= \sin \varphi(t). \end{aligned} \quad (11)$$

Результаты вычисления МЧ дискретных ЛЧМ сигналов, параметры которых приведены в табл. 1, с помощью ПГ и метода ПК представлены на рис. 4 и в табл. 2.

Для модельного ЛЧМ сигнала 1, как видно из табл. 2, погрешность вычисления МЧ методом ПК (0,3 % на отрезках $[0; 0,2T]$ и $[0,8T; T]$, и 0,1 % на отрезке $[0,2T; 0,8T]$) оказалась значительно меньше аналогичной величины, полученной при использовании ПГ (9,5 и 0,9 % соответственно). Отметим, что, используя сглаживание значений МЧ, полученных с помощью ПГ, методом скользящего среднего или аппроксимируя данную зависимость линейной функцией по методу наименьших квадратов, можно уменьшить максимальную погрешность МЧ до 2 %, которая, однако, все еще на порядок превосходит ошибку метода ПК.

Для модельного ЛЧМ сигнала 2, как видно из табл. 2, погрешность вычисления МЧ методом

Таблица 1

Параметры модельных ЛЧМ сигналов

Номер сигнала	ω_1 , Гц	ω_2 , Гц	T , с	Число узлов временной сетки
1	10	20	1,0	32768
2	1000	3000	1,0	32768

Таблица 2

Относительная погрешность вычисления МЧ сигналов

Метод вычисления МЧ	Сигнал 1		Сигнал 2	
	$\Delta\omega_1$, %	$\Delta\omega_2$, %	$\Delta\omega_1$, %	$\Delta\omega_2$, %
ПГ	9,3	0,9	25,7	1,1
ПК	0,3	0,1	11,7	8,5

$\Delta\omega_1$ – максимальная погрешность значений МЧ по краям интервала анализа на отрезках $[0; 0,2T]$ и $[0,8T; T]$,
 $\Delta\omega_2$ – максимальная погрешность значений МЧ внутри интервала анализа на отрезке $[0,2T; 0,8T]$.

ПГ на основном отрезке $[0,2T; 0,8T]$, напротив, оказывается меньше (1,1 против 8,5 % метода ПК соответственно). При этом погрешность вычисления МЧ методом ПГ по краям интервала на отрезках $[0; 0,2T]$ и $[0,8T; T]$ почти в два раза превосходит таковую у метода ПК (25,7 против 11,7 % соответственно). Отметим, что погрешность вычисления МЧ методом ПК увеличивается при увеличении частоты ЛЧМ сигнала.

Для объяснения обнаруженной особенности МЧ, вычисленной с помощью ПК, напомним, что в данном методе в качестве амплитудной составляющей сигнала $a(t)$ применяются результаты сплайн-интерполяции, для которой в качестве узлов интерполяции используют точки, соответствующие максимумам (минимумам) анализируемого сигнала. При этом априори предполагается,

что моменты времени, соответствующие достижению сигналом максимального (минимального) значений, известны абсолютно точно. Однако при использовании дискретной временной сетки $t_i = \Delta t \cdot i, i = \overline{0, N}$ может оказаться, что текущее значение момента времени t_i отличается от точного значения времени T_m , соответствующего данному максимуму (минимуму) анализируемого сигнала на величину δt :

$$t_i = T_m + \delta t, \quad (12)$$

тогда соответствующее значение дискретного сигнала, вычисляемого в соответствии с (11), $u_i \neq 1$, т. е. значения функции в узлах интерполяции оказываются заданными с некоторой погрешностью.

Получим оценку зависимости данной погрешности от частоты сигнала, разложив для это-

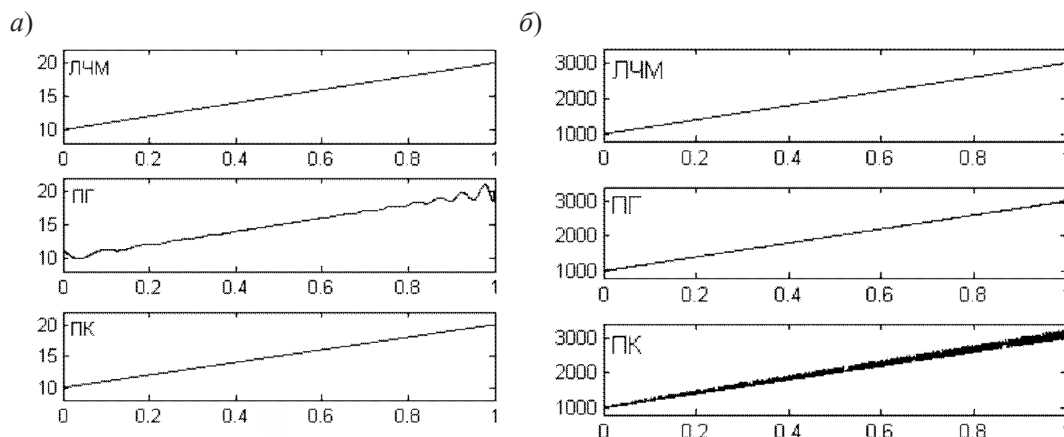


Рис. 4. Зависимость мгновенной частоты ЛЧМ сигнала от времени:
а – модель 1; б – модель 2

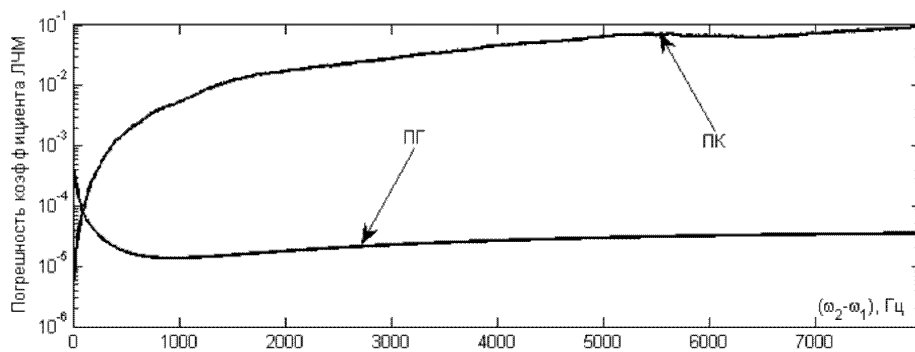


Рис. 5. Зависимость погрешности вычисления МЧ от девиации частоты ЛЧМ сигнала

го функцию $u(t) = \sin \varphi(t)$ в окрестности точки T_m в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} u(T_m + \delta t) &= \sin(\varphi(T_m + \delta t)) = \\ &= \sin(\varphi(T_m)) - \sin(\varphi(T_m)) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \bigg|_{t=T_m} \frac{\delta t^2}{2} + \dots \approx \\ &\approx 1 - \frac{\omega_2 - \omega_1}{T} \frac{\delta t^2}{2}. \end{aligned} \quad (13)$$

Из (13) видно, что при фиксированном значении δt погрешность значений функции в узлах интерполяции (шум, обусловленный квантованием сигнала по времени) действительно увеличивается при увеличении девиации сигнала $\omega_2 - \omega_1$. Поэтому значения амплитудной составляющей сигнала $a(t)$, вычисляемые с помощью сплайн-интерполяции в узлах временной сетки $t_i = \Delta t \cdot i, i = 0, N$, с неизбежностью не будут соответствовать априорным представлениям о том, что $a(t_i) = 1$.

Приведенную выше аналитическую оценку также подтверждают результаты, представленные на рис. 5. (Здесь в качестве значения погрешности вычисления МЧ ЛЧМ сигнала принималась погрешность коэффициента прямой, аппроксимирующей табличную зависимость $f_i = f(t_i)$, значения которой находились для заданных значений девиации частоты ЛЧМ сигнала). Из рисунка видно, что при увеличении девиации частоты ЛЧМ сигнала погрешность МЧ, вычисленная в соответствии с ПГ, практически не меняется, в то время как аналогичная величина, вычисленная в соответствии с методом ПК, при увеличении девиации частоты (соответственно, шума сигнала, обусловленного квантованием по времени), напротив, увеличивается. Полученный результат позволяет предположить существование сильной

зависимости погрешности характеристик сигналов, вычисляемых методом ПК, от шумов, присутствующих в сигнале.

Для подтверждения данного предположения проведено статистическое моделирование, в котором модель ЛЧМ сигнала 2 дополнялась гауссовым шумом $\xi_g(t)$:

$$u_g(t) = u(t) + \xi_g(t). \quad (14)$$

При этом в процессе моделирования для каждого заданного значения отношения сигнал/шум: 1) генерировались 1000 независимых реализаций сигнала $u_g^{(k)}(t_i)$, $i = 0, N, k = 1, 1000$, в соответствии с (14); 2) для каждой из реализаций $u_g^{(k)}(t_i)$ были найдены табличные значения МЧ от времени — $f_i^{(k)} = f^{(k)}(t_i)$; 3) вычислялись в соответствии с методом наименьших квадратов погрешности коэффициентов прямых $\Delta a^{(k)}$, аппроксимирующих табличные зависимости $f_i^{(k)} = f^{(k)}(t_i)$; 4) по массиву $\Delta a^{(k)}$ вычислялось среднее значение погрешности углового коэффициента. Полученные зависимости погрешности МЧ от отношения сигнал/шум представлены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что, действительно, при низких отношениях сигнал/шум (< 22 дБ) погрешность нахождения МЧ методом ПК оказывается больше аналогичной величины, вычисляемой в соответствии с методом ПГ. При отношении сигнал/шум > 22 дБ, наоборот, погрешность нахождения МЧ методом ПК оказывается меньше аналогичной величины, вычисленной методом ПГ. Например, при отношении сигнал/шум > 40 дБ и более точность метода ПК выше, чем у метода ПГ, на постоянную величину $\approx 5\%$. Таким образом, полученные оценки погрешностей МЧ модельных сигналов следует принимать во внимание при выборе метода обработки реальных сигналов.

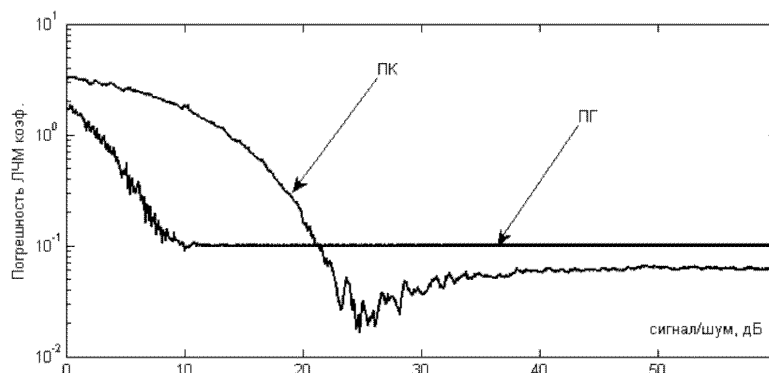


Рис. 6. Погрешность расчета линейного коэффициента ЛЧМ сигнала в зависимости от отношения сигнал/шум

Проведенный сравнительный анализ результатов вычисления мгновенной частоты дискретных ЧМ сигналов конечной длительности методами преобразования Гильберта и прямой квадратуры позволяет сделать следующие выводы.

Погрешность вычисления мгновенной частоты модельных ЧМ сигналов методом прямой квадратуры оказывается на порядок меньше аналогичной величины, полученной методом преобразования Гильберта.

Каждому из изученных методов обработки сигналов присущи краевые эффекты, проявляющиеся в увеличении погрешности вычисляемых параметров сигналов на краях временного интервала.

Погрешность параметров ЛЧМ сигнала, вы-

числяемых в соответствии с методом прямой квадратуры, увеличивается при увеличении девиации частоты сигнала.

Метод прямой квадратуры оказывается более чувствительным к шумам, присутствующим в сигнале, чем метод преобразования Гильберта, т. е. намного сильнее зависит от отношения сигнал/шум, чем ПГ.

Применение метода прямой квадратуры для анализа других модельных сигналов и нестационарных временных рядов, а также их сравнение с аналогичными результатами, получаемыми другими известными методами (например, вэйвлет-анализ, метод SSA и др.), являются предметом дальнейших публикаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gabor, D.** Theory of communication [Текст] / D. Gabor // J. of the Institution of Electrical Engineers. –1946. –Vol. 93 (III) –P. 429–457.
2. **Рытов, С.М.** Введение в статистическую радиофизику [Текст] / С.М. Рытов. –М.: Наука, 1966. –С. 452.
3. **Вакман, Д.Е.** Разделение частот в теории колебаний и волн [Текст] / Д.Е. Вакман, Л.А. Вайнштейн. –М.: Наука, 1983. –С. 288.
4. **Поршнев, С.В.** Радиолокационные методы измерений экспериментальной баллистики [Текст] / С.В. Поршнев. –Екатеринбург: УрО РАН, 1996. –С. 212.
5. **Поршнев, С.В.** Физическое содержание понятий «оггибающая» и «мгновенная частота широкополосного аналитического сигнала» [Текст] / С.В. Поршнев // Электромагнитные волны и электронные системы. –2001. –Т. 6. –№ 1. –С. 48–55.
6. **Huang, N.E.** The Hilbert-Huang transform and its applications [Текст] / N.E. Huang; ed. Samuel S.P. Shen. –World Scientific Publishing Company Pte. Ltd. 5 Tuck Link, Singapore, 2005. –P. 324.
7. **Huang, N.E.** On instantaneous frequency [Текст] / N.E. Huang [et al.] // Advances in Adaptive Data Analysis. –World Scientific Publishing Company, 2009. –Vol. 1. –№ 2. –P. 177–229.
8. **Коржик, В.И.** Огибающая сигнала и некоторые ее свойства [Текст] / В.И. Коржик // Радиотехника. –1968. –Т. 23. –№ 4. –С. 1–6.
9. **Коржик, В.И.** Расширенное преобразование Гильберта и его применение в теории сигналов [Текст] / В.И. Коржик // Проблемы передачи информации. –1969. –Т. 5. –Вып. 4. –С. 3.
10. **Рандал, Р.Б.** Частотный анализ [Текст] / Р.Б. Рандал. –ДК-2600 Глоструп, Дания: А/О К. Ларсен и сын, 1989. –С. 389.
11. **Shekel, G.** On the Term Instantaneous Frequency [Текст] / G. Shekel // Proc. I.R.E. –1954. –Vol. 42. –№ 6. –P. 1024.
12. **Тихонов, В.И.** Один способ определения оггибающей квазигармонических флюктуаций [Текст] / В.И. Тихонов // Радиотехника и электроника. –1957. –Т. 2. –№ 4. –С. 562.



УДК 621.396

Е.В. Балашов, А.С. Коротков, И.А. Румянцев

МЕТОДЫ ЛИНЕАРИЗАЦИИ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАТЧИКОВ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ – КРАТКИЙ ОБЗОР

Усилитель мощности (УМ) в составе передатчика – неотъемлемая часть любой системы связи, в т. ч. мобильной. Системы мобильной связи подразделяются на четыре поколения. Системы первого поколения NMT и AMPS аналогового типа практически полностью вытеснены цифровыми системами старших поколений. Системы второго поколения на данный момент являются наиболее распространенными. К ним относятся GSM (распространена по всему миру), D-AMPS (Северная Америка) и Q-CDMA (США, Корея). Рабочие частоты передатчиков абонентских станций не превышают 2,0 ГГц, а выходная мощность передатчика достигает 0,25–3,0 Вт. Также данные системы могут использоваться для передачи мультимедийной информации через надстройки над ними (GPRS, EDGE) со скоростью до 474 кбит/с. Системы третьего поколения позволяют передавать как речь, так и мультимедийную информацию (со скоростью до 7 Мбит/с) и обладают большей емкостью. Наибольшее распространение получили системы третьего поколения W-CDMA и CDMA2000. Рабочие частоты передатчиков данных систем лежат в пределах 1,7–2,0 ГГц, а мощность передатчика абонентской станции составляет до 250 мВт. К системам четвертого поколения относятся WiMAX и LTE. Системы WiMAX ориентированы преимущественно на обеспечение доступа в Интернет, а системы LTE находятся в состоянии формирования. Таким образом, повышение характеристик устройств систем мобильной связи третьего поколения представляет наибольший практический интерес.

К основным параметрам усилителей мощности относятся: полоса рабочих частот, уровень выходной мощности, уровень нелинейных искажений. Перечисленные параметры должны удовлетворять требованиям стандарта связи при

максимальном коэффициенте полезного действия (КПД) и минимальной площади изготовленной микросхемы. Основным классом усилителей мощности, используемым в абонентских устройствах мобильных систем связи, является класс E [1]. Усилители данного типа обеспечивают максимальный КПД при малых габаритах микросхемы. На данный момент усилители мощности класса E, изготовленные по «металл-оксид-полупроводник» (МОП)-технологии, с рабочими частотами до 2,0 ГГц и уровне выходной мощности около 1 Вт обладают коэффициентом полезного действия до 65 %, а площади микросхем достигают 0,3 кв. мм. В таблице обобщены основные параметры современных усилителей мощности класса E, причем представлены как технические данные усилителей, включая рабочую частоту F , выходную мощность P , КПД, площадь схемы усилителя на кристалле S , технологию изготовления микросхемы, так и ссылки на соответствующий источник.

Несмотря на достигнутые результаты, по-прежнему существует необходимость в повышении КПД усилителей мощности, что, как правило, приводит к увеличению уровня нелинейных искажений. Таким образом, актуальны исследования, направленные на разработку методов линеаризации. В статье рассмотрены методы уменьшения нелинейных искажений в усилителях мощности мобильных систем связи, что особенно важно для усилителей мощности класса E, работающих в ключевом режиме.

Классификация и принципы построения систем линеаризации усилителей

Ограниченность частотного ресурса обуславливает необходимость в применении методов мо-

Основные параметры современных усилителей мощности

Ссылка	F , ГГц	P , дБм	КПД, %	S , кв. мм	Технология	Год
[2]	2,0	30	60	0,29	65 нм МОП	2009
[3]	1,6	31	45	1,72	180 нм МОП	2010
[4]	0,8	30	65	0,81	65 нм МОП	2011

дуляции с изменением как фазы, так и амплитуды сигналов, что позволяет передавать большее количество информации в выделенном диапазоне частот. Усиление таких сигналов с низким уровнем нелинейных искажений на выходе УМ без дополнительной линейаризации возможно только при условии работы усилительного элемента УМ в линейном или квазилинейном режимах, т. е. с низким КПД [1]. В связи с этим особую актуальность приобретает задача линейаризации усилительного тракта с целью снижения уровня нелинейных искажений сигнала и повышения КПД усилителя мощности.

Нелинейные искажения в усилителях мощности разделяются на искажения амплитуды сигнала (АМ-АМ искажения) и искажения фазы сигнала (АМ-ФМ искажения). При этом зависимость огибающей сигнала на выходе от огибающей сигнала на входе называют «характеристикой АМ-АМ», а зависимость фазы сигнала на выходе от огибающей сигнала на входе – «характеристикой АМ-ФМ». Сигнал на выходе усилителя в общем случае зависит не только от амплитуды огибающей входного сигнала, но и от ее частоты. Как следствие, усилители, характеристики которых в рассматриваемый момент времени зависят от значений сигнала в предыдущие моменты времени, принято называть усилителями с «эффектом памяти». Поэтому при разработке методов линейаризации используются как модели усилителей мощности без учета эффекта памяти (например, полиномиальная модель, модель на основе функций Бесселя), так и модели, в которых учитывается эффект памяти (модель на

основе рядов Вольтерра). В работе [5] вводится следующая классификация моделей усилителей мощности:

модель УМ без памяти. В этом случае усилитель представляется в виде одной характеристики АМ-АМ;

модель УМ с эффектом памяти с малой постоянной времени (сопоставимой с периодом несущей частоты). В этом случае усилитель представляется с помощью двух стационарных (не зависящих от значения входного сигнала в предыдущие моменты времени) характеристик АМ-АМ и АМ-ФМ;

модель усилителя мощности с эффектом памяти с большой постоянной времени (сопоставимой с периодом частоты огибающей). В данном случае усилитель представляется с помощью двух характеристик АМ-АМ и АМ-ФМ, которые, в свою очередь, зависят от значений огибающей на входе в предыдущие моменты времени.

Известные подходы к линейаризации УМ:

- линейаризация с помощью обратной связи;
- с помощью опережающей связи;
- с помощью «после-коррекции» (Post-correction);
- с помощью предварительной коррекции.

Первые три метода преимущественно используются для линейаризации УМ, работающих в квазилинейных режимах. Для линейаризации УМ, работающих в ключевых режимах, используется четвертый метод.

Линейаризация усилителей мощности в квазилинейных режимах

При линейаризации с помощью обратной связи

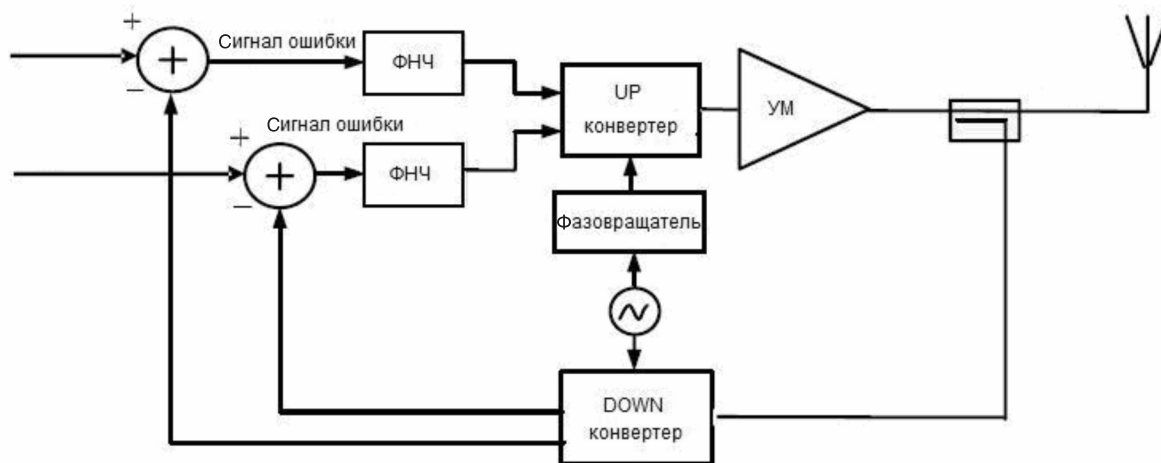


Рис. 1. Схема линейаризации с помощью обратной связи

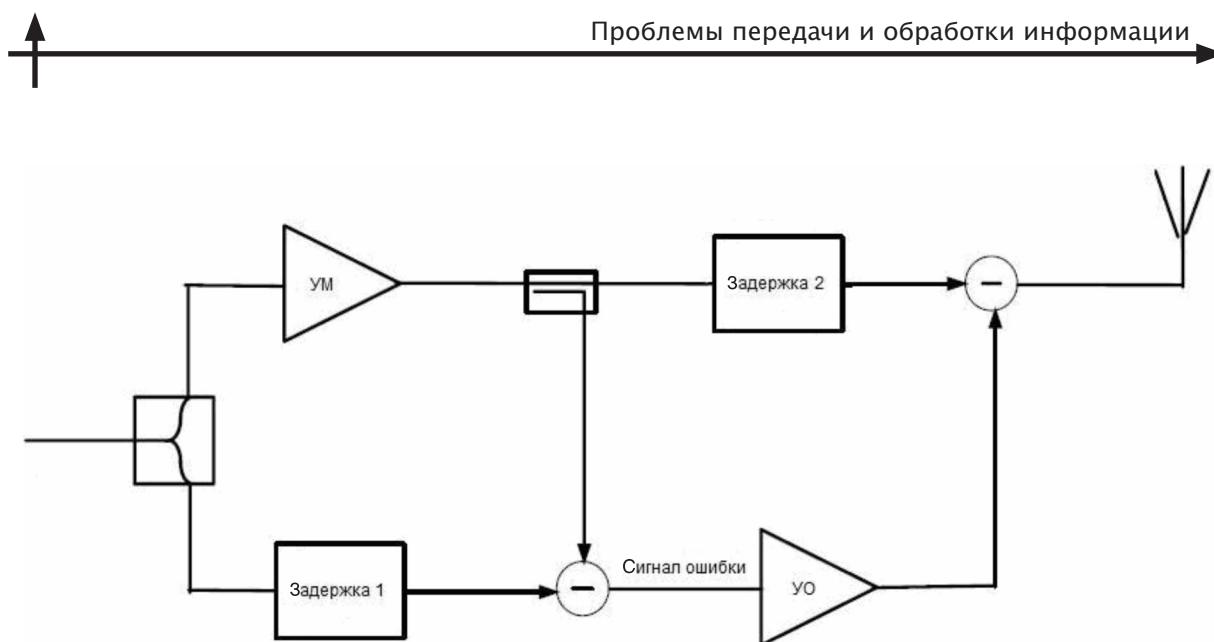


Рис. 2. Схема линейаризации с помощью опережающей связи

зи сигнал с выхода передатчика передается как в линию передачи, так и в цепь обратной связи, с помощью которой происходит корректировка сигнала в передающем тракте. Структурная схема системы линейаризации с помощью обратной связи показана на рис. 1. Сигнал с выхода передатчика раскладывается на квадратурные составляющие I и Q , которые сравниваются с соответствующими составляющими сигнала на входе передающего тракта, для каждой из составляющих вычисляется так называемый «сигнал ошибки», который, в свою очередь, используется в качестве корректирующего, т. е. вычитается из сигналов на входе тракта.

Для обеспечения устойчивости УМ необходимо использовать «глубокую» отрицательную обратную связь, что приводит к уменьшению коэффициента усиления на выходе передатчика и является недостатком применения обратной связи для линейаризации усилителя.

При использовании опережающей связи (рис. 2) сигнал, поступающий на вход передающего тракта, подается одновременно и на УМ, и на линию задержки 1, которая вносит задержку, равную времени прохождения сигнала через усилитель. Затем сигналы на выходах УМ и линии задержки сравниваются, после чего схема сравнения формирует «сигнал ошибки», линейно усиливаемый дополнительным усилителем сигнала ошибки (УО). Сигнал с выхода УО используется в качестве корректирующего. При этом необходима линия задержки 2, которая вносит задержку, равную времени прохождения сигнала через УО. Недостаток такого подхода – высокая чувстви-

тельность к разнице задержек, вносимых линиями задержки и усилителями УМ и УО.

Рассмотрим подход к коррекции искажений сигнала, представленный в работе [6] и названный авторами «после-коррекцией». Предлагается метод компенсации искажений, обусловленных эффектом наложения сигналов соседних каналов с частотным разделением. При этом коррекция осуществляется в приемном, а не в передающем тракте системы. В приемном тракте к сигналу основного канала добавляется сигнал, аналогичный помехе из соседнего канала, но с противоположной фазой. Затем сигналы складываются, и на выходе формируется сигнал с компенсированными искажениями. Серьезный недостаток данного метода – возможность передачи сигнала с высоким уровнем внеполосных составляющих спектра в канал передачи. Следовательно, для получения сигнала с пониженным уровнем искажений приемные тракты всех устройств, работающих в системе, должны иметь в своем составе схемы подавления помех из соседних каналов. Кроме того, большинство стандартов беспроводных систем связи накладывают ограничения на уровень внеполосных составляющих в передаваемом сигнале. В связи с перечисленными недостатками данный подход не получил широкого распространения.

Линеаризация усилителей мощности в ключевых режимах

Принципы построения систем предварительной коррекции. Линеаризация с помощью предварительной коррекции получила наибольшее распространение в современных

системах связи. Данное обстоятельство связано, в т. ч. с эффективной возможностью реализации алгоритмов предварительной коррекции на основе программно-аппаратных средств – программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и цифровых процессоров обработки сигналов. При этом в передающем тракте перед УМ подключается устройство, называемое *предварительным корректором*. Динамическая характеристика предварительного корректора в идеальном случае представляет функцию, обратную динамической характеристике УМ, которая, в общем случае, является нелинейной. Таким образом, согласно принципу суперпозиции, сигнал на выходе системы «предварительный корректор-усилитель мощности» в идеальном случае представляет линейно усиленный входной сигнал. Известно, что в процессе эксплуатации изделия его характеристики могут изменяться под воздействием температуры, влажности и других условий окружающей среды. Чтобы схема предварительной коррекции учитывала изменения параметров усилителя мощности, в систему добавляется цепь обратной связи с выхода усилителя мощности через так называемый «преобразователь вниз по частоте» (down-converter) на вход блока обратной связи схемы предварительной коррекции. Таким образом, схема предварительной коррекции отслеживает изменения характеристик УМ и вносит соответствующие изменения в алгоритм работы предварительного корректора.

Предварительная коррекция с использованием схемы обратной связи называется *адаптивной*, а без использования обратной связи – *неадаптивной*. Очевидно, что реализация адаптивной предварительной коррекции предпочтительнее, т. к. при реализации такой системы нет необходимости в максимально точной аппроксимации характеристики используемого усилителя мощности. Кроме того, система с адаптивной предварительной коррекцией вносит необходимые изменения в параметры предварительного корректора в процессе эксплуатации в автоматическом режиме, не требуя вмешательства оператора.

Спектр сигнала, подаваемого на вход схемы предварительной коррекции, может располагаться на нулевой несущей частоте, на промежуточной частоте либо на радиочастоте. Предварительная коррекция на нулевой или на промежуточной частоте предпочтительнее, поскольку в этом случае построение схемы не зависит от несущей частоты, которая будет использоваться для

передачи сигнала в линию связи. Кроме того, цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, работающие на более низких частотах, имеют меньшую стоимость и обладают меньшим энергопотреблением по сравнению с высокочастотными преобразователями. Недостатком предварительной коррекции на нулевой или промежуточной частоте является то, что используемый в схеме «преобразователь вверх по частоте» (up-converter), включаемый между предварительным корректором и усилителем мощности, и «преобразователь вниз по частоте» в цепи обратной связи могут вносить дополнительные искажения в обрабатываемые сигналы.

Как отмечается в [7], предварительные корректоры можно классифицировать по методу вычисления откорректированного значения сигнала на два типа: предварительные корректоры на основе таблиц истинности (look-up-table, LUT) и предварительные корректоры, в которых реализуются методы аппроксимации функции, обратной динамической характеристике УМ. Проведем сопоставительный анализ предварительных корректоров данных типов.

Предварительная коррекция на основе полиномиальной аппроксимации. При использовании подхода, основанного на полиномиальной аппроксимации [8], предварительный корректор в течение определенного времени накапливает отсчеты сигналов на входе и выходе УМ, сохраняя данные в оперативной памяти. По окончании периода накопления в памяти хранится табличная функция, фактически представляющая динамическую характеристику УМ. Чтобы получить функцию, обратную сохраненной характеристике УМ, следует провести аппроксимацию характеристики предварительного корректора, считая входными отсчетами для схемы предварительного корректора выходные отсчеты с УМ, а выходными – отсчеты сигнала на входе УМ. Для вычисления приближающей функции может использоваться, например, метод средних квадратов, с помощью которого вычисляется аппроксимирующий полином. Степень полинома при использовании данного метода, как правило, не превышает 7–8. Данное обстоятельство связано с тем, что при дальнейшем повышении порядка приближающего полинома существенно ухудшается обусловленность системы линейных уравнений, которую необходимо решить для вычисления коэффициентов полинома.



Необходимо отметить, что подход, основанный на вычислении аппроксимирующего полинома, позволяет выполнить коррекцию отдельно либо амплитудных, либо фазовых искажений, вносимых усилителем мощности. То есть если необходима коррекция не только АМ-АМ, но и АМ-ФМ искажений, то необходимо вычислить коэффициенты не одного, а двух приближающих полиномов.

Преимуществом подхода, основанного на полиномиальной аппроксимации АМ-АМ и АМ-ФМ характеристик, является то, что уже при использовании приближающего полинома 4–5 степени обеспечивается достаточно высокое качество коррекции искажений. Однако необходимо отметить некоторые обстоятельства, существенно ограничивающие использование данного подхода при аппаратной реализации предварительного корректора. Дело в том, что вычисление аппроксимирующего полинома – трудоемкая задача, требующая большого количества операций умножения и деления. Причем, реализация данного алгоритма при представлении данных в формате с «фиксированной точкой» не позволяет обеспечить необходимую точность вычислений. Анализ реализационных возможностей ПЛИС по критерию количества умножителей и конфигурируемых логических блоков показал, что алгоритм LU-разложения матрицы, используемый при решении задачи полиномиальной аппроксимации, может быть реализован только на дорогостоящих ПЛИС семейства Stratix производства Altera или семейства Virtex производства Xilinx. Кроме того, перед LU-разложением необходимо построить матрицу метода средних квадратов, что также является задачей, требующей большого количества операций умножения и сложения. Также следует отметить такие трудоемкие операции, как вычисление коэффициентов полинома после LU-разложения и собственно вычисление значения функции на выходе предварительного корректора. Перечисленные обстоятельства позволяют утверждать, что рассмотренный подход ориентирован на аппаратную реализацию на основе микропроцессора.

Предварительная коррекция на основе кусочно-линейной аппроксимации. Подход, основанный на кусочно-линейной аппроксимации характеристик АМ-АМ и АМ-ФМ, ориентирован на реализацию алгоритма предварительной коррекции без использования микропроцессо-

ра, поскольку не требует столь большого числа операций деления и умножения по сравнению с полиномиальной аппроксимацией. Однако в данном случае также существуют ограничения, связанные с использованием фиксированной точки при представлении данных, т. к. для вычисления коэффициента линейной функции для каждого из отрезков аппроксимации необходимо выполнить с высокой точностью операцию деления. Также заметим, что при реализации любых алгоритмов, основанных на аппроксимации функции, обратной динамической характеристике УМ, возникают серьезные затруднения, если данная характеристика УМ имеет экстремумы. В этом случае обратная функция теряет однозначность.

Предварительная коррекция на основе таблицы истинности. Рассмотрим алгоритм предварительной коррекции, основанный на применении LUT. При данном подходе каждому из возможных значений сигнала на входе предварительного корректора, которым в данном случае является LUT, соответствует определенное значение на его выходе. Существуют различные подходы к формированию LUT. Один из первых корректоров на основе LUT предложен в [9]. Данная схема реализована на основе так называемой «LUT с отображением» (mapping LUT). Для каждого значения входного сигнала в таблицу заносится соответствующее значение корректирующей функции, которое добавляется к входному отсчету до передачи сигнала на усилитель мощности. Недостаток данного подхода – необходимость использования отдельной ячейки LUT для каждого значения входного сигнала, приводящая к большому количеству занимаемой памяти. Другой вариант предварительного корректора на основе LUT – реализация LUT, в которой для каждого значения амплитуды входного сигнала хранятся значения амплитуды и фазы выходного сигнала предварительного корректора [10]. В данном случае возникает необходимость перехода из «декартовых» координат, т. е. от представления сигнала в формате «вещественной» и «мнимой» частей, к «полярным» координатам («амплитуда» и «фаза») и обратно. Выполнение таких преобразований с высокой точностью потребует выделения большого количества аппаратных ресурсов.

Еще одним вариантом реализации предварительного корректора на LUT является формирование LUT, в которой хранятся значения

комплексных коэффициентов передачи корректора для каждого диапазона значений амплитуды входного сигнала. Значения коэффициентов передачи формируются в процессе «обучения» LUT, начинающегося с момента загрузки конфигурации ПЛИС. Во время «обучения» производится сравнение отсчетов входного и выходного сигнала. На основании «ошибки» (разницы между входным и выходным сигналами) коэффициент передачи корректируется в ту или иную сторону. Таким образом, в отличие от методов, основанных на аппроксимации характеристик, процесс «обучения» схемы предварительного корректора является итерационным и продолжается постоянно в процессе эксплуатации системы. При этом система непрерывно реагирует на изменение характеристик усилителя мощности, обеспечивая адаптивную коррекцию. При этом не требует-

ся вычисления тригонометрических функций, а также реализации операций деления с высокой точностью. В этой связи подход, основанный на формировании LUT, в которой хранятся комплексные коэффициенты передачи, представляется наиболее эффективным с точки зрения аппаратной реализации.

При построении передатчиков систем мобильной связи широко внедряются усилители класса E, работающие в ключевом режиме. Для линейаризации ключевых усилителей мощности перспективен подход, основанный на построении таблицы истинности LUT. Данный метод позволяет уменьшить уровень нелинейных искажений на 10–17 дБ [11].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румянцев, И.А. Методика расчета микродвухполосного усилителя мощности класса E с учетом паразитных параметров элементов [Текст] / И.А. Румянцев, А.С. Коротков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 2 (120). –С. 56–63.
2. Heijden, M.P. A 65 nm CMOS 30 dBm Class-E RF Power Amplifier With 60 % PAE and 40 % PAE at 16 dB Back-Off [Текст] / M.P. Heijden, M. Apostolidou, D.M.W. Leenaerts [et al.] // IEEE J. Solid-State Circuits. –May 2009. –Vol. 44. –№ 5. –P. 1372–1379.
3. Lee, O. A Charging Acceleration Technique for Highly Efficient Cascode Class-E CMOS Power Amplifiers [Текст] / O. Lee, J. Han, K.H. An [et al.] // IEEE J. of Solid-State Circuits. –Oct. 2010. –Vol. 45. –№ 10. –P. 2184–2197.
4. Zhang, R. A 550-1050MHz +30dBm Class-E Power Amplifier in 65nm CMOS [Текст] / R. Zhang, M. Acar, M. P. van der Heijden [et al.] // IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symp. –5-7 June 2011. –P. 1–4.
5. Karkhaneh, H. Modelling and Compensating Memory Effect in High Power Amplifier for OFDM Systems [Текст] / H. Karkhaneh, A. Ghorbani, H. Amindavar // Progress In Electromagnetics Research C. –2008. –Vol. 3. –P. 183–194.
6. Quach, L.D. A Postdistortion Receiver for Mobile Communications [Текст] / L.D. Quach, S.P. Stapleton // IEEE Trans. on Vehicular Technology. –Nov. 1993. –Vol. 42. –№ 4. –P. 604–616.
7. Baudoin, G. A new approach for LUT-based digital predistorters adaptation [Текст] / G. Baudoin, R. Marsalek, P. Jardin // Proc. of Electronic Devices and Systems Conf. –9-10 Sept. 2003. –P. 162–165.
8. Marsalek, R. From Post-Distortion to Pre-Distortion for Power Amplifiers Linearization [Текст] / R. Marsalek, P. Jardin, G. Baudoin // IEEE Communications Letters. –July 2003. –Vol. 7. –P. 308–310.
9. Nagata, Y. Linear Amplification Technique for Digital Mobile Communication [Текст] / Y. Nagata // IEEE 39th Vehicular Technology Conf. –1-3 May 1989. –P. 159–164.
10. Faulkner, M. Adaptive Linearization Using Predistortion. Experimental Results [Текст] / M. Faulkner, M. Johansson // IEEE Trans. on Vehicular Technology. –May 1994. –Vol. 43. –№ 2. –P. 323–332.
11. Chung, S.W. Energy-Efficient Digital Predistortion With Lookup Table Training Using Analog Cartesian Feedback [Текст] / S.W. Chung, J.W. Holloway, J.L. Dawson // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. –Oct. 2008. –Vol. 56. –№ 10. –P. 2248–2258.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОМЕРНЫМИ МОДЕЛЯМИ ПРОЦЕССА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Индукционные нагревательные установки (ИНУ) периодического действия широко применяются на практике для индукционного нагрева металлов перед последующей обработкой давлением, поскольку они обладают рядом технико-экономических преимуществ по сравнению с конкурентоспособными технологиями.

В статье сформулированы и решены задачи оптимального по критериям быстродействия и энергосбережения управления (ЗОУ) процессом индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок в ИНУ периодического действия. Моделирование процесса индукционного нагрева в ИНУ проводится с помощью численной двумерной электромагнитно-тепловой модели, разработанной в конечно-элементном специализированном программном пакете Cedrat FLUX.

Постановка и решение задачи оптимального по быстродействию управления двумерными численными моделями. Процесс периодического индукционного нагрева цилиндрической заготовки рассматривается в качестве объекта управления с распределенными параметрами, состояние которого определяется пространственно-временным распределением температуры по объему нагреваемого тела $T(l, y, \tau)$, где τ – время; l, y – пространственные координаты, учитывающие неравномерное распределение температуры как по радиусу R ($l \in [0; R]$), так и вдоль оси цилиндрического слитка конечной длины L ($y \in [0; L]$).

Для численного моделирования ИНУ используется конечно-элементный специализированный программный пакет Cedrat FLUX, предназначенный для многопараметрического электромагнитного и теплового анализа. Для построения сетки заготовки, витков индуктора и окружающего пространства применяются треугольные элементы, а

для разбиения области скин-эффекта – четырехугольные элементы [1]. Алгоритм решения задачи моделирования представляет собой последовательную итерационную процедуру, включающую гармонический электромагнитный анализ и переходный тепловой анализ [1, 4].

В качестве управляющего воздействия рассматривается напряжение источника питания $u(\tau)$. Ограничение на управляющее воздействие $u(\tau)$ вводится исходя из некоторой заранее известной максимальной величины $U_{\max}$, определяемой энергетическими возможностями ИНУ, и имеет вид:

$$0 \leq u(\tau) \leq U_{\max}. \quad (1)$$

В качестве критерия оптимальности в задаче быстродействия рассматривается время τ_k процесса нагрева заготовок до требуемых температурных кондиций, а решение ЗОУ должно обеспечить возможно меньшую величину τ_k и максимальную производительность ИНУ.

Применительно к исследуемому классу задач оптимизации индукционная установка в конечный момент времени τ_k должна обеспечивать нагрев заготовки до заданной температуры $T(l, y, \tau_k) = T^*(l, y) = T^* = \text{const}$ с допустимым температурным отклонением ε_0 :

$$\max_{\substack{l \in [0; R] \\ y \in [0; L]}} |T(l, y, \tau_k) - T^*| \leq \varepsilon_0. \quad (2)$$

Задача оптимального по быстродействию управления ИНУ может быть сформулирована следующим образом. *Необходимо найти такое переменное во времени управляющее воздействие $u(\tau) = u_{\text{опт}}(\tau)$, стесненное ограничением (1), которое обеспечивает перевод нагреваемого изделия с начальным распределением температуры $T(l, y, 0) = T_0(l, y) = T_0 = \text{const}$ в заданное целевое множество (2), за минимально возможное время $\tau_k = \tau_{\min}^0$.*

Для общей нелинейной задачи оптимального по быстродействию управления процессами нестационарной теплопроводности с внутренним тепловыделением [2] стандартные процедуры принципа максимума определяют $\Delta^{(N)}$ – параметризованное представление управляющего воздействия $u_{\text{опт}}(\tau)$ в форме кусочно-постоянной функции времени:

$$u_{\text{опт}}(\tau) = \frac{u_{\max}}{2} [1 + (-1)^{j+1}], \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{j-1} \Delta_i < \tau < \sum_{i=1}^j \Delta_i, \quad j = \overline{1, N},$$

однозначно задаваемой с точностью до числа N и длительностей $\Delta_i, i = \overline{1, N}$ интервалов своего постоянства, выступающих в роли искоемых параметров и зависящих только от требуемой точности нагрева ε_0 в (2), где N может быть найдено по заданной величине ε_0 по общей методологии альтернансного метода [2]. В итоге осуществляется процедура редукции исходной задачи к задаче полубесконечной оптимизации:

$$I(\Delta) = \sum_{i=1}^N \Delta_i \rightarrow \min; \Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N), \quad (4)$$

$$\Phi(\Delta) = \max_{\substack{l \in [0; R] \\ y \in [0; L]}} |T(l, y, \Delta) - T^*| \leq \varepsilon,$$

где зависимости $T(l, y, \Delta)$ находятся по численной FLUX-модели объекта при управлении вида (3).

Ниже приводятся примеры решения ЗОУ по критерию быстродействия процесса индукционного нагрева стальных цилиндрических заготовок для следующих исходных данных по конструктивным характеристикам нагревателя и параметрам заготовки: радиус заготовки $R = 52,5$ мм, длина $L = 900$ мм, начальная температура заготовки 20 °С, заданная температура заготовки 1250 °С, длина индуктора 1046 мм, частота питающего тока 2300 Гц, напряжение источника питания 470 В. Рассмотрим случай, когда заданная точность нагрева совпадает с предельно достижимой точностью $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(1)}$ при одноинтервальном управлении. Согласно альтернансным свойствам формы кривых результирующего распределения температур соответствует следующая система уравнений:

$$\begin{cases} T(0, L, \Delta_1^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)}; \\ T(l_{32}, y_{32}, \Delta_1^0) - T^* = +\varepsilon_{\min}^{(1)}; \\ \frac{\partial T(l_{32}, y_{32}, \Delta_1^0)}{\partial l} = \frac{\partial T(l_{32}, y_{32}, \Delta_1^0)}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

решаемая относительно искомой длительности Δ_1^0 интервала нагрева, минимакса $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ и координат точки экстремума l_{32}, y_{32} .

На рис. 1 а представлен результат расчета температурного распределения по объему стальной заготовки в конце оптимального по быстродействию процесса нагрева. Длительность процесса нагрева $541,6$ с, минимальное температурное отклонение на выходе $\varepsilon_{\min}^{(1)} = 78$ °С. Полученная точность нагрева не соответствует технологическим требованиям, предъявляемым к данному процессу. Поэтому необходимо применение двухинтервального алгоритма оптимального управления.

Данному случаю соответствует двухпараметрическое представление управляющего воздействия при $N = 2$ в (3). В качестве оптимизируемых параметров выступают длительности интервалов нагрева и выравнивания температур, а максимальное абсолютное отклонение распределения температуры по объему заготовки от заданного значения представляет собой минимакс $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$. Результирующая система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} T(0, L, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ T(l_{32}, y_{32}, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = +\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ T(R, L, \Delta_1^0, \Delta_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(2)}; \\ \frac{\partial T(l_{32}, y_{32}, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial l} = \frac{\partial T(l_{32}, y_{32}, \Delta_1^0, \Delta_2^0)}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

На рис. 1 б представлено температурное распределение по соответствующим сечениям заготовки в конце оптимального процесса управления. Длительность интервала нагрева составляет $563,85$ с, интервала выравнивания температур – $13,3$ с, $\varepsilon_{\min}^{(2)} = 66,4$ °С.

Постановка и решение задачи оптимального по энергосбережению управления двумерными численными моделями. ЗОУ по энергосбережению формулируется аналогично рассмотренной выше ЗОУ по критерию быстродействия [3].

Необходимо найти такое переменное во времени управляющее воздействие $u(\tau) = u_{\text{опт}}(\tau)$, стесненное ограничением (2), которое обеспечивает перевод нагреваемого изделия с начальным распределением температуры $T_0(l, y) = T_0 = \text{const}$ в заданное целевое множество, согласно (2), при минимальном значении критерия оптимальности:

$$I_3 = \int_0^{\tau_k} P(\tau) d\tau \rightarrow \min, \quad (7)$$



где $P(\tau)$ – закон изменения во времени потребляемой ИНУ мощности.

На сформулированную задачу также распространяется принцип максимума Понтрягина [3], следовательно, оптимальное управление $u_{\text{опт}}(\tau)$ необходимо искать в классе релейных функций времени, отличающихся от решения задачи быстрой работы другими значениями длительностей интервалов постоянства.

Проблема вновь сводится к поиску числа N и длительностей $\Delta_i, i = 1, N$ интервалов постоянства $u_{\text{опт}}(\tau)$. Ввиду зависимости потребляемой ИНУ мощности $P(\tau)$ от функции $u(\tau)$ и согласно представлению управляющего воздействия в виде релейной функции времени, критерий I_3 превращается в сумму длительностей нечетных интервалов постоянства управляющего воздействия. Тогда исходная ЗОУ трансформируется в следующую за-

дачу математического программирования:

$$\begin{aligned} I_3 &= \sum_{i=1,3,5,\dots,N_1}^{N_1} \Delta_i \rightarrow \min_{\Delta}, \\ \Phi(\Delta) &= \max_{l \in [0;1]} |\theta(l, y, \Delta) - \theta^*| \leq \varepsilon; \\ \Delta &= (\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N), \\ N_1 &= N \text{ для нечетных } N, \\ N_1 &= N - 1 \text{ для четных } N. \end{aligned} \quad (8)$$

Для процесса нагрева, оптимального по расходу энергии, сохраняются правила соответствия между числом интервалов постоянства $u_{\text{опт}}^{(2)}(\tau)$ и числом точек с предельными отклонениями результирующих температур от заданной величины, что позволяет и здесь применить альтернативный метод расчета оптимального процесса.

Расчетная система уравнений, соответствующая оптимальному по энергозатратам процессу

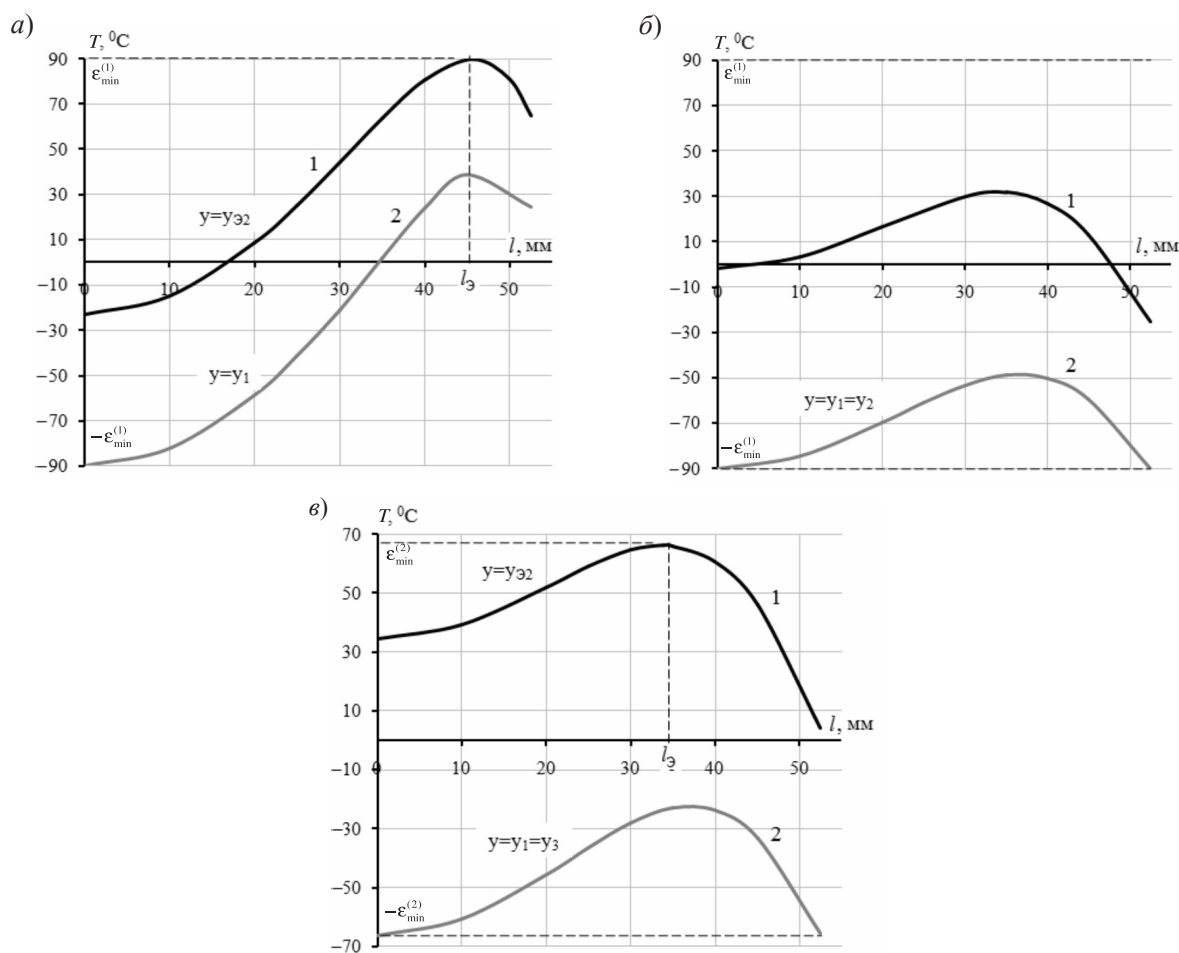


Рис. 1. Результирующие распределения температур по объему заготовки:

а – при одноинтервальном управлении по критерию быстрого действия;

б – при одноинтервальном по критерию расхода энергии; в – при двухинтервальном управлении
1 – сечение заготовки с точкой температурного максимума; 2 – сечение с температурными минимумами

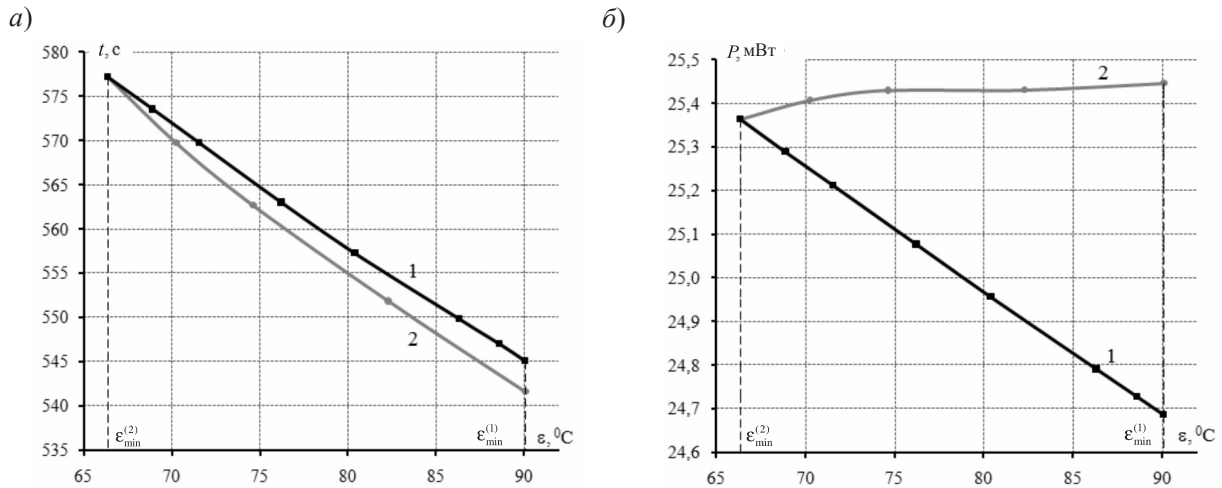


Рис. 2. Зависимости длительности процесса (а) и расхода энергии (б) от заданной точности нагрева при $\varepsilon_{\min}^{(2)} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\min}^{(1)}$
1 – в задаче оптимального быстродействия; 2 – в задаче на минимум энергопотребления

управления для $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(1)}$, принимает вид:

$$\begin{cases} T(0, y_1^0, \bar{\Delta}_1^0, \bar{\Delta}_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)}; \\ T(R, y_2^0, \bar{\Delta}_1^0, \bar{\Delta}_2^0) - T^* = -\varepsilon_{\min}^{(1)}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\bar{\Delta}_1^0, \bar{\Delta}_2^0$ – длительности интервалов постоянства оптимального управления. Данная система решается относительно двух неизвестных $\bar{\Delta}_1^0, \bar{\Delta}_2^0$ при заданном значении $\varepsilon_{\min}^{(1)}$ с учетом того, что минимальные значения конечной температуры на оси и боковой поверхности цилиндра достигаются в одном торцевом сечении заготовки при $y_1^0 = y_2^0 = L$.

На рис. 1 б представлен результат расчета температурного распределения по объему заготовки по окончании процесса. В качестве $\varepsilon_{\min}^{(1)}$ рассмотрим точность, которая достигается при одноинтервальном управлении по критерию быстродействия. При этом длительность интервала нагрева составляет 530 с, интервала выравнивания температур – 15,1 с. Расход энергии, необходимый для индукционного нагрева цилиндрической заготовки, равен 33 мВт.

Значению $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ соответствует единственный вариант формы кривой $T(l, y, \bar{\Delta}_1^0, \bar{\Delta}_2^0)$, представленный на рис. 1 в. В таком случае задача на минимум расхода энергии сводится к задаче быстродействия в классе двухинтервальных управ-

лений. Ее решение «вынужденно» оказывается оптимальным как по критерию быстродействия, так и по энергозатратам. В результате для решения поставленной задачи получаем систему из пяти уравнений, аналогичную системе (6).

Сравнительный анализ решения ЗОУ по критериям быстродействия и расхода энергии. На рис. 2 приведены сравнительные результаты расчета процесса индукционного нагрева цилиндрической металлической заготовки, оптимальных по критериям быстродействия и расхода энергии при изменении требуемой точности нагрева ε_0 в интервале от $\varepsilon_{\min}^{(2)}$ до $\varepsilon_{\min}^{(1)}$. Именно в этом диапазоне изменения ε оптимальные алгоритмы управления по указанным критериям различаются, совпадая лишь на границе $\varepsilon = \varepsilon_{\min}^{(2)}$. Расчеты оптимальных по энергосбережению длительностей интервалов нагрева и выравнивания температур сводятся при всех $\varepsilon: \varepsilon_{\min}^{(2)} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\min}^{(1)}$ к решению системы уравнений (9).

Полученные зависимости наглядно демонстрируют, что при переходе к алгоритмам, оптимальным по энергосбережению, расход энергии сокращается, но при этом производительность процесса падает.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., проект № 14.740.11.1282.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шарапова, О.Ю.** Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета

FLUX [Текст] / О.Ю. Шарапова // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки. – Вып. №7 (28). – С.180–185.



2. Рапопорт, Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла [Текст] / Э.Я. Рапопорт. –М., 1993. –279 с.

3. Rapoport, E. Optimal Control of Induction Heating

Processes [Text] / E. Rapoport, Y. Pleshivtseva. –CRC Press, NY, 2007.

4. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.cedrat.com>

УДК 519.863

Н.А. Гильманова

МЕТОД ТРЕХФАЗОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТОВ СЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ РАЗМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ

Задачи упаковки и построения маршрутов, актуальные для развивающейся быстрыми темпами сферы транспортной логистики, с давних пор изучаются многими исследователями в области комбинаторной оптимизации; разработаны точные и эвристические методы их решения. Однако лишь в последние годы появились работы, посвященные решению этих задач в тесной взаимосвязи: поиску набора маршрутов с одновременным выяснением возможности размещения грузов в транспортных средствах (ТС). Такое объединение способно точно описать реальные ситуации грузоперевозок, но, очевидно, что вычислительная сложность задачи построения маршрутов с трехмерным размещением грузов в ТС (Capacitated Vehicle Routing Problem with Three-Dimensional Loading Constraints, 3L-CVRP) существенно выше, чем сложность задач трехмерной упаковки контейнеров (3DBPP) и маршрутизации (CVRP) по отдельности, при том, что обе эти задачи яв-

ляются NP-трудными. На рис. 1 приведен пример решения задачи 3L-CVRP с 5 клиентами. Получено два маршрута и, соответственно, две схемы размещения грузов в ТС.

Задача 3L-CVRP была впервые представлена в работе [1] в 2006 г.; для ее решения предложен алгоритм поиска с запретами (Tabu Search, TS) и приведены результаты численного эксперимента с применением данного алгоритма. В более ранней работе [2] представлена аналогичная задача с двумерным размещением грузов (2L-CVRP), ее формулировка в виде задачи целочисленного линейного программирования (ЛП) и точный алгоритм решения. Для задачи 3L-CVRP единой ЛП-формулировки и точного метода решения до настоящего момента не создано, целесообразность их разработки ставится под сомнение в связи с чрезвычайно высокой сложностью задачи. Задачам 2L-CVRP и 3L-CVRP посвящена докторская диссертация Fuellerer [3], в которой для их

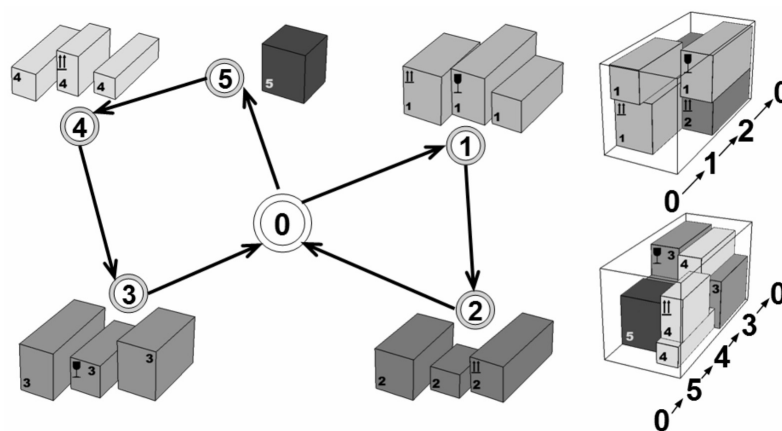


Рис. 1. Пример решения задачи 3L-CVRP

решения предложен алгоритм муравьиной колонии (Ant Colony Optimization, ACO), превосходящий TS по эффективности.

В данной статье представлен новый алгоритм для решения задачи 3L-CVRP, названный *методом трехфазной декомпозиции* (Three-Phase Decomposition, 3-PD), описаны основные аспекты его работы и с помощью численного эксперимента проведено сравнение качества работы 3-PD с алгоритмами TS и ACO.

Постановка задачи 3L-CVRP

Задан полный¹ взвешенный неориентированный граф $G = (V, E)$, где $V = \{0, 1, \dots, n\}$ – множество вершин, среди которых вершина 0 – депо или склад предприятия, вершины $1, \dots, n$ – клиенты, а $E = \{[i, j] : i, j \in V\}$ – множество ребер; c_{ij} – протяженность ребра $[i, j]$. В распоряжении предприятия имеется v однотипных ТС с грузоподъемностью M , длиной грузового отсека L , шириной W и высотой H . Заказ каждого клиента i ($i = 1, \dots, n$) представляет собой множество ящиков-параллелепипедов в количестве q^i с суммарной массой m^i ; каждый ящик характеризуется длиной l_k^i , шириной w_k^i , высотой h_k^i , флагом хрупкости $f_k^i \in \{0, 1\}$ (при $f_k^i = 1$ ящик хрупкий), а также набором допустимых ориентаций $r_k^i = (r_{k1}^i, r_{k2}^i, \dots, r_{k6}^i)$, $r_{kj}^i \in \{0, 1\}$ – флаг разрешения на расположение ящика k клиента i в положении $j = 1, \dots, 6$ ($k = 1, \dots, q^i$) (каждое из шести возможных положений обеспечивает ортогональность размещения, т. е. параллельность граней ящика граням грузового отсека ТС).

Необходимо для каждого количества используемых ТС $v' \leq v$ определить набор из v' маршру-

тов вида $(0, p_1^j, p_2^j, \dots, p_{Q_j}^j, 0)$, где Q_j – число клиентов, обслуживаемых по маршруту $j = 1, \dots, v'$. Маршруты должны иметь минимальную суммарную протяженность²:

$$\sum_{j=1}^{v'} \left(c_{0p_1^j} + \sum_{h=1}^{Q_j-1} c_{p_h^j p_{h+1}^j} + c_{p_{Q_j}^j 0} \right) \rightarrow \min$$

при выполнении следующих условий:

(R1) для $\forall i = 1, \dots, n \exists j = 1, \dots, v', h = 1, \dots, Q_j : i = p_h^j$;

(R2) для $\forall j_1, j_2 = 1, \dots, v', i_1 = 1, \dots, Q_{j_1}, i_2 = 1, \dots, Q_{j_2} : p_{i_1}^{j_1} \neq p_{i_2}^{j_2}$;

(R3) для $\forall j = 1, \dots, v' : \sum_{h=1}^{Q_j} m^{p_h^j} \leq M$.

Ограничения R1-R3, традиционные для задач маршрутизации, означают, что каждый клиент посещается строго по одному маршруту и суммарная масса грузов в каждом ТС не превышает его грузоподъемность.

В связи с наличием упаковочного аспекта в задаче 3L-CVRP, для каждого маршрута требуется также найти допустимую схему размещения ящиков, заказанных клиентами, обслуживаемыми по данному маршруту. Рассмотрим отдельный маршрут доставки j ($j = 1, \dots, v'$) с последовательностью посещения пунктов $(0, p_1^j, p_2^j, \dots, p_{Q_j}^j, 0)$. Далее индекс j будет опущен. Схема размещения грузов в ТС представляет собой набор $(x_k^{p_h}, y_k^{p_h}, z_k^{p_h}, \chi_k^{p_h}, \psi_k^{p_h}, \zeta_k^{p_h})$, $h = 1, \dots, Q$, $k = 1, \dots, q^{p_h}$, состоящий из координат дальних левых нижних вершин всех заказанных ящиков и проекций ребер ящиков на оси координат (проекции характеризуют ориентацию ящиков). Схема допустима, если удовлетворяет следующим ограничениям:

$$(L1) \begin{cases} (r_{k1}^{p_h} = 1) \wedge (\chi_k^{p_h} = l_k^{p_h}) \wedge (\psi_k^{p_h} = w_k^{p_h}) \wedge (\zeta_k^{p_h} = h_k^{p_h}), \\ (r_{k2}^{p_h} = 1) \wedge (\chi_k^{p_h} = w_k^{p_h}) \wedge (\psi_k^{p_h} = l_k^{p_h}) \wedge (\zeta_k^{p_h} = h_k^{p_h}), \\ (r_{k3}^{p_h} = 1) \wedge (\chi_k^{p_h} = h_k^{p_h}) \wedge (\psi_k^{p_h} = l_k^{p_h}) \wedge (\zeta_k^{p_h} = w_k^{p_h}), \\ (r_{k4}^{p_h} = 1) \wedge (\chi_k^{p_h} = l_k^{p_h}) \wedge (\psi_k^{p_h} = h_k^{p_h}) \wedge (\zeta_k^{p_h} = w_k^{p_h}), \\ (r_{k5}^{p_h} = 1) \wedge (\chi_k^{p_h} = w_k^{p_h}) \wedge (\psi_k^{p_h} = h_k^{p_h}) \wedge (\zeta_k^{p_h} = l_k^{p_h}), \\ (r_{k6}^{p_h} = 1) \wedge (\chi_k^{p_h} = h_k^{p_h}) \wedge (\psi_k^{p_h} = w_k^{p_h}) \wedge (\zeta_k^{p_h} = l_k^{p_h}); \end{cases}$$

¹ Если граф не является полным, то предварительно необходимо рассчитать кратчайшие пути между каждой парой вершин.

² В предшествующих постановках целевой функцией полагается суммарная длина маршрутов при ограниченном количестве ТС, при этом количество фактически использованных ТС не принимается во внимание. На практике количество задействованных в перевозке грузов ТС, как правило, имеет даже большее значение, чем длина пройденного ими пути. В связи с этим в предлагаемой постановке требуется получить наборы маршрутов для разных количеств ТС.



$$\begin{aligned}
 & h = 1, \dots, Q, k = 1, \dots, q^{p_h}; \\
 (\text{L2}) \quad & \begin{cases} (x_{k1}^{p_{h1}} \geq x_{k2}^{p_{h2}} + \chi_{k2}^{p_{h2}}) \vee (y_{k1}^{p_{h1}} \geq y_{k2}^{p_{h2}} + \psi_{k2}^{p_{h2}}) \vee (z_{k1}^{p_{h1}} \geq z_{k2}^{p_{h2}} + \zeta_{k2}^{p_{h2}}), \\ (x_{k2}^{p_{h2}} \geq x_{k1}^{p_{h1}} + \chi_{k1}^{p_{h1}}) \vee (y_{k2}^{p_{h2}} \geq y_{k1}^{p_{h1}} + \psi_{k1}^{p_{h1}}) \vee (z_{k2}^{p_{h2}} \geq z_{k1}^{p_{h1}} + \zeta_{k1}^{p_{h1}}); \end{cases} \\
 & h_1, h_2 = 1, \dots, Q, k_1 = 1, \dots, q^{p_{h1}}, k_2 = 1, \dots, q^{p_{h2}}, k_1 \neq k_2 \text{ при } h_1 = h_2; \\
 (\text{L3}) \quad & \begin{cases} (x_k^{p_h} \geq 0) \wedge (y_k^{p_h} \geq 0) \wedge (z_k^{p_h} \geq 0), \\ (x_k^{p_h} + \chi_k^{p_h} \leq L) \wedge (y_k^{p_h} + \psi_k^{p_h} \leq W) \wedge (z_k^{p_h} + \zeta_k^{p_h} \leq H); \end{cases} \\
 & h = 1, \dots, Q, k = 1, \dots, q^{p_h}; \\
 (\text{L4}) \quad & \begin{cases} (x_{k1}^{p_{h1}} \geq x_{k2}^{p_{h2}} + \chi_{k2}^{p_{h2}}) \vee (y_{k1}^{p_{h1}} \geq y_{k2}^{p_{h2}} + \psi_{k2}^{p_{h2}}), \\ (x_{k2}^{p_{h2}} \geq x_{k1}^{p_{h1}} + \chi_{k1}^{p_{h1}}) \vee (y_{k2}^{p_{h2}} \geq y_{k1}^{p_{h1}} + \psi_{k1}^{p_{h1}}); \end{cases} \\
 & h_1, h_2 = 1, \dots, Q, k_1 = 1, \dots, q^{p_{h1}}, k_2 = 1, \dots, q^{p_{h2}} : f_{k1}^{p_{h1}} = 1, f_{k2}^{p_{h2}} = 0, z_{k2}^{p_{h2}} = z_{k1}^{p_{h1}} + \zeta_{k1}^{p_{h1}}; \\
 (\text{L5}) \quad & \begin{cases} z_{k2}^{p_{h2}} = 0, \\ \sum_{h1=1}^{h2} \sum_{k1=1}^{q^{p_{h1}}} (\min \{x_{k2}^{p_{h2}} + \chi_{k2}^{p_{h2}}, x_{k1}^{p_{h1}} + \chi_{k1}^{p_{h1}}\} - \max \{x_{k2}^{p_{h2}}, x_{k1}^{p_{h1}}\}) \cdot (\min \{y_{k2}^{p_{h2}} + \psi_{k2}^{p_{h2}}, y_{k1}^{p_{h1}} + \psi_{k1}^{p_{h1}}\} - \max \{y_{k2}^{p_{h2}}, y_{k1}^{p_{h1}}\}) \geq a \cdot \chi_{k2}^{p_{h2}} \cdot \psi_{k2}^{p_{h2}}; \end{cases} \\
 & h_2 = 1, \dots, Q, k_2 = 1, \dots, q^{p_{h2}}, z_{k2}^{p_{h2}} = z_{k1}^{p_{h1}} + \zeta_{k1}^{p_{h1}}; \\
 & x_{k1}^{p_{h1}} < x_{k2}^{p_{h2}} + \chi_{k2}^{p_{h2}}, x_{k2}^{p_{h2}} < x_{k1}^{p_{h1}} + \chi_{k1}^{p_{h1}}, y_{k1}^{p_{h1}} < y_{k2}^{p_{h2}} + \psi_{k2}^{p_{h2}}, y_{k2}^{p_{h2}} < y_{k1}^{p_{h1}} + \psi_{k1}^{p_{h1}}; \\
 (\text{L6}) \quad & \begin{cases} x_{k1}^{p_{h1}} < x_{k2}^{p_{h2}} + \chi_{k2}^{p_{h2}}, \\ (y_{k1}^{p_{h1}} \geq y_{k2}^{p_{h2}} + \psi_{k2}^{p_{h2}}) \vee (y_{k2}^{p_{h2}} \geq y_{k1}^{p_{h1}} + \psi_{k1}^{p_{h1}}), \\ (z_{k1}^{p_{h1}} \geq z_{k2}^{p_{h2}} + \zeta_{k2}^{p_{h2}}) \vee (z_{k2}^{p_{h2}} \geq z_{k1}^{p_{h1}} + \zeta_{k1}^{p_{h1}}); \end{cases} \\
 & h_1, h_2 = 1, \dots, Q, h_1 < h_2, k_1 = 1, \dots, q^{p_{h1}}, k_2 = 1, \dots, q^{p_{h2}}.
 \end{aligned}$$

Условия L1, L2 и L3 обеспечивают допустимость ориентации каждого ящика³ и запрещают перекрытия предметов между собой и с гранями грузового отсека ТС, условие L4 не допускает непосредственный вертикальный контакт верхней грани установленного хрупкого ящика и дна нехрупкого ящика. Нелинейное ограничение L5 отвечает за обеспечение устойчивости размещения: дно каждого ящика не менее, чем на долю площади a должно иметь под собой твердую опору в виде дна грузового отсека ТС или верхних граней уже установленных ящиков (провисание ящика составляет не более доли площади дна $(1-a)$). Наконец, условие L6 (LIFO policy) обеспечивает доступность ящиков для выгрузки в каждом пункте (при разгрузке в каждом пункте не требуется

переставлять ящики, предназначенные для следующих по маршруту пунктов).

Трехфазная декомпозиция для решения задачи 3L-CVRP

Общая схема метода. Для решения задачи 3L-CVRP разработан метаэвристический метод, названный *трехфазной декомпозицией* (3-PD) по аналогии с двухфазной декомпозицией – эвристическим методом решения классической задачи CVRP, основные действия которого – разбиение множества клиентов на зоны (кластеры) и поиск маршрута по каждой зоне [4]. Третий этап 3-PD заключается в поиске допустимого размещения грузов внутри грузового отсека ТС по заданному маршруту. Таким образом, выделяются три основных процедуры 3-PD: *Zoning* (зонирование), *Routing* (маршрутизация) и *Loading* (загрузка). Схема представлена на рис. 2.

Поскольку ситуации, когда при суммарном объеме загружаемых объектов, близком к

³ Предшествующие постановки жестко устанавливали набор допустимых ориентаций сразу для всех ящиков (разрешалось поворачивать ящики в плоскости основания, переворачивания не допускались).

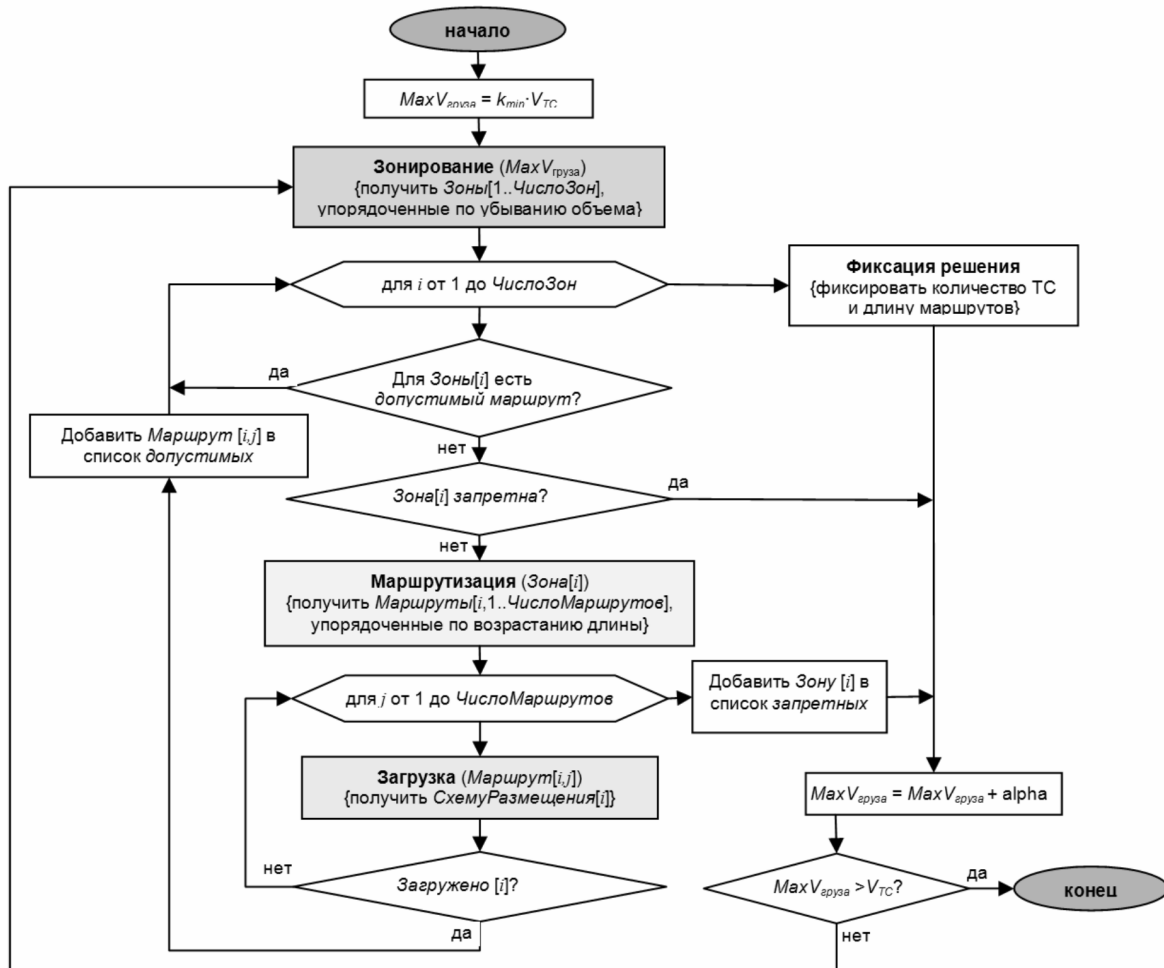


Рис. 2. Схема алгоритма трехфазной декомпозиции (3-PD)

объему грузового отсека ТС (V_{TC}), удастся найти допустимое размещение, редки, при объединении пунктов в зоны суммарный объем груза для загрузки в ТС ($MaxV_{груза}$) искусственно ограничивается до некоторой доли от объема ТС. В процессе решения данная доля постепенно повышается от некоторого минимального значения (k_{min}) до единицы. Для того чтобы не проверять несколько раз одну и ту же зону на наличие допустимого маршрута со схемой размещения, в процессе решения накапливается информация

о найденных допустимых маршрутах и о зонах, для которых допустимый маршрут найти не удалось (запретных зонах).

Зонирование. Для зонирования разработан модифицированный алгоритм кластеризации по принципу ближнего соседа с учетом ограничения на грузоподъемность ТС. Сначала каждый пункт объявляется отдельной зоной, затем на каждой итерации выбирается случайная зона и объединяется с ближайшей к ней, если такое объединение допустимо.

Алгоритм 1. Зонирование

1. **procedure** Zoning($MaxV_{груза}$)
2. **BEGIN**
3. $Zone \leftarrow \{\{1\}, \{2\}, \dots, \{n\}\};$
4. $OpenZone \leftarrow \{1, 2, \dots, n\};$
5. **while** $OpenZone \neq \emptyset$
6. $j \leftarrow random(OpenZone);$
7. $SortZonesByDist(j);$
- //перечислить номера открытых зон
- //пока есть открытые зоны
- //выбрать случайную открытую зону
- //упорядочить откр.зоны по близости к j

```

8.   Merged ← false;
9.   for each z in OpenZone           //проверка возможности объединения
10.      if (z ≠ j) and  $\left( \sum_{i \in Zone_j \cup Zone_z} m^i \leq M \right)$  and  $\left( \sum_{i \in Zone_j \cup Zone_z} \sum_{k=1}^{q^i} l_k^i w_k^i h_k^i \leq Max V_{груза} \right)$ 
11.         MergeZones(j, z);           //объединить зоны, пересмотреть откр.зоны
12.         Merged ← true;
13.         break;
14.   if not(Merged)                   //если объединение не произошло
15.      OpenZone ← OpenZone \ {j};     //исключить j из списка открытых зон
16. SortZonesByVolume;               //упорядочить получ.зоны по убыванию Vгруза
17. END.

```

Маршрутизация. В рамках алгоритма 3-PD фаза маршрутизации заключается в поиске набора наиболее коротких обходов заданной зоны, начинающихся и заканчивающихся в депо, и, таким образом, представляет собой решение задачи коммивояжера (Traveling Salesman Problem, TSP). Допустимость размещения грузов в ТС может зависеть от порядка посещения пунктов разгрузки, в т. ч. если для последовательности $(0, p_1, p_2, \dots, p_Q, 0)$ схема трехмерного размещения грузов существует, то для обратной ей последовательности $(0, p_Q, p_{Q-1}, \dots, p_1, 0)$ с той же длиной допустимого размещения может не быть. Количество маршрутов в выходном наборе ограничивается заранее заданным числом, которое с помощью предварительного численного эксперимента установлено равным 12.

В зависимости от количества пунктов в зоне для маршрутизации можно использовать точный или эвристический алгоритм. В текущей реализа-

ции задача решается точно простым в реализации методом ветвей и границ для числа пунктов до 10. Если же число пунктов в зоне выше, то для решения используется простейший одноточечный эволюционный алгоритм (1+1)-EA [5], перебирающий случайные последовательности пунктов ограниченное число раз (например, 10 млн последовательностей).

Загрузка ТС по маршруту. Цель третьей фазы алгоритма 3-PD – выяснение возможности упаковки грузов по зоне в одно ТС согласно заданному маршруту и получение допустимой схемы размещения, если таковая имеется. Для поиска трехмерной схемы размещения используется мультиметодный алгоритм 3D-MMA [6] в рамках одноточечного эволюционного алгоритма (1+1)-MMEA. Предварительный численный эксперимент показал, что для отыскания допустимой схемы размещения грузов в ТС, как правило, достаточно тысячи итераций (1+1)-MMEA.

Алгоритм 2. Загрузка ТС по маршруту

```

1. procedure Loading(  $p_1, p_2, \dots, p_Q$  )
2. BEGIN
3.   Positions ← {(0,0,0)} ;           //первая точка для установки объекта
4.   Packed ← true ;                   //ящики загружаются в порядке,
5.   for each i from Q downto 1;       //обратном посещении пунктов по маршруту
6.     ItemsUnpacked ← {1, 2, ...,  $q^{p_i}$ } //список объектов очередного пункта
7.     while (ItemsUnpacked ≠ ∅) and (Positions ≠ ∅) //пока есть точки и неупак.объекты
8.       PositionHeuristic ← random(PosHeurList) ; //выбрать эвристику точки из списка
9.       CurPos ← ChoosePosition(PositionHeuristic) ; //выбрать соответствующую точку
10.      ItemHeuristic ← random(ItemHeurList) ; //выбрать эвристику объекта из списка
11.      CurItem ← ChooseItem(CurPos, ItemHeuristic) ; //выбрать соотв.объект, удовл. усл. L1-L6
12.      if CurItem > 0 //если такой объект найден
13.        ItemsUnpacked = ItemsUnpacked \ CurItem //исключить его из списка неупакованных
14.        Positions = Positions ∪ NewPositions(CurPos, CurItem) \ CurPos ; //обновить список точек
15.      if Positions = ∅ //если точек больше нет
16.        Packed ← false ; //то схему размещения найти не удалось
17.        break ;
18. END.

```

Таблица 1

Вероятности применения элементарных эвристик (алгоритм 3D-MMA)

Эвристики выбора точки установки			
Эвристика	Вероятность	Эвристика	Вероятность
$\min x \rightarrow \min z \rightarrow \min y$	0,1667	$\min (x^2+z^2) \rightarrow \min x \rightarrow \min y$	0,1667
$\min y \rightarrow \min x \rightarrow \min z$	0,1666	$\min x \rightarrow \min y \rightarrow \min z$	0,1667
$\min z \rightarrow \min x \rightarrow \min y$	0,1666	$\min (x^2+y^2+z^2) \rightarrow \min x \rightarrow \min z$	0,1667
Эвристики выбора объекта			
Эвристика	Вероятность	Эвристика	Вероятность
$\max \chi \rightarrow \max \psi \rightarrow \max \zeta$	0,0249	$\max \chi \rightarrow \max \zeta \rightarrow \max \psi$	0,0249
$\max \chi \rightarrow \max \psi \zeta \rightarrow \max \psi$	0,0187	$\max \chi \rightarrow \max \psi \zeta \rightarrow \max \zeta$	0,0373
$\max \chi \psi \rightarrow \max \chi \rightarrow \max \zeta$	0,0311	$\max \chi \zeta \rightarrow \max \chi \rightarrow \max \psi$	0,0249
$\max \chi \psi \rightarrow \max \zeta \rightarrow \max \chi$	0,0249	$\max \chi \zeta \rightarrow \max \psi \rightarrow \max \chi$	0,0249
$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \chi \rightarrow \max \psi$	0,0187	$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \chi \rightarrow \max \zeta$	0,0311
$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \chi \psi \rightarrow \max \chi$	0,0187	$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \chi \zeta \rightarrow \max \chi$	0,0311
$\max \psi \rightarrow \max \chi \rightarrow \max \zeta$	0,0249	$\max \psi \rightarrow \max \zeta \rightarrow \max \chi$	0,0187
$\max \psi \rightarrow \max \chi \zeta \rightarrow \max \chi$	0,0187	$\max \psi \rightarrow \max \chi \zeta \rightarrow \max \zeta$	0,0249
$\max \chi \psi \rightarrow \max \psi \rightarrow \max \zeta$	0,0187	$\max \psi \zeta \rightarrow \max \psi \rightarrow \max \chi$	0,0187
$\max \chi \psi \rightarrow \max \zeta \rightarrow \max \psi$	0,0249	$\max \psi \zeta \rightarrow \max \chi \rightarrow \max \psi$	0,0373
$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \psi \rightarrow \max \chi$	0,0249	$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \psi \rightarrow \max \zeta$	0,0311
$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \chi \psi \rightarrow \max \psi$	0,0249	$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \psi \zeta \rightarrow \max \psi$	0,0311
$\max \zeta \rightarrow \max \chi \rightarrow \max \psi$	0,0124	$\max \zeta \rightarrow \max \psi \rightarrow \max \chi$	0,0187
$\max \zeta \rightarrow \max \chi \psi \rightarrow \max \chi$	0,0373	$\max \zeta \rightarrow \max \chi \psi \rightarrow \max \psi$	0,0187
$\max \chi \zeta \rightarrow \max \zeta \rightarrow \max \psi$	0,0249	$\max \psi \zeta \rightarrow \max \zeta \rightarrow \max \chi$	0,0311
$\max \chi \zeta \rightarrow \max \psi \rightarrow \max \zeta$	0,0187	$\max \psi \zeta \rightarrow \max \chi \rightarrow \max \zeta$	0,0249
$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \zeta \rightarrow \max \chi$	0,0124	$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \zeta \rightarrow \max \psi$	0,0249
$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \chi \zeta \rightarrow \max \zeta$	0,0311	$\max \chi \psi \zeta \rightarrow \max \psi \zeta \rightarrow \max \zeta$	0,0249
$\min \chi \rightarrow \min \psi \rightarrow \min \zeta$	0,0031	$\min \chi \rightarrow \min \zeta \rightarrow \min \psi$	0,0031
$\min \chi \rightarrow \min \psi \zeta \rightarrow \min \psi$	0,0039	$\min \chi \rightarrow \min \psi \zeta \rightarrow \min \zeta$	0,0031
$\min \chi \psi \rightarrow \min \chi \rightarrow \min \zeta$	0,0023	$\min \chi \zeta \rightarrow \min \chi \rightarrow \min \psi$	0,0031
$\min \chi \psi \rightarrow \min \zeta \rightarrow \min \chi$	0,0031	$\min \chi \zeta \rightarrow \min \psi \rightarrow \min \chi$	0,0031
$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \chi \rightarrow \min \psi$	0,0023	$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \chi \rightarrow \min \zeta$	0,0031
$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \chi \psi \rightarrow \min \chi$	0,0015	$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \chi \zeta \rightarrow \min \chi$	0,0039
$\min \psi \rightarrow \min \chi \rightarrow \min \zeta$	0,0031	$\min \psi \rightarrow \min \zeta \rightarrow \min \chi$	0,0031
$\min \psi \rightarrow \min \chi \zeta \rightarrow \min \chi$	0,0047	$\min \psi \rightarrow \min \chi \zeta \rightarrow \min \zeta$	0,0039
$\min \chi \psi \rightarrow \min \psi \rightarrow \min \zeta$	0,0023	$\min \psi \zeta \rightarrow \min \psi \rightarrow \min \chi$	0,0023
$\min \chi \psi \rightarrow \min \zeta \rightarrow \min \psi$	0,0039	$\min \psi \zeta \rightarrow \min \chi \rightarrow \min \psi$	0,0031
$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \psi \rightarrow \min \chi$	0,0023	$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \psi \rightarrow \min \zeta$	0,0039
$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \chi \psi \rightarrow \min \psi$	0,0031	$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \psi \zeta \rightarrow \min \psi$	0,0031
$\min \zeta \rightarrow \min \chi \rightarrow \min \psi$	0,0031	$\min \zeta \rightarrow \min \psi \rightarrow \min \chi$	0,0023
$\min \zeta \rightarrow \min \chi \psi \rightarrow \min \chi$	0,0031	$\min \zeta \rightarrow \min \chi \psi \rightarrow \min \psi$	0,0031
$\min \chi \zeta \rightarrow \min \zeta \rightarrow \min \psi$	0,0023	$\min \psi \zeta \rightarrow \min \zeta \rightarrow \min \chi$	0,0031
$\min \chi \zeta \rightarrow \min \psi \rightarrow \min \zeta$	0,0031	$\min \psi \zeta \rightarrow \min \chi \rightarrow \min \zeta$	0,0031
$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \zeta \rightarrow \min \chi$	0,0031	$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \zeta \rightarrow \min \psi$	0,0031
$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \chi \zeta \rightarrow \min \zeta$	0,0023	$\min \chi \psi \zeta \rightarrow \min \psi \zeta \rightarrow \min \zeta$	0,0039



На шагах 8 и 10 алгоритм 3D-MMA использует списки простых эвристик, каждая из которых однозначно выбирает точку для установки объекта или неупакованный объект согласно заложенному в ней жадному правилу. При этом сами эвристики выбираются случайным образом с некоторыми присвоенными им вероятностями (вероятности, использованные в текущей реализации, приведены в табл. 1).

Численные эксперименты

Эксперименты по решению задачи 3L-CVRP с помощью алгоритма, основанного на трехфазовой декомпозиции, проводились на примерах, предложенных в [1], доступных в Интернете

(www.or.deis.unibo.it/research.html). В примерах графы и массы заказов, а также грузоподъемность ТС заимствованы из 27 примеров для классической задачи CVRP (в данных примерах пункты задаются координатами на плоскости). Заданы следующие параметры грузового отсека ТС: $L=60$, $W=25$, $H=30$. Для каждого клиента количество ящиков в заказе установлено случайно в промежутке от одного до трех с равными вероятностями. Длина, ширина и высота каждого ящика сгенерированы случайно и равномерно на отрезках $[0, 2L; 0, 6L]$, $[0, 2W; 0, 6W]$ и $[0, 2H; 0, 6H]$ соответственно; таким образом, все объекты имеют достаточно большие размеры относительно ТС. Все объекты разрешается поворачивать на 90°

Таблица 2

Результаты численного эксперимента (решение 3L-CVRP)

	Число клиентов n	Число ящиков M	Число ТС (доступ.) ν	Суммарная длина маршрутов			Отклонение (3-PD – TS) μ_1 , %	Отклонение (3-PD – ACO) μ_2 , %
				Z_{TS}	Z_{ACO}	Z_{3-PD}		
1	15	32	5	316,32	304,13	302,02	-4,52	-0,69
2	15	26	5	350,58	334,96	334,96	-4,46	0,00
3	20	37	5	447,73	399,68	391,65	-12,53	-2,01
4	20	36	6	448,48	440,68	440,68	-1,74	0,00
5	21	45	7	464,24	450,93	456,64	-1,64	1,27
6	21	40	6	504,46	498,32	498,32	-1,22	0,00
7	22	46	6	831,66	792,13	771,07	-7,29	-2,66
8	22	43	8	871,77	820,67	821,21	-5,80	0,07
9	25	50	8	666,10	635,50	644,21	-3,29	1,37
10	29	62	10	893,61	840,75	848,69	-5,03	0,94
11	29	58	9	818,65	818,87	806,02	-1,54	-1,57
12	30	63	9	651,58	626,37	614,60	-5,67	-1,88
13	32	61	9	2816,93	2739,80	2753,84	-2,24	0,51
14	32	72	11	1559,64	1466,84	1505,12	-3,50	2,61
15	32	68	10	1452,34	1367,58	1368,73	-5,76	0,08
16	35	63	11	707,85	698,92	698,61	-1,31	-0,04
17	40	79	14	909,99	868,59	888,04	-2,41	2,24
18	44	94	14	1400,52	1255,64	1330,79	-4,98	5,98
19	50	99	13	827,99	777,18	814,11	-1,68	4,75
20	71	147	20	732,12	604,28	658,56	-10,05	8,98
21	75	155	18	1226,20	1110,09	1227,02	0,07	10,53
22	75	146	19	1277,94	1194,18	1288,03	0,79	7,86
23	75	150	18	1258,16	1158,51	1266,78	0,69	9,35
24	75	143	18	1307,09	1136,80	1240,84	-5,07	9,15
25	100	193	24	1570,72	1429,64	1635,45	4,12	14,40
26	100	199	28	1839,12	1611,78	1869,01	1,63	15,96
27	100	198	25	1747,52	1560,70	1734,30	-0,76	11,12
Средние				1033,31	960,87	1007,75	-2,47	4,88

в плоскости основания и не разрешается переворачивать. Коэффициент непровисания a установлен равным 75 %. Задаются максимально допустимые количества используемых ТС v .

С помощью предварительного численного эксперимента установлено, что лучшие решения по примерам получены при $MaxV_{TC} \in [0,62V_{TC}; 0,97V_{TC}]$. При проведении основного эксперимента максимально допустимый объем груза в ТС поднимался от $0,4V_{TC}$ до V_{TC} с шагом $\alpha = 0,01V_{TC}$. Время работы алгоритма 3-PD установлено равным времени работы алгоритма TS: 1800 с для примеров 1–9, 3600 с для примеров 10–18 и 7200 с для примеров 19–27. Эксперимент был выполнен на Intel Core2 Duo 2,26 ГГц (без параллельных вычислений). Проведено сравнение с результатами, полученными с помощью алгоритмов TS (эксперимент на Pentium IV 3 ГГц в 2006 г. [1]) и АСО (эксперимент на Pentium IV 3,2 ГГц в 2008 г. [3]). Результаты представлены в табл. 2; в последних двух столбцах указаны относительные отклонения решений, полученных с помощью 3-PD, от решений, полученных TS и АСО, рассчитанные по следующим формулам:

$$\mu_1 = \frac{Z_{3-PD} - Z_{TS}}{Z_{TS}}; \mu_2 = \frac{Z_{3-PD} - Z_{ACO}}{Z_{ACO}}.$$

По результатам эксперимента алгоритм 3-PD на 22 примерах показал результаты не хуже, чем алгоритм TS, и на 9 примерах – не хуже, чем

АСО. При этом на задачах большой размерности (от 75 клиентов) 3-PD в среднем уступает TS и значительно уступает АСО, а на сравнительно небольших примерах (до 22 клиентов) показывает лучшие результаты, чем оба других алгоритма. Это позволяет предположить, что 3-PD способен получать более точные решения, чем другие алгоритмы, однако более чувствителен к размерности задачи и на больших примерах требует большего времени работы.

Для решения задачи построения маршрутов следования транспортных средств с трехмерным размещением грузов предложен метод трехфазной декомпозиции (3-PD). Полученные результаты говорят о том, что возможности использовавшихся ранее для решения этой задачи алгоритмов поиска с запретами и муравьиной колонии даже на примерах малой размерности весьма ограничены. Причины отставания одних алгоритмов от других на разных примерах могут заключаться в следующем: недостаточно разнообразны получаемые маршруты (в некоторых случаях один маршрут должен проходить через удаленные друг от друга пункты); встроенный алгоритм поиска схемы размещения не способен найти допустимую схему в случаях, когда она существует. В этих направлениях будет продолжаться работа по усовершенствованию алгоритма 3-PD.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gendreau, M.** A tabu search approach for a routing and container loading problem [Текст] / M. Gendreau, M. Iori, G. Laporte [et al.] // *Transportation Science*. –2006. –Vol. 40. –P. 342–350.
2. **Iori, M.** An exact approach for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints [Текст] / M. Iori, J.J. Salazar Gonzales, D. Vigo // *Transportation Science*. –2007. –Vol. 41. –P. 253–264.
3. **Fuellerer, G.** Vehicle routing with multi-dimensional loading constraints: PhD thesis [Текст] / G. Fuellerer. –Universitaet Wien, Austria, 2008.
4. **Fisher, M.L.** A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem [Текст] / M.L. Fisher, R. Jaikumar // *Networks*. –1981. –Vol. 11. –P. 109–124.
5. **Борисовский, П.А.** О сравнении некоторых эволюционных алгоритмов [Текст] / П.А. Борисовский, А.В. Еремеев // *Автоматика и телемеханика*. –2004. –№ 3. –С.3–9.
6. **Валиахметова, Ю.И.** Мультиметодная технология ортогональной упаковки и ее применение в задачах транспортной логистики [Текст] / Ю.И. Валиахметова, Э.А. Мухачева, А.С. Филиппова, Н.А. Гильманова [и др.] // *Информационные технологии*. –2009. –№ 12 (приложение). –32 с.



ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Основа любой организации – деловые процессы (обслуживание заказов клиентов, подготовка и согласование документов, выполнение распоряжений руководства и т. д.). Эти процессы постоянно взаимодействуют между собой. Большинство деловых процессов регламентировано нормативными документами (внутренними стандартами предприятия, положениями, уставами, приказами и т. д.), и прохождение этих процессов должно строго соблюдаться и контролироваться. При этом бывает сложно отследить и проверить работу сотрудников, оценить загруженность персонала. Зачастую сотрудниками организации не соблюдаются определенные правила при исполнении своих служебных обязанностей, что негативно сказывается на эффективности работы и репутации компании.

В современных социально-экономических условиях постоянное улучшение качества деловых процессов – необходимое условие конкурентоспособности любого предприятия. Эффективным средством улучшения качества является реинжиниринг деловых процессов, направленный на удовлетворение потребителей. В статье рассматривается реинжиниринг деловых процессов в строительной индустрии, основанный на управлении знаниями и опытом экспертов-менеджеров, зафиксированных в сопровождающих процессы документах.

Любой строительный процесс – это комплекс взаимосвязанных работ, для выполнения которых выделяются соответствующие ресурсы и устанавливаются определенные сроки. В последнее время особое внимание уделяется проблеме эффективного руководства строительными работами. Решение данной проблемы требует участия коллектива ученых и инженеров, причем работа такого коллектива должна планироваться с учетом деятельности других коллективов.

Проблема управления взаимодействующими процессами

Строительный сектор характеризуется высо-

ким уровнем взаимодействия различных организаций с большим количеством участников в каждом строительном проекте. Многие организации концентрируют внимание на управлении основными деловыми процессами, передавая большую часть строительных работ в специализированные строительные предприятия на условиях подряда. В процессе строительства заказчик поручает строительство подрядчику, а тот в свою очередь своему субподрядчику, который в дальнейшем и занимается поставкой оборудования, материалов и рабочих для строительства объекта, взаимодействуя при этом с поставщиком. При росте цен на строительные материалы некоторые подрядчики выбирают более дешевые материалы, качество которых, как правило, оставляет желать лучшего. Таким образом, процесс контроля качества конечного продукта значительно усложняется [1].

При проведении строительных работ происходит взаимодействие преимущественно трех процессов, реализуемых на различных предприятиях: основной производственный процесс предприятия-заказчика (строительство и реализация ипотечного жилья), выполнение предприятием-подрядчиком строительных подрядных работ, осуществление предприятием-поставщиком поставок материалов и оборудования для строительства. То есть при выполнении основного процесса на предприятии неизбежно взаимодействие производственных процессов как внутри одного предприятия, так и с другими предприятиями.

Современные условия развития предприятий строительной промышленности определяются общеэкономической ситуацией в стране. Наиболее значимыми индикаторами являются объемы инвестиций в основной капитал, объемы и структура жилищного строительства и др. В табл. 1 приведены изменения объемов жилищного строительства в период с 2006 по 2008 г. Положительная динамика развития строительной отрасли также зарегистрирована и в первом квартале 2011 г. [2]. Анализ статистики рынка жилищного строительства и

Таблица 1

Количество построенных квартир за год

Субъекты	2006	2007	2008
Российская Федерация	143997	189542	200139
Центральный федеральный округ	30980	43884	40696
Ленинградская область	2753	4954	5028
Санкт-Петербург	293	772	789
Республика Башкортостан	10066	10744	15698
Республика Татарстан	6658	6848	7683
Челябинская область	2998	4440	4820
Дальневосточный федеральный округ	3263	4017	3911

строительных услуг показал, что объемы выполненных строительных работ в Республике Башкортостан тоже увеличиваются. Однако в настоящее время показатели деятельности строительных предприятий еще не достигли предкризисных значений. До сих пор существует недогруженность строительных предприятий, уменьшение объемов ввода многоэтажного жилья.

Проблемные ситуации (ПС), возникающие в реализации процессов, в основном связаны с изношенностью и отказами оборудования, низкой производительностью и недостаточно высокой квалификацией персонала, низким качеством и высокой стоимостью работ, недостаточно эффективным информационным взаимодействием управляющих на предприятиях строительной промышленности с организациями-заказчиками.

Оказание поддержки принятия решений на основе системного анализа и управления знаниями с учетом возможностей современных информационных технологий обеспечит более высокую эффективность сотрудничества управляющих, занятых в деловых процессах в строительной индустрии.

Разработка системы поддержки принятия коллективных решений

Модели деловых процессов позволяют заинтересованным лицам улучшить управление про-

цессами на предприятии. В табл. 2 представлены основные способы для сбора знаний.

Третий метод представляется наиболее эффективным, поскольку для большинства предприятий организуется команда разработчиков, совместно осуществляющих сбор информации и сведение полученных данных в единое целое посредством коллективной разработки визуальной, преимущественно объектной, модели производственных процессов. Бизнес-модель разрабатывается для определения текущего состояния процесса и для выявления «слабых мест». Конечный продукт – это модель «как должно быть», т. е. отображение того, чем процесс должен стать в результате изменений. Сравнивая и анализируя модели «как есть» и «как должно быть», бизнес-аналитики могут определить, требуются ли основательные перемены в существующих бизнес-процессах и информационных системах или нужны только незначительные модификации для повышения эффективности. Следовательно, моделирование бизнес-процесса и последующий анализ могут использоваться для существенного изменения политики предприятия и метода его управления [1].

При взаимодействии трех моделей происходит наиболее наглядное представление рассматриваемой проблемы. Изначально эксперт

Таблица 2

Способы сбора знаний

Название	Описание
Интервью	Эксперт задает вопросы (инжиниринг знаний или разработка СПИР) управляющим, владеющим знаниями о требуемом ему деловом процессе, серию вопросов для извлечения знаний
Наблюдение	Эксперт наблюдает за реализацией делового процесса со стороны
Обсуждение	Эксперт обсуждает разрабатываемую визуальную модель с другими экспертами



разрабатывает комплекс объектных моделей, который в дальнейшем выступает помощником при разработке онтологии делового процесса. Эта онтология показывает, каким образом взаимосвязаны сущности, принимающие участие в рассматриваемом деловом процессе. Также в онтологии обычно отражены модели и методы, которые могут оказать помощь в принятии решения при возникновении проблемной ситуации в рассматриваемом процессе.

Интегрированная модель взаимодействующих процессов показывает взаимодействие трех моделей различного типа: объектной модели процесса поддержки принятия решений для взаимодействующих производственных процессов; онтологии задач моделей и методов поддержки принятия решений; модели представления знаний в области управления взаимодействующими процессами.

Онтология задач, моделей и методов принятия решений в ПС применяется для повышения эффективности поиска решений, основанного на прецедентах, т. к. обеспечивает большую точность описаний прецедентов (на основе пополнения запросов пользователей), большую полноту выполнения поисковых запросов для поиска ближайших прецедентов (на основе использования контента описания прецедентов) и большую обоснованность решений (на основе применения адекватных математических моделей проблемных ситуаций).

Концептуальная модель позволяет визуализировать семантически связанную структуру предметной области и выявлять класс, атрибуты, их значения и отношения между ними. Данная модель позволяет объединять понятия из словаря предметной области. Полученная концептуальная модель онтологии дает возможность описать разрабатываемую онтологию в соответствии с уровнями иерархии. Концептуальная модель онтологии управления взаимодействующими производственными процессами представлена на рис. 1.

Знания и опыт экспертов об управлении в проблемных ситуациях, для которых еще не сформулированы правила ввиду отсутствия достаточного множества примеров принятия решений, представлены в базе знаний в форме прецедентов проблемных ситуаций.

Модуль базы знаний, содержащий прецеденты (*case*), разработан по результатам кластерного анализа прецедентов в соответствии с множе-

ством кластеров, соответствующих применению типовых математических схем к решению задач управления в проблемной ситуации. Кластерный анализ прецедентов необходим для организации эффективного поиска в базе знаний. С каждым кластером ассоциированы информационные структуры, описывающие знание о конкретной подобласти – правила распознавания ПС и прецеденты, наследующие свойства своего класса [3].

Множество прецедентов классифицировано в соответствии с результатами интеллектуального анализа данных на категории экземпляров классов (примеров классов) проблемных ситуаций. Категории определяются таким образом, чтобы каждой из них соответствовал определенный пример решений в классе «Решение».

Процесс поиска ближайшего прецедента позволяет выполнять и стандартные процедуры поиска прецедентов экземпляров классов проблемных ситуаций в онтологии, и процедуры поиска ближайших прецедентов принятия решений по аналогии, что дает возможность сопоставить текущую ПС с прецедентами в базе знаний и выбрать наиболее подходящий из них [4].

Задача принятия решений d^{PS} на основе множества решений, содержащихся в найденных k ближайших прецедентах, представима кортежем следующего вида:

$$d^{PS} = \langle D^{case}, F, sim^X, M, R^A \rangle, \quad (1)$$

с учетом $\xi = \{\xi_1, \dots, \xi_S\}$,

где D^{case} – множество альтернатив решений, содержащихся в найденных k ближайших прецедентах; F – множество критериев оценки альтернатив решений; sim^X – множество значений сходства между признаками проблемной ситуации и соответствующими признаками прецедентов; M – множество методов, позволяющих получить отображение множества альтернатив в множество векторных оценок эффективности решений в соответствии с множеством критериев F ; R^A – множество решающих правил адаптации, устанавливающих отношения между значениями сходства, полученными в результате сопоставления признаков проблемной ситуации и признаков прецедентов и действиями, корректирующими атрибуты классов решений; ξ – множество S типов вариантов среды решения задачи (детерминированная, вероятностная, нечеткая и др.).

При поиске используются отношения «экземпляр класса» («is-a»). Отношение «is-a» позволи-

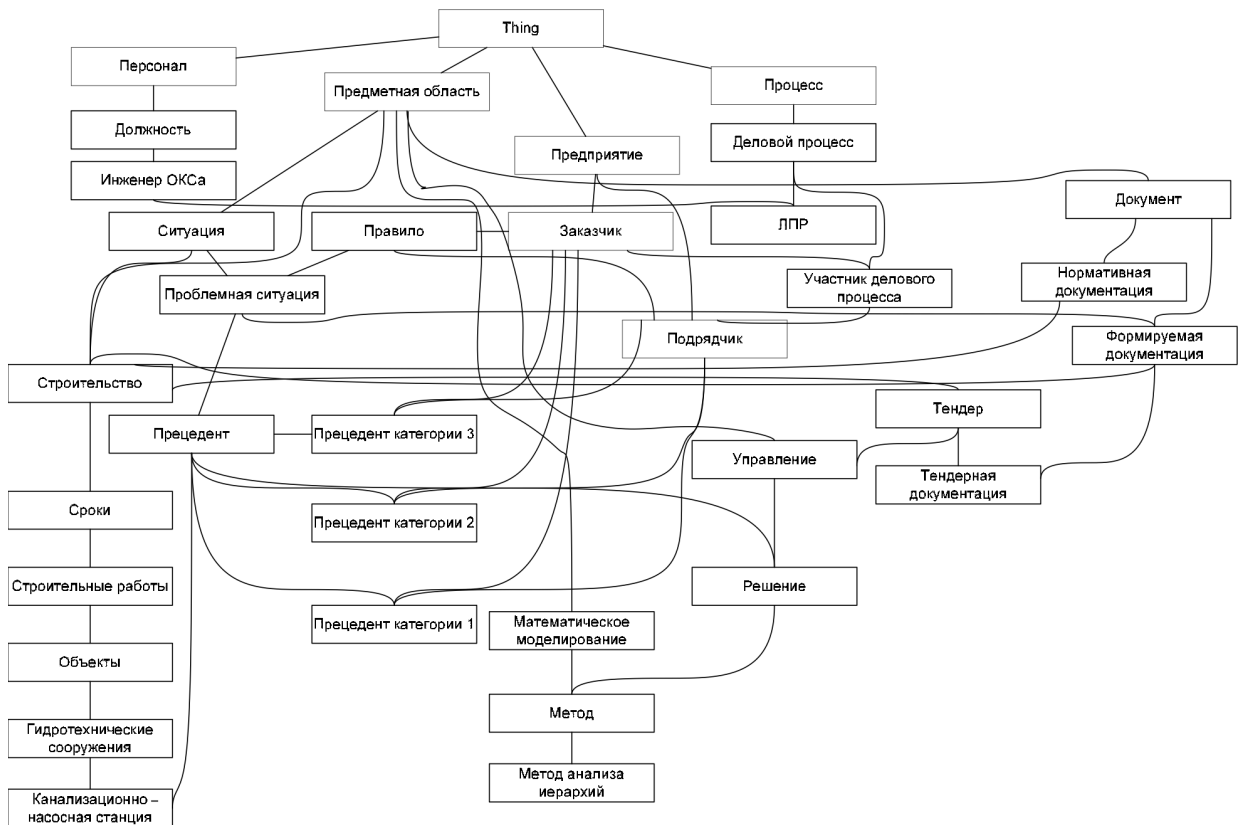


Рис. 1. Концептуальная модель онтологии управления взаимодействующими производственными процессами

ло при сравнении учесть степень таксономической близости концептов в онтологии.

Локальная мера сходства для отношения «is-a»:

$$C_s(c_i) = \{c_j \in C : R(c_i, c_j) = \langle \text{is-a} \rangle \vee c_i = c_j\} \quad (2)$$

$$\text{sim}_{\text{is-a}}(c_i, c_j) = \frac{|C_s(c_i) \cap C_s(c_j)|}{|C_s(c_i) \cup C_s(c_j)|},$$

где C_s – множество классов в онтологии; c_i, c_j – классы в онтологии, входящие в множество $C_s \in \tilde{C}$; R – отношение «is-a» между концептами.

После расчета локальных мер сходства элементов запроса и прецедентов определенного класса, вычисляется глобальная мера сходства:

$$\text{sim}_j(x_{k,PS}, x_{k,j}) = \sum_j w_{\text{is-a}} \cdot \text{sim}_{\text{is-a}}(x_{k,PS}, x_{k,j}), \quad (3)$$

где $x_{k,PS}$ – признаки запроса X ; $x_{k,j}$ – признаки прецедента X' .

Далее решение из ближайшего прецедента адаптируется по специальным правилам к реаль-

ной проблемной ситуации. В случае, если ближайший прецедент не найден, описание проблемной ситуации запоминается как нераспознанный прецедент, лицо, принимающее решение, находит решение самостоятельно или с помощью экспертов, и СППКР предлагает сохранить описание задачи принятия решений как новый прецедент.

При разработке СППКР предложено объединить фундаментальный принцип поиска оптимального решения, характерный для полностью формализованных задач, с принципом использования экспертных знаний, характерным для теории искусственного интеллекта. По результатам объектного моделирования предложена структура системы поддержки принятия коллективных решений, включающая онтологию задач, моделей и методов управления взаимодействующими производственными процессами, базу знаний с правилами и прецедентами, а также модули поиска решений на основе правил, прецедентов, модули пополнения и адаптации решений, модуль информационного поиска в едином информационном пространстве, организованном онтологией

Для проверки адекватности и целостности представленных знаний разрабатывается логическая модель онтологии. Описание логики построения онтологии необходимо для формализации структуры теоретических знаний в виде таксономии понятий и фреймовой структуры прецедентов, представленных в онтологии как экземпляры классов понятий. Логическая модель онтологии разработана в соответствии с теорией описательной (дескриптивной) логики (*Description Logic* – DL). Синтаксис логики первого порядка предназначен для упрощения процедуры формирования высказываний об объектах, а описательные логики представляют собой системы обозначений, предназначенные для упрощения процедуры описания определений и свойств категорий. Системы описательной логики развились из семантических сетей в ответ на необходимость формализовать смысл, который несут в себе сети, сохранив вместе с тем акцент на использование таксономической структуры в качестве принципа организации.

Для принятия решений при управлении взаимодействующими процессами предложено использовать математическую модель «метод анализа иерархий», позволяющую определить

приоритеты различных вариантов решения по предложенным критериям. Математическая модель метода анализа иерархий представлена в онтологии поддержки принятия решений в форме семантической сети (рис. 2).

Единство представления задач управления взаимодействующими процессами и математических моделей принятия решений позволяет получить четкое отображение множества задач на множество моделей посредством отношений ассоциации. Процесс принятия решений с использованием многокритериального принятия решений методом анализа иерархий алгоритмизирован и реализован в среде MATLAB. Архитектура взаимодействия управляющих в процессе принятия коллективных решений приведена на рис. 3.

Онтологическая база знаний находится на основном сервере предприятия-заказчика. При этом доступ к ней имеет только сотрудник отдела капитального строительства, осуществляющий мониторинг выполнения строительных работ предприятием-подрядчиком и отвечающий за принятие решения при возникновении проблемной ситуации во взаимодействующих процессах. Отдельное место хранения выделено для сервера управления онтологией и сервера управления зна-

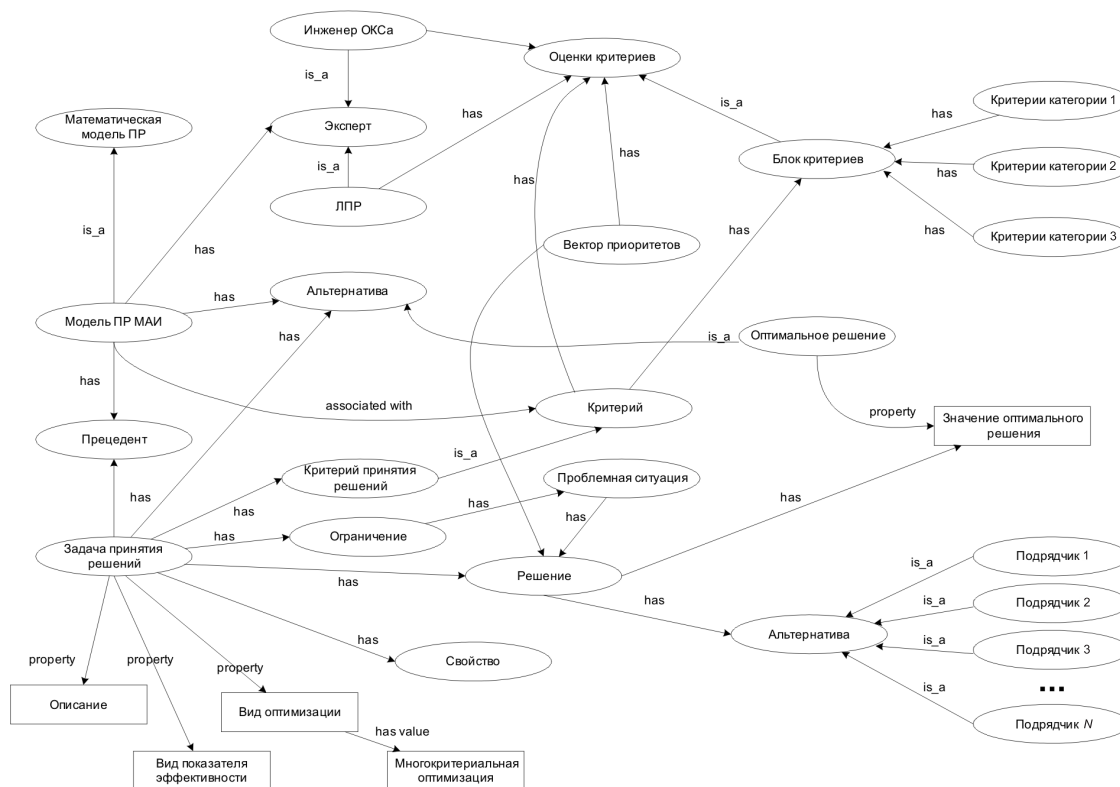


Рис. 2. Фрагмент онтологии задач, моделей и методов

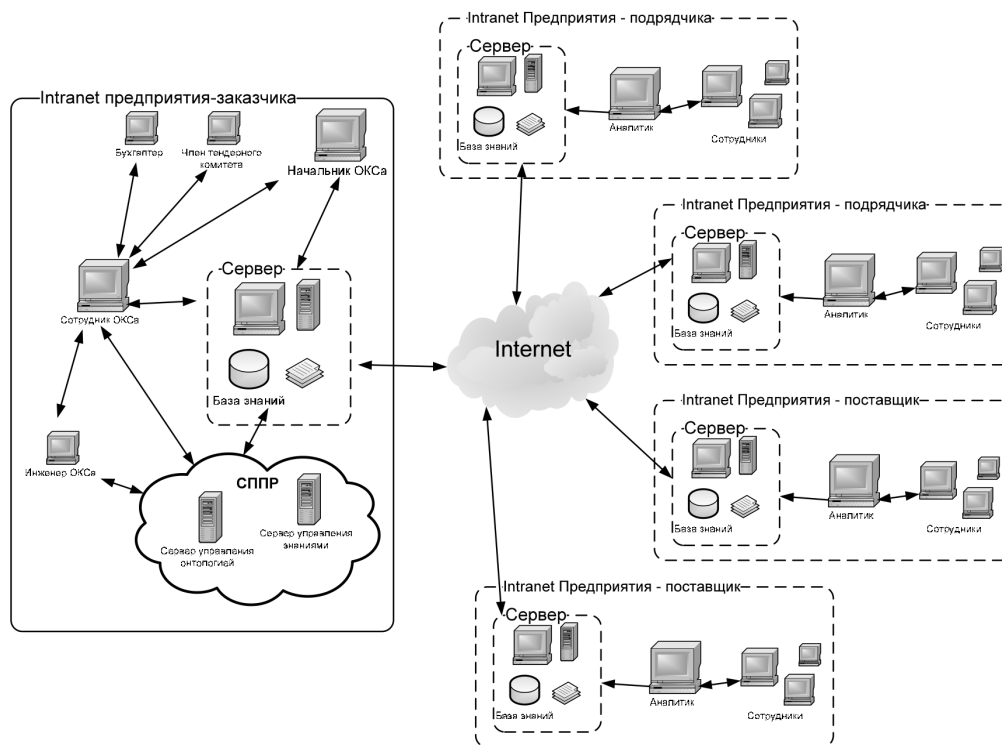


Рис. 3. Архитектура расположения СППКР

ниями. Такая архитектура размещения СППКР позволяет повысить эффективность поддержки принятия решений при управлении взаимодействующими процессами.

В мировой практике особое внимание уделяется проблеме эффективного руководства строительными работами. Решение этой проблемы требует взаимного участия коллектива ученых и инженеров. Для обеспечения повышения эффективности управления взаимодействующими процессами необходимы соответствующие модели, методы и средства поддержки принятия решений, а также реализации управляющих действий в соответствии с располагаемыми ресурсами.

Поддержка принятия решений на основе системного анализа и управления знаниями с учетом возможностей современных информационных технологий может привести к важным результатам в управлении взаимодействующими процессами в строительной индустрии, обеспечив более высокую эффективность сотрудничества управляющих, занятых в деловых процессах.

Разработанная СППКР позволяет адекватно отобразить экспертные знания, а также обеспечить точность представления системы понятий процесса при управлении взаимодействующими процессами и оказать помощь эксперту при возникновении проблемной ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernyahovskaya, L.R. Information-analytical decision making support on the base of optimization models [Text] / L.R. Chernyahovskaya, N.I. Fedorova, R.I. Nizamutdinova. –Уфа: ООО «Мир печати». –С. 82–86.
2. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.gks.ru/>
3. Черняховская, Л.Р. Интеллектуальная поддержка принятия решений в оперативном управлении деловыми процессами предприятия [Текст] / Л.Р.

Черняховская, Н.И. Федорова, Р.И. Низамутдинова // Вестник УГАТУ. –Уфа: Изд-во УГАТУ, 2010. –Вып. 1. –С. 172–176.

4. Федорова, Н.И. Алгоритмическое и программное обеспечение поддержки принятия решений при управлении территориально-распределенными системами [Текст] / Н.И. Федорова, Р.И. Низамутдинова // Сб. тр. I Всерос. конф. с междунар. участием, посв. памяти проф. Ю.С. Кабальнова. –Уфа: Изд-во УГАТУ, 2009. –С. 221–226.

СХЕМНОЕ РЕШЕНИЕ БЛОКА КОМПАРАТОРОВ ДВУХРАЗЯДНОЙ ЯЧЕЙКИ КОНВЕЙЕРНОГО АЦП

Развитие технологий изготовления интегральных схем способствует росту скорости передачи сигналов в измерительных устройствах и телекоммуникационных системах. При этом для уменьшения габаритов и стоимости аппаратных средств рационально изготовление на одном кристалле как аналоговой, так и цифровой частей интегральной схемы – так называемых *система-на-кристалле* (system-on-chip, SoC). Как правило, одна из составных частей таких систем – аналого-цифровой преобразователь (АЦП) [1].

Развитие схемотехники АЦП направлено на повышение быстродействия, снижение потребляемой мощности, уменьшение занимаемой на кристалле площади [2]. Высоким быстродействием обладают параллельные АЦП и преобразователи конвейерной структуры на основе параллельных АЦП. Однако указанные преобразователи имеют среди АЦП наибольшие потребляемую мощность и занимаемую на кристалле площадь. В частности, для обеспечения разрядности выходного цифрового кода n бит в схеме параллельного АЦП необходимо наличие 2^n резисторов в составе резистивного делителя и, как минимум, $2^n - 1$ компаратора. В качестве компараторов обычно используются схемы на основе дифференциальных усилителей. В статье предлагается схемное решение на основе КМОП инверторов для замены резистивного делителя и компараторов, позволяющее снизить потребляемую мощность.

Реализация блока компараторов на основе КМОП инверторов

Схема и передаточная характеристика КМОП инвертора представлены на рис. 1. При заданной технологии изготовления разработчик определяет длину затвора L и ширину затвора W МОП тран-

зисторов [3]. Варьирование этих параметров приводит к изменению напряжения порога переключения $U_{\text{пер}}$ инвертора [2], которое определяется равенством входного и выходного напряжений $U_{\text{пер}} = U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$. Изменение ширины затвора транзистора имеет меньшее влияние на граничную частоту транзистора, чем изменение длины [4]. Вследствие этого при установке $U_{\text{пер}}$ целесообразно изменить ширины затворов транзисторов, а длины затворов зафиксировать минимально возможными. При увеличении ширины затвора p -МОП транзистора W_p напряжение $U_{\text{пер}}$ увеличивается, что соответствует сдвигу передаточной характеристики вправо (рис. 1 б). Напротив, при увеличении ширины затвора n -МОП транзистора W_n напряжение $U_{\text{пер}}$ уменьшается, и передаточная характеристика сдвигается влево (рис. 1 б).

При заданных длинах затворов и параметрах технологии изготовления транзисторов напряжение $U_{\text{пер}}$ для КМОП инвертора определяется как

$$U_{\text{пер}} = \frac{\sqrt{\frac{\mu_p W_p}{\mu_n W_n}} (U_{\text{пит}} - |U_{0p}|) + U_{0n}}{1 + \sqrt{\frac{\mu_p W_p}{\mu_n W_n}}}, \quad (1)$$

где μ_p, μ_n – подвижности дырок и электронов; U_{0p}, U_{0n} – напряжения отпирания p -МОП и n -МОП транзисторов соответственно [2]. Если рассматривать КМОП инвертор как компаратор, то в роли напряжения сравнения, поступающего с узлов резистивного делителя, будет выступать напряжение $U_{\text{пер}}$. Напряжения порогов переключения КМОП инверторов (компараторов) должны отличаться на величину напряжения младшего значащего разряда $U_{\text{МЗР}} = U_{\text{опор}} / 2^n$, где $U_{\text{опор}}$ – напряжение полной шкалы АЦП [5]. Следовательно, для реализации n -разрядного АЦП

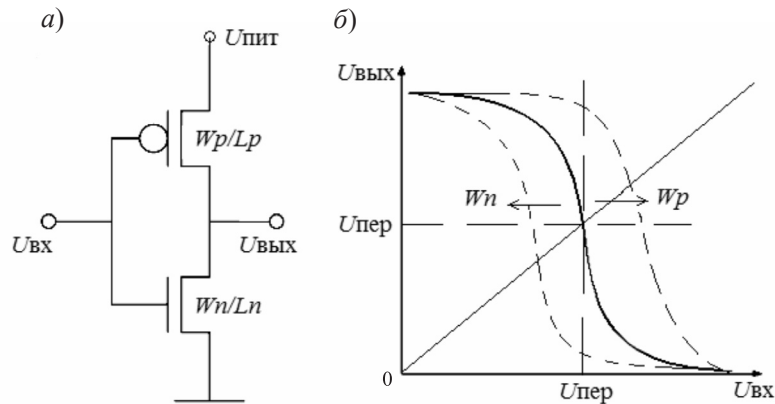


Рис. 1. Схема и передаточная характеристика КМОП инвертора:
а – схема инвертора; б – передаточная характеристика

потребуется $2^n - 1$ инвертор с различными $U_{пер}$. Кроме того, в целях увеличения крутизны передаточной характеристики компаратора на основе инвертора необходимо включение в схему буферных КМОП инверторов.

Такое решение обладает рядом достоинств: простота схемы и топологии на кристалле, отсутствие резистивного делителя и, как следствие, уменьшение занимаемой на кристалле площади и сниженная потребляемая мощность. Недостатками являются зависимость напряжений порогов переключения КМОП инверторов (компараторов) от температуры и разброса параметров транзисторов при изготовлении [2], что приводит к не-

линейности передаточной характеристики АЦП и должно учитываться при разработке схемы преобразователя.

Разрядность одной стадии конвейерного АЦП на основе параллельного преобразователя обычно не превышает 2–3 бит. Для организации одной двухразрядной стадии потребуется три компаратора на основе инвертирующих цепей. Схемное решение блока компараторов показано на рис. 2 а. На рис. 2 б представлена топология кристалла для 180 нм технологии фирмы UMC, габаритные размеры – 65 мкм на 40 мкм. Длина затворов n -МОП и p -МОП транзисторов выбрана равной 400 нм.

На рис. 2 а инверторные цепи на транзисторах

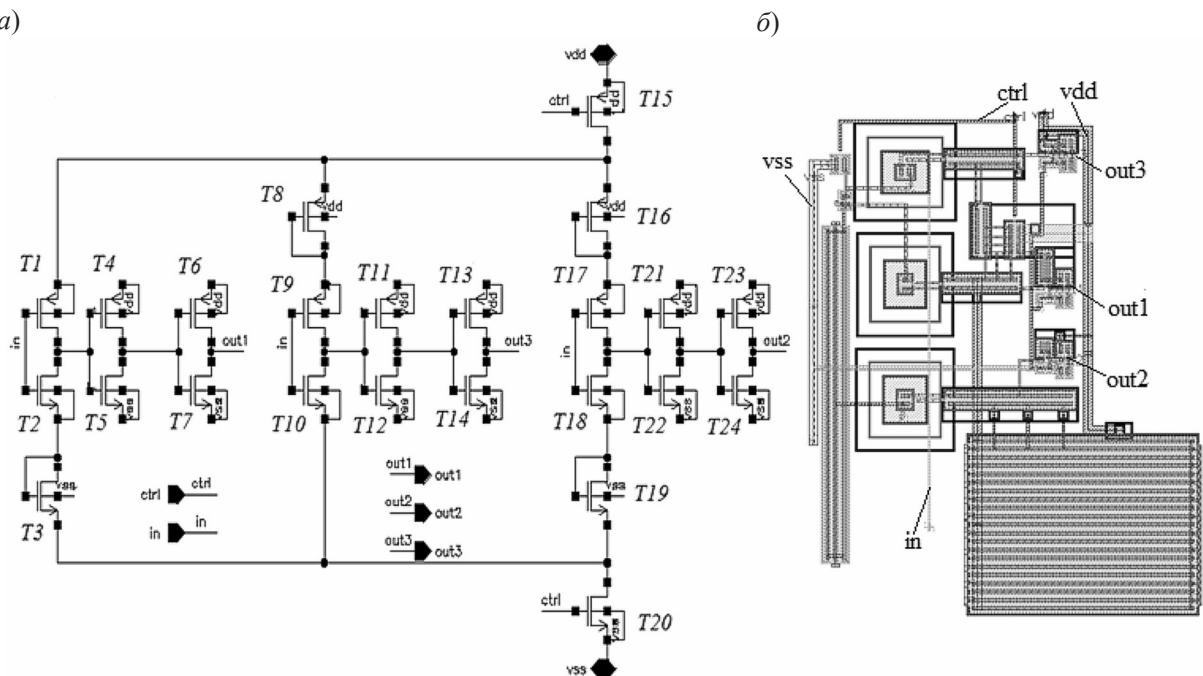


Рис. 2. Схема (а) и топология (б) компараторов

Таблица 1

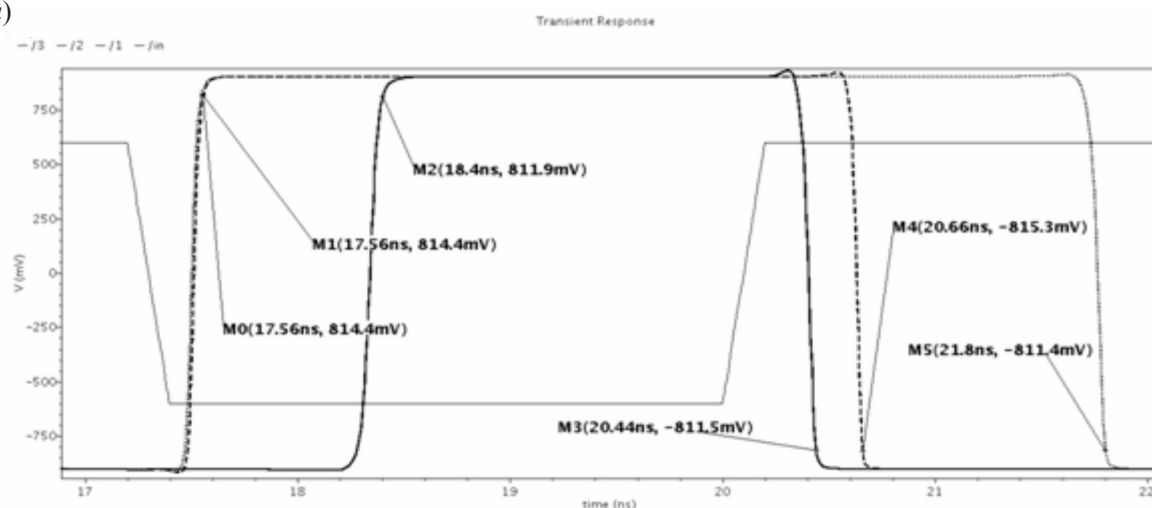
Размеры транзисторов блока компараторов

Транзистор	T1,T9	T2,T10	T3	T4	T5,T22	T6,T7	T8	T11,T12	T13,T14
Ширина, мкм	8,00	0,80	0,82	3,30	0,18	1,00	5,20	0,18	1,00
Транзистор	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T23	T24
Ширина, мкм	3,30	500	14,00	1,00	74,00	1,50	1,30	1,00	1,00

T1,T2; T9,T10; T17,T18 имеют близкие ширины затворов и, следовательно, близкие значения напряжения порога переключения. Значения $U_{пер}$ устанавливаются изменением ширин затворов транзисторов в диодном включении T3, T8, T16, T19. При этом достигается уменьшение зависимости $U_{пер}$ к изменению температуры и параметров транзисторов при изготовлении. Инверторы на транзисторах T4-T7, T11-T14, T21-T24 являются буферными элементами, подложки и истоки

p -МОП транзисторов подключены к положительной шине источника питания (vdd), а подложки и истоки n -МОП транзисторов – к отрицательной шине (vss). Дополнительно как элементы подстройки в схему включены транзисторы T15,T20, варьирование напряжения на затворах которых (шина $ctrl$) приводит к синхронному изменению $U_{пер}$ инверторных цепей на транзисторах T1,T2,T3; T8,T9,T10; T16,T17,T18,T19. Ширины затворов транзисторов схемы приведены в табл. 1.

а)



б)

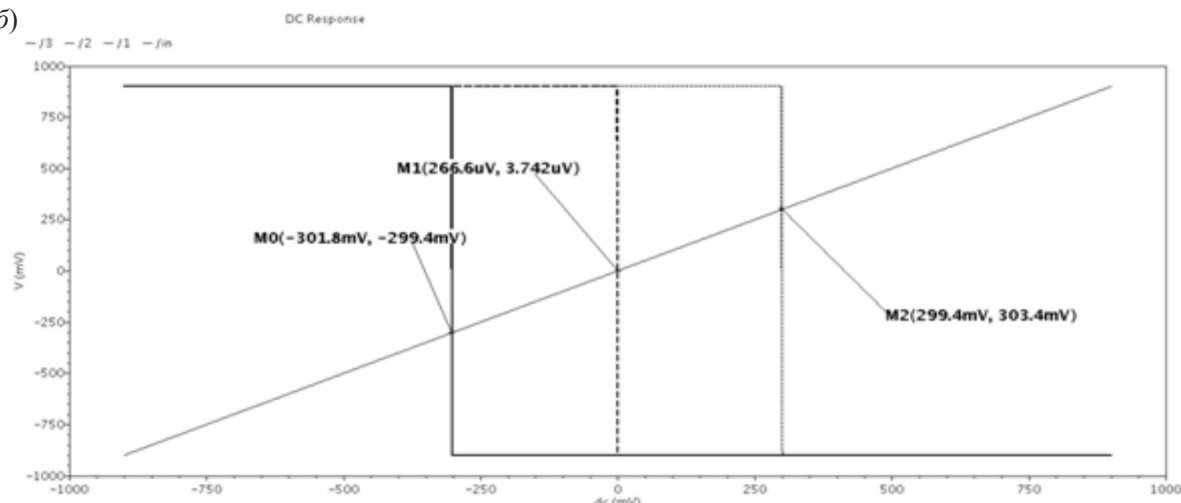


Рис. 3. Результаты моделирования схемы:

а – анализ во временной области; б – анализ по постоянному току

Таблица 2

Результаты моделирования

Параметры	<i>tt</i>	<i>ss</i>	<i>ff</i>	<i>snfp</i>	<i>fnsf</i>
Температура, °C	$U_{\text{пер}}$, мВ	$U_{\text{пер}}$, мВ	$U_{\text{пер}}$, мВ	$U_{\text{пер}}$, мВ	$U_{\text{пер}}$, мВ
+27	–303	–296	–305	–297	–306
	–2	8	–6	11	–13
	297	310	292	297	294
–40	–309	–302	–314	–308	–286
	–3	4	–8	–18	–18
	296	306	303	286	314
+85	–293	–286	–295	–294	–300
	6	15	–1	–1	–2
	304	314	297	295	297

Для указанной технологии используется двуполярное напряжение питания $\pm 0,9$ В. Входное напряжение АЦП изменяется в пределах $\pm 0,6$ В, следовательно, $U_{\text{опор}} = 1,2$ В. При этом для двухразрядного параллельного АЦП величина $U_{\text{МЗР}} = 0,3$ В, и $U_{\text{пор}}$ инвертирующих цепей на транзисторах T1, T2, T3; T8, T9, T10; T16, T17, T18, T19 (рис. 2 а) определяются как 0,3 В; –0,3 В; 0 В соответственно.

Моделирование схемы проводилось в программном пакете *Virtuoso* компании Cadence Design System. На рис. 3 а представлены результаты анализа схемы во временной области. На вход подавался сигнал в виде импульсного напряжения с уровнями $\pm 0,6$ В и временами фронта и спада 200 пс. С учетом паразитных элементов топологии схемы на кристалле время фронта напряжения на выходе схемы компараторов не превышает 1,1 нс, время спада не превышает 1,6 нс. Средняя потребляемая мощность при частоте данного входного сигнала 100 МГц не более 55 мкВт. Результаты моделирования по постоянному току представлены на рис. 3 б. Напряжения порогов переключения инвертирующих цепей соответствуют заданным значениям.

Посредством моделирования оценена зависимость $U_{\text{пер}}$ инвертирующих цепей от температуры и изменения параметров транзисторов при изготовлении. Для температур –40°C, +27°C, +85°C и различных случаев изменения параметров (*tt*, *ss*, *ff*, *snfp*, *fnsf*) результаты представлены в табл. 2. В каждой клетке таблицы приведены значения $U_{\text{пер}}$ для трех инвертирующих цепочек. Отклонение $U_{\text{пер}}$ от номинального в наихудшем случае не превосходит 18 мВ, что составляет 0,06 МЗР (младшего значащего разряда) для двухразрядной ячейки при $U_{\text{опор}} = 1,2$ В.

Предложено схемотехническое решение двухразрядной ячейки конвейерного АЦП, проведено компьютерное моделирование с учетом паразитных элементов топологии схемы. При реализации на основе 180 нм технологии фирмы UMC площадь кристалла двухразрядной ячейки составляет не более 0,0026 мм², потребляемая мощность при частоте входного сигнала 100 МГц не превышает 55 мкВт.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yoo, J. A 1-GSPS CMOS Flash A/D converter for System-on-Chip Applications [Текст] /J. Yoo, K. Choi, A. Tangel // VLSI, 2001. Proc. IEEE Computer Society Workshop. –May 2001.
2. Yoo, J. A TIQ based CMOS flash A/D converter for system-on-chip applications [Электронный ресурс] /J. Yoo // Режим доступа: http://www.cse.psu.edu/~chip/yoo_thesis.pdf
3. Аллен, Ф. Электронные схемы с переключаемыми конденсаторами [Текст] / Ф. Аллен, Э. Санчес-

Синенсио; под ред. И.В. Капустяна. –М.: Радио и связь, 1989. –576 с.

4. Tangel, A. «The CMOS Inverter» as a comparator in ADC designs [Текст] /A. Tangel, K. Choi // Analog Integrated Circuits and Signal Proc. –May 2004. –Vol. 39. –Iss. 2.

5. Gray, N. ABCs of ADCs, Analog-to-Digital Converter Basics [Электронный ресурс] / N. Gray // Режим доступа: http://www.national.com/assets/en/other/ABCs_of_ADCs.pdf

УДК 621.316.98: 22.193

А.Н. Потапенко, Е.А. Канунникова, Т.А. Потапенко

МЕТОД ИНВЕРСИИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ТИПА «ПЛОСКОСТЬ-ПРОВОДНИК»

В технике высоких напряжений встречается необходимость расчета электрических полей (ЭП) для высоковольтных линий электропередач переменного и постоянного токов [1], например, для систем молниезащит [2], для электростатических систем рассеивания тумана и аналогичных задач, которые сводятся к математическому моделированию распределенных систем типа «плоскости–проводники». Применительно для расчета ЭП в задачах, связанных с исследованиями молниеприемников стержневого вида систем молниезащит, используются различные методы, например, позволяющие аппроксимировать стержень (проводник) с помощью вытянутых полуэллипсоидов относительно поверхности земли [3], методы конечных элементов (МКЭ) [4], конечных разностей (МКР) [5] и др. Численные методы позволяют определять ЭП для объектов различной конфигурации с расположенными на них или вблизи молниеприемниками и др. Следует отметить, что МКР в отличие от МКЭ позволяет увеличить точность расчетов для различных типов угловых зон исследуемых объектов [6] с учетом применения алгоритма Брезенхэма, что особенно важно при расчетах напряженности поля для различного типа краевых эффектов.

В последние годы предлагаются новые методы решения подобных задач, относящихся к внешним краевым задачам, т. к. при их численном решении имеются дополнительные сложности, связанные с необходимостью задания граничных условий на бесконечности, а не на введенной внешней границе исследуемой области. Главное требование, предъявляемое к искусственным границам расчетной области, состоит в том, чтобы решение задачи в ограниченной области аппроксимировало решение исходной задачи в неограни-

ченной области. Среди этих методов можно отметить метод инверсии для полубезграничных сред (МИПБС), используемый, например, для исследования особенностей систем молниезащит [7], также принятый за основу и в данной работе.

Постановка задачи

Рассмотрим особенности схемы моделирования, показанной на рис. 1, включающей стержень Γ_4 на плоскости Γ_1 в виде поверхности земли $F(x, y)$ и облако $V(x, y)$ в виде плоскости Γ_6 , находящихся в полубезграничной области относительно поверхности $F(x, y)$. В силу симметрии изучаемого объекта исследуется только часть некоторой области.

ЭП определяется относительно проводящей плоскости Γ_1 со стержнем Γ_4 (их потенциал ψ принимается равным нулю) и с учетом краевого эффекта от плоскости Γ_6 , являющейся частью круга. Считаем, что исследуется статический режим с учетом возникновения в некоторый момент

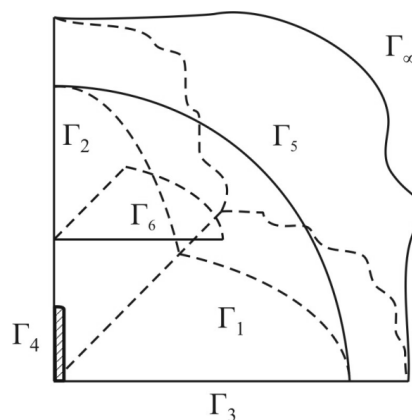


Рис. 1. Схема моделирования молниеприемника стержневого типа

времени на Γ_6 потенциала равного ψ_B . Эта постановка отличается от постановки задачи F. D'Alessandro [4], в которой задается некоторое направление нисходящего стримера в воздухе, как правило, в виде проводника с заданным потенциалом, причем в работе не приводится конкретная математическая постановка задачи, как и в [8]. Исходная постановка также отличается и от постановки задачи М.М. Резинкиной [5], в которой внешняя краевая задача сводится к внутренней путем задания граничных условий в исследуемой области в виде $\partial\psi/\partial n = 0$.

Считаем, что определяемое поле распределения ψ подчиняется уравнению Лапласа как, например, в [7]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0; (x, y, z) \in D(x, y, z). \quad (1)$$

Граничные условия задачи следующие: на границах Γ_1 и Γ_4

$$\psi(x, y, z) = 0, (x, y, z) \in \Gamma_1, \Gamma_4; \quad (2)$$

на границе Γ_∞

$$\psi(\infty) = 0; \quad (3)$$

на поверхностях симметрии области (на границах Γ_2, Γ_3)

$$\partial\psi/\partial n = 0, (x, y, z) \in \Gamma_2, \Gamma_3; \quad (4)$$

на границе Γ_6

$$\psi(x, y, z) = \psi_B, (x, y, z) \in \Gamma_6, \quad (5)$$

где $D(x, y, z)$ – исследуемая область, ограниченная $\Gamma_1 - \Gamma_4, \Gamma_6$ и Γ_∞ ; причем Γ_∞ – условная граница на бесконечности; Γ_5 – внутренняя граница в $D(x, y, z)$ (искусственно введенная граница [7]).

С учетом использования МИПБС считаем, что некоторая выделенная область $D'_m(x, y, z)$, входящая в состав области $D(x, y, z)$, имеет форму части полусферы с радиусом R_0 и с границами $\Gamma_1 - \Gamma_6$ (эта область может быть представлена в виде куба, параллелепипеда и др., определяется

видом области с исследуемым объектом [9]). Для реализации этого метода необходима дополнительная область $D^*_m(x, y, z)$ для того, чтобы часть оставшейся области $D(x, y, z)$ между границами Γ_5 и Γ_∞ отобразилась на эту дополнительную область. Следует отметить, что составные области $D'_m(x, y, z)$ и $D^*_m(x, y, z)$ соприкасаются по внутренней поверхности Γ_5 в исходной области $D(x, y, z)$.

Особенности дискретной математической модели

Для краевой задачи с учетом уравнения (1) и граничных условий (2)–(5) уравнения в операторной форме для определения поля потенциала ψ в узлах (i, j, k) для дискретной области $D_d(x, y, z)$ имеют следующий вид:

$$L_h \psi^{(h)} \equiv \begin{cases} L_{xx} \psi_{ijk} + L_{yy} \psi_{ijk} + L_{zz} \psi_{ijk} = 0, \\ (x_i, y_j, z_k) \in D_d(x, y, z); \\ L_n \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_2, \Gamma_3; \\ \psi_{ijk} = \psi_B, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_6; \\ \psi_{ijk} = 0, (x_i, y_j, z_k) \in \Gamma_1, \Gamma_4, \Gamma_\infty. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $L_{xx} = \partial^2/\partial x^2$, $L_{yy} = \partial^2/\partial y^2$, $L_{zz} = \partial^2/\partial z^2$, $L_n = \partial^2/\partial n^2$ – производные потенциала, которые представляются конечно-разностными аппроксимациями. Область $D_d(x, y, z)$, включающая $D'_m(x, y, z)$ и $D^*_m(x, y, z)$, является дискретной с регулярной прямоугольной сеткой. Для аппроксимации границ применяется алгоритм Брезенхэма. При расчетах не учитывается диаметр стержня, т. к. он пренебрежимо мал по сравнению с размерами $D_d(x, y, z)$ и шагом по x, y и z (аналогично как в [5]).

Так как во внутренних узлах сетки выполняется условие сходимости итерационного метода Гаусса–Зейделя, тогда во всех внутренних узлах области $D_d(x, y, z)$ потенциал $\psi_{i,j,k}$ рассчитывается с помощью численного метода, например, экстраполяционного метода Либмана [10] по формулам:

$$\psi_{i,j,k} = \frac{\psi_{i+1,j,k} + \psi_{i-1,j,k} + \psi_{i,j+1,k} + \psi_{i,j-1,k} + \psi_{i,j,k+1} + \psi_{i,j,k-1}}{6}, \quad (7)$$

$$\psi_{i,j,k}^S = \psi_{i,j,k}^{S-1} + \alpha(\psi_{i,j,k}^{S0} - \psi_{i,j,k}^{S-1}), \quad (8)$$

где α – ускоряющий коэффициент ($1 \leq \alpha \leq 2$); $\psi_{i,j,k}^{S-1}$ – значение в узле $\psi_{i,j,k}^{S-1}$ вычисленное на предыдущей итерации; $\psi_{i,j,k}^{S0}$ – значение в узле $\psi_{i,j,k}^{S0}$ вычисленное в текущей итерации согласно (8); $\psi_{i,j,k}^S$ – новое значение.

На границах Γ_2, Γ_3 потенциал $\psi_{i,j,k}$ рассчитывается с учетом конечно-разностных аппроксимаций и вида условия симметрии (4). Модуль E определяется с учетом E_i как корень квадратный из суммы E_x^2, E_y^2, E_z^2 .

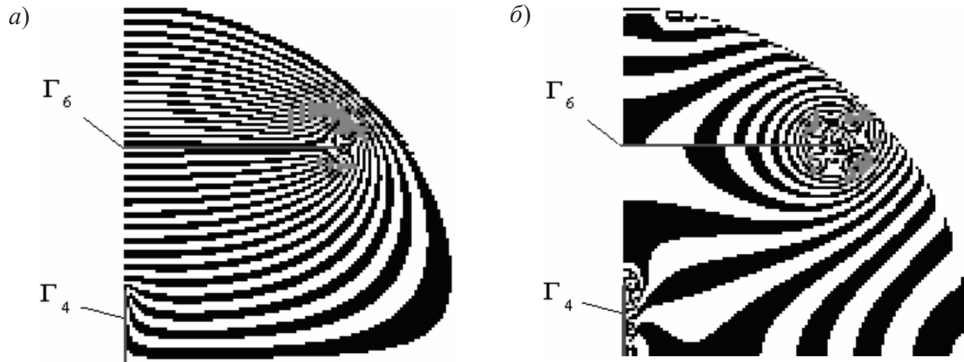


Рис. 2. Распределение эквипотенциальных поверхностей ЭП с шагом $\Delta\psi^*$ (а) и поверхностей равных напряженностей поля с шагом ΔE^* (б)

Согласно МИПБС граничные узлы $\psi_{ij,k}$ на границе Γ_5 превращаются во внутренние узлы составной области $D'_{md}(x, y, z)$ и $D^*_{md}(x, y, z)$, причем в узлах на границе области $D'_{md}(x, y, z)$ расчет также ведется по формулам (7) и (8), а значения потенциалов в недостающих узлах берутся из дополнительной области $D^*_{md}(x, y, z)$, и наоборот.

Результаты численных расчетов

Результаты расчетов представляются в безразмерном виде для ψ и расстояний l как $\psi_{bi}^* = \psi_i / \psi_B$, $l_i^* = l_i / h$ с учетом базовых значений потенциала ψ_B на Γ_6 и высоты h стержня Γ_4 , а остальные определяются аналогично или через ψ_{bi}^* и l_i^* . Для сравнения результатов с известными данными основные соотношения размеров приняты как в [5].

Исследуется модель по схеме на рис. 1 для двух вариантов. В первом варианте считаем, что граница Γ_6 имеет радиус $r_1^* = 3$ и находится на высоте $H_k^* = 3$, а высота Γ_4 равна $h^* = 1$. Результаты расчетов поля потенциала ψ_b^* и напряженности

поля E^* относительно $F(x, y)$ и $V(x, y)$ показаны на рис. 2.

Из анализа результатов распределения эквипотенциальных поверхностей ЭП и поверхностей равных напряженностей поля следует, что на стержне Γ_4 и в окрестностях края границы Γ_6 наблюдается существенно неоднородное ЭП. Для оценки этих относительных величин рассмотрим результаты расчетов, показанные на рис. 3, причем кривые 1, 2 и 3 – это различные характеристики $\psi_b^* = f(H_L^*)$ (рис. 3 а) и $E^* = f(H_L^*)$ (рис. 3 б), представляющие зависимости в вертикальных плоскостях относительно поверхности $F(x, y)$: по оси ($S_{k0} = 0$) и на расстоянии $S_{k1}^* = 3$, а также в промежуточной точке от оси $S_{k2}^* = 2^*$.

Из анализа зависимостей $E^* = f(H_L^*)$ (см. рис. 3 б, кривые 1 и 2) следует, что максимальные концентрации напряженности поля как по оси заземленного стержня Γ_4 , так и у края облака $V(x, y)$ достигают величин порядка $E_m^* \approx 30$. На расстоянии $S_{k2}^* = 2^*$ зависимость $E^* = f(H_L^*)$ имеет вид

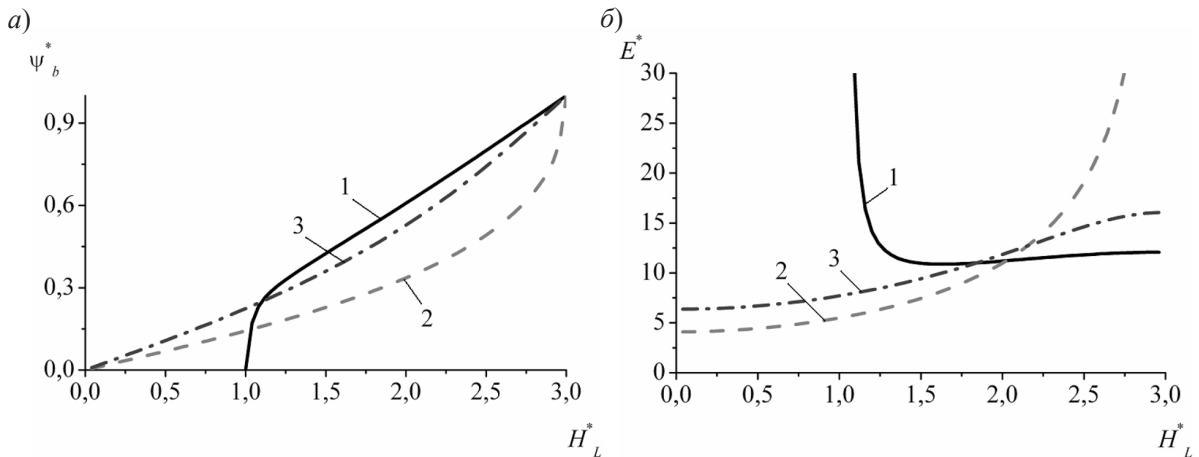


Рис. 3. Характеристики $\psi_b^* = f(H_L^*)$ (а) и $E^* = f(H_L^*)$ (б) для различных S_k
1 – по оси схемы ($S_{k0} = 0$); 2 – $S_{k1}^* = 3$; 3 – $S_{k2}^* = 2$

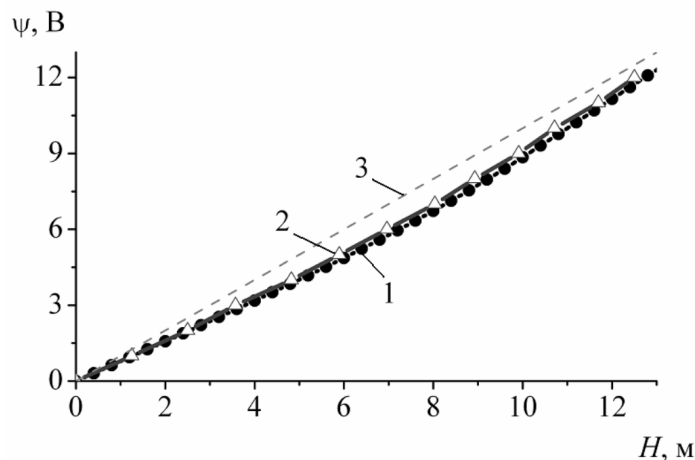


Рис. 4. Характеристика $\psi = f(H)$
1 – расчет МИПБС; 2 – данные [5]; 3 – распределение ψ при заданном E_0

S-образной характеристики и указывает на рост напряженности поля к краю $V(x, y)$. Максимальный градиент изменения E^* по вертикали на расстоянии $S_{k1}^* = 3$ существенно меньше, чем в ближней зоне по оси стержня. Анализ характеристик 2 и 3 (см. рис. 3 б) показывает, что на уровне $h^* = 1$ стержня в них отсутствуют изменения, связанные с краевым эффектом от его торца. Изменения проявляются, например, при $h = 10$ м, но на расстоянии около $1/3 h$ от торца стержня и составляют порядка 25 % от величины E_0 однородного поля [7]. Это указывает на то, что краевой эффект от торца стержня весьма локализован. Однако краевой эффект от облака вносит существенные изменения в ЭП исследуемой системы.

Установлено, что E^* по поверхности $V(x, y)$ от оси до края облака относительно $F(x, y)$ увеличивается от $E_k^* \approx 12$ до E_m^* , т. е. в 2,5 раза. При этом градиент изменения E^* существенно нарастает к краю облака $V(x, y)$. Если на расстоянии $2/3$ от оси $\Delta E^*/\Delta l^*$ составляет величину порядка двух, то на оставшейся части $V(x, y)$ эта величина увеличивается приблизительно в 7 раз. Аналогично вдоль поверхности $V(x, y)$ также изменяется и плотность свободного электрического заряда, т. к. она пропорциональна E^* и достигает максимума на краю облака. С учетом подхода [4] следует, что для соотношений размеров исследуемой системы «плоскость–проводник» возможность появления нисходящего стримера будет определяться окрестностью края облака в случае появления грозовой активности и соответственно введением в расчеты, например, $E_0 = 10$ кВ/м.

Для второго варианта исходной задачи с помощью МИПБС выполнены расчеты с учетом известных данных [5], т. е. граница Γ_6 находится на высоте $H = 3l$ и ее радиус равен $10l$, а l – это высота стержня. Результаты расчетов по этому варианту представлены на рис. 4.

Сравнение результатов расчета проводилось в вертикальной плоскости на расстоянии $S_1 = 3,2$ м и до высоты $H_1 = 13$ м по распределению поля ψ [5]. На рис. 4 также представлена дополнительная характеристика 3, учитывающая однородное поле $E_0 = 1$ В/м, позволяющая оценить отличия расчетных характеристик, возникающих при учете заземленного стержня Γ_4 . Сравнительный анализ показал, что отличия в расчетах в целом составляют менее 0,5 %.

Установлено, что применяемый метод инверсии для полубезграничных сред позволяет численно исследовать на моделях элементы систем молниезащит с возможностью учета различных краевых эффектов, например, границ облака. Если в подходе [5] имеется существенное ограничение по приведению внешней краевой задачи к внутренней, то МИПБС позволяет непосредственно решать внешние краевые задачи. В отличие от методов расчета ЭП, основанных на применении интегральных зависимостей на базе известных аналитических решений для потенциала ψ проводника, например, как в [5], в этом случае МИПБС обладает существенным преимуществом, т. к. позволяет учитывать возможные изменения соотношений размеров, особенности



расположения стержней, причем с находящимися на них устройствами как в конструкциях ESE-молниеотводов (Early Streamer Emission – ранняя стримерная эмиссия) и т. д.

Следует отметить, что для исследуемой задачи показана особенность выявления как области, из которой возможно появление нис-

ходящего стримера, так и вероятности определения возможной точки восходящего стримера на основе численных расчетов ЭП и с учетом подхода [4]. Полученные выводы определяются соотношениями размеров исследуемой системы и соответствующими допущениями при их расчетах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yang, Y.** The strip simulation method for computing electric field on conductor surfaces [Текст] / Y. Yang, D. Dallaire, J. Ma [et al.] // Proc. of the 3 IASTED International Conf. on Power and Energy Systems. –Spain, Sept. 3-5 2003. –P. 353–357.
2. **Базелян, Э.М.** Физика молнии и молниезащиты [Текст] / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. –М.: Физматлит, 2001. –320 с.
3. **Aleksić, S.R.** Determination of critical atmospheric electric field around Franklin’s lightning protection rod that leads to break-down [Текст] / S.R. Aleksić, S.S. Ilić // Acta Electrotechnica et Informatica. –2007. –№ 2. –Vol. 7. –P. 3–9.
4. **D’Alessandro, F.** Electric field modelling of structures under thunderstorm conditions [Текст] / F. D’Alessandro, J.R. Gumley // Proc. of ICLP’1998. –Birmingham, Britain, 1998. –P. 457–462.
5. **Резинкина, М.М.** Расчет трехмерных электрических полей в системах, содержащих тонкие проволоки [Текст] / М.М. Резинкина // Электричество. –2005. –№ 1. –С. 44–49.
6. **Потапенко, А.Н.** Математическое моделиро-
- вание поля давлений в многоэлектродных разрядных блоках [Текст] / А.Н. Потапенко, М.И. Дыльков, А.И. Штифанов // Изв. высших учебных заведений. Проблемы энергетики. –2003. –№ 9-10. –С. 120–124.
7. **Потапенко, А.Н.** Численное моделирование электрических полей в системах «электрод–поверхность земли» для элементов молниезащит [Текст] / А.Н. Потапенко, Е.А. Канунникова, М.И. Дыльков // Изв. высших учебных заведений. Проблемы энергетики. –2008. –№ 11-12. –С. 72–78.
8. **D’Alessandro, F.** A ‘Collection Volume Method’ for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning [Текст] / F. D’Alessandro, J.R. Gumley // J. of Electrostatics. –2001. –№ 50. –P. 279–302.
9. **Потапенко, А.Н.** Исследование распределенных элементов систем молниезащит на основе вычислительных экспериментов [Текст] / А.Н. Потапенко, А.И. Штифанов, Т.А. Потапенко // Изв. Самарского научно-го центра РАН. –2010. –Т12. –№ 4 (3). –С. 591–595.
10. **Мак–Кракен, Д.** Численные методы и программирование на Фортране [Текст] / Д. Мак–Кракен, У. Дорн. – М.: Мир, 1977. – 584 с.

УДК 519.876.5

Ю.В. Тименков, Д.В. Тименкова, Е.П. Антышев

МОДЕЛЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ДЛЯ ВЗАИМОЗАВИСИМЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ИСТОРИИ ОБРАЩЕНИЙ

Согласно исследованиям Datamonitor Group [1], объем рынка предоставляемых услуг в области ИТ составил в 2009 г. более 2 млрд долл. USA. Действительно, многим компаниям удобнее заказывать сервисы по разработке и поддержке программ на стороне, чем держать в своем штате программистов или системных администраторов. При этом современные компьютеры настолько производительны, что большую часть времени простаивают или работают не на полную мощность. Поэтому такие технологии, как

виртуализация, позволяют поставщикам услуг оптимально использовать время, безопасно исполняя на одной машине приложения нескольких клиентов.

Фирмы, предоставляющие такие сервисы, как аутсорсинг ИТ-услуг или облачные вычисления, подвергаются большому риску: ведь если случится сбой в центре обработки данных, то пострадает не один клиент, что может грозить многомиллионными убытками. Поэтому очень важно уметь управлять подобными рисками.

Для оптимизации использования оборудования применяются такие сервисные операции, как резервное копирование или миграция приложений с одного компьютера на другой. Но все они требуют системных ресурсов и могут существенно повлиять на работу программ. Поэтому провайдеры вынуждены постоянно искать компромисс между заявленным уровнем предоставляемых услуг (доступность для приложения процессора, диска, сети и т. д.) и накладными расходами на его поддержание.

Данная статья является продолжением [2], показывает дополнительные способы использования описанной там математической модели. В самом деле, сейчас сложно представить бизнес-приложение, которое исполняется в изоляции. Почти все подобные программы взаимодействуют друг с другом, с серверами баз данных, веб-серверами и т. д. Это создает дополнительные трудности для прогнозирования их работы, ведь в таком случае на скорость исполнения процесса влияет не только количество ресурсов, выделенных ему системой, но и то, насколько быстро работают приложения, от которых он зависит. В статье изучается один из методов моделирования подобных ситуаций.

1. Модель исполнения процесса

Для начала опишем исполнение процессов, которые не взаимодействуют, но являются конкурентами за системные ресурсы.

Сразу отметим, что данная модель рассматривает наблюдаемое снаружи потребление ресурсов программой во время ее исполнения, причем порядок исполнения инструкций известен заранее. Таким образом, нам не важна внутренняя структура приложения: его условные переходы, циклы и т. д. Рассмотрим программу развернуто как линейную последовательность инструкций, обработанных процессором.

Исполнение программы можно разбить на несколько участков или стадий исполнения. Они могут быть как логическими (получение запроса, его обработка и т. д.), так и физическими (исполнение команды процессора). Для завершения каждой стадии необходимо потребить некоторое количество компьютерных ресурсов, предоставляемых операционной системой. К ним относятся процессор, жесткий диск (при чтении/записи информации), сеть (для передачи данных) и др.

Рассмотрим исполнение программы на некоторой системе в отсутствие других потребителей ресурсов, т. е. когда ей полностью доступны все ресурсы компьютера. Назовем эту систему *эталонной*, а такой вариант исполнения – *монопольным* или *эксклюзивным*. В этом случае приложение переходит от одной стадии исполнения к другой с постоянной скоростью:

$$u = \frac{dx}{dt}. \quad (1)$$

Наиболее удобно определить стадию dx как монопольное исполнение процесса на эталонной системе в течение фиксированного промежутка времени. С одной стороны, это время должно быть мало, чтобы можно было проследить изменения в потребностях ресурсов на разных стадиях. С другой стороны, оно должно быть достаточным большим, чтобы сгладить дискретность работы планировщика. Для моделирования современных систем на основе Windows и Linux подходит величина в 100 мс, это составляет несколько квантов планировщика процессора.

Для исполнения каждой стадии процессу необходимо потребить некоторый набор ресурсов $\vec{D} = \{D_i\}$. Это может быть количество байт, считанных или записанных на диск, тактов (секунд) исполнения на процессоре и т. д.

Обозначим вектор доступных ресурсов при монопольном исполнении как

$$\vec{L} = \{L_i\}. \quad (2)$$

Эта величина характеризует производительность компьютера (мощность процессора, скорость чтения с диска и т. д.) и может меняться от одной системы к другой.

Пусть процесс в данный момент может получить от системы некоторый набор $\vec{R} \neq \vec{D}$. Это может быть связано с тем, что процесс испытывает конкуренцию за ресурсы, либо исполняется на другой конфигурации компьютера. Введем понятие *коэффициента недостаточности ресурса* или *коэффициент голодания*:

$$\gamma_i = \frac{R_i}{D_i}. \quad (3)$$

Данная величина показывает насколько больше или меньше ресурсов доступно для программы по сравнению с ее монопольным исполнением.

Очевидно, что для исполнения процессу нужны ресурсы именно в той пропорции, в которой они присутствуют в $\vec{D}$. Поэтому скорость исполнения будет ограничена наиболее недостаточным



ресурсом, а потребление остальных уменьшится пропорционально наименьшему коэффициенту голодания:

$$\gamma = \min \gamma_i. \quad (4)$$

При этом результирующие скорость и уровни потребления будут:

$$u' = \gamma u, \quad (5)$$

$$\bar{R}' = \gamma \bar{D}. \quad (6)$$

2. Модель распределения компьютерных ресурсов

Опишем теперь способ распределения системной ресурсов между различными потребителями. Как и ранее, рассмотрим наблюдаемый снаружи результат, а не низкоуровневые процессы, протекающие внутри планировщиков. Последних существует большое множество, причем для разных типов ресурсов могут использоваться совершенно разные стратегии [3].

Такой подход позволяет описать функцию, показывающую распределение сразу всех типов ресурсов (потребление которых взаимосвязано). Например, при попытке выполнить операцию чтения с диска программа «отпускает» процессор, и если диск ей не выделили, будет наблюдаться снижение потребления процессора. Обратное тоже верно – если программе не дали процессорное время, она не сможет выполнить запрос к диску, несмотря на то, что последний может быть вполне доступен.

Хотя планировщики очень разные внутри, и каждый обладает своими особенностями и характеристиками, на макроуровне они всего лишь распределяют ресурсы между исполнителями, согласно приоритетам. Основное отличие заключается в обработке критических случаев, или в общей скорости работы (например, исследование дисковых планировщиков Linux проведено в [4]). В рассматриваемой модели этими эффектами можно либо пренебречь, либо они неявно входят в определение доступных лимитов $\bar{L}$.

Путь в системе исполняются N процессов, каждый из которых имеет вес или приоритет W_j (хотя, в общем случае, приоритет может задаваться для каждого типа ресурса). Тогда планировщик готов каждому выделить долю ресурсов, равную

$$\bar{R}_j = \bar{L} \frac{W_j}{\sum_{k=0}^N W_k}. \quad (7)$$

Как было указано выше, процесс может потреблять не все что ему предоставили. С другой стороны, если один процесс не может потребить ресурс, он предоставляется другому – в реальных системах процессор загружен не на 100 % только в том случае, если он никому не требуется. Опишем следующим алгоритмом результат распределения ресурсов планировщиком с учетом возможностей всех потребителей.

- Из уравнения (7) вычисляем векторы доступных ресурсов $\bar{R}_j$, где $j \in 1 \dots N$ – номер потребителя.

- Для каждого потребителя считаем коэффициент недостаточности по всем ресурсам и находим среди них минимальный:

$$\gamma_j = \min_i \frac{R_j^i}{D_j^i}. \quad (8)$$

Важно отметить, что из рассмотрения исключаются ресурсы, которые не требуются процессу в данный момент (т. е. такие, для которых $D_j^i = 0$).

- Процесс с наименьшим коэффициентом исключается из дальнейшего рассмотрения:

$$j_{\min} = \operatorname{argmin}_k \gamma_k. \quad (9)$$

При этом

по уравнению вычисляем реальное количество ресурсов $\bar{R}'_{j_{\min}}$, которые он потребит;

уменьшаем мощность системы $\bar{L}$ на данную величину, т. к. эти ресурсы уже не доступны для потребления:

$$\bar{L} = \bar{L} - \bar{R}'_{j_{\min}}. \quad (10)$$

- Для оставшихся процессов проделываем эти же операции.

Таким образом, для всех процессов получены коэффициенты γ_j , показывающие, насколько в данных условиях процесс будет исполняться медленнее (или быстрее, в зависимости от соотношения $\bar{L}$ на текущей и эталонной системах). Теперь, используя уравнение (5), запишем уравнение исполнения процесса:

$$x_j = \int u'_j dt = \int \gamma_j u_j dt. \quad (11)$$

3. Типы взаимодействий

Большинство взаимодействий сводится к обмену какой-либо информацией. Это может быть ожидание какого-то сигнала или действия. Бывает так, что процессы (или потоки) разделяют какой-то общий ресурс, к которому оба имеют доступ. В

этом случае исполнение программы блокируется, если доступ занят другим приложением.

Весьма распространен вариант, когда один процесс является поставщиком данных для другого (который, в свою очередь, может также являться поставщиком для третьего и т. д.): например, веб-сервер, потребляющий данные от CGI-скрипта, сам является поставщиком для клиента, а CGI-скрипт может обращаться к серверу баз данных.

При этом общая производительность (к примеру, время, через которое клиент сможет получить страницу) сильно зависит от того, насколько система эффективно распределяет ресурсы. В этом и заключается основная сложность при управлении подобными процессами – результаты могут быть самыми разными. Так, если не дать процессор (например, если в это время появился процесс с более высоким приоритетом) CGI-скрипту в тот момент, когда он делает запрос к удаленной базе данных, то это никак не повлияет на его работу. Но если это произойдет когда он формирует страничку с ответом, то общая скорость обработки формирования отчета может упасть в разы.

Процессы по способу взаимодействия можно разделить на три группы.

Несвязанные. Одно приложение никак не зависит от другого и обмен информацией между ними не происходит. В таком случае, если остановить один процесс, другой будет продолжать работать.

Последовательные. Один процесс ждет завершения другого. Обмен информацией здесь односторонний: один процесс ждет сигнала к продолжению работы. Типичный пример – запуск программ из командного файла. Сюда же можно отнести и веб-сервер, передавший обработку запроса CGI-скрипту и ждущий его завершения.

Связанные. В этом случае возможность одного приложения исполняться непосредственно влияет на работу другого. Если любой из процессов останавливается или недополучает ресурсов, второй также замедляет свою работу. То есть благодаря двустороннему обмену информацией скорости исполнения процессов должны быть согласованы. Данный способ взаимодействия характерен для схемы producer-consumer. Примером является потоковая обработка файлов в командной строке Unix [5].

4. Моделирование зависимостей

Рассмотрим более подробно аспекты, возникающие при описании взаимодействия каждого из типов, на примере модели, представленной ранее и в [2].

Невзаимодействующие процессы являются только конкурентами за системные ресурсы, поэтому кинематическая модель к ним применима напрямую, без каких-либо модификаций.

Случай, когда одно приложение ожидает завершения второго, можно описать другими словами: одновременно может исполняться только один процесс. При такой формулировке становится очевидным, что подобные процессы можно рассматривать как один. То есть запуск второго приложения можно рассматривать как блокирующий вызов функции (в большинстве систем это так и есть).

Для моделирования тесно связанных процессов необходим более тонкий подход. Основным критерий выбора математического описания взаимодействия – согласованность скоростей процессов. В частности, модель должна удовлетворять следующим условиям:

при недостатке ресурсов у любого из процессов второй также должен замедляться, вплоть до полной остановки;

при наличии свободных ресурсов процессы должны иметь возможность исполняться со скоростью большей оригинальной (например, при моделировании более мощной системы).

При этом, для модели поставщик–потребитель допускается некоторая задержка в синхронизации скоростей. Это становится очевидным, если вспомнить природу явления. При таком обмене данными между поставщиком и потребителем существует некоторое количество буферов, позволяющих процессам выполняться более эффективно. Обычно это области памяти в ядре операционной системы, но могут быть и явно реализованные в программах (в [6] рассматриваются примеры обоих случаев).

Достаточно близка и аналогия с конвейерными вычислениями, когда результат одной стадии поставляется на вход другой. Но хотя одна порция данных может обрабатываться строго последовательно, разные стадии обслуживаются независимо.

5. Формализация модели

Рассмотрим два процесса, один из которых



поставляет какие-то данные второму. Назовем первый процесс *производителем* и в дальнейшем будем использовать для него индекс P . Второй, соответственно, *потребителем* и обозначим его индексом C .

Введем специальный вид ресурса, отвечающий за взаимодействие этих процессов. Назовем его *обменным ресурсом*. Конкретная интерпретация зависит от моделируемой задачи. Это может быть количество байт, переданных от поставщика к потребителю, количество запросов и т. д. Важно только, чтобы все потребленные ресурсы (включая обменные) можно было измерить или оценить, и они соответствовали друг другу.

Пусть в результате работы производителя в течение времени dt образовалось количество ресурса, равное R_p . За то же самое время потребитель из них использует R_c . Тогда к следующему моменту времени будет накоплено $R_p - R_c$ ресурса. Если эта величина положительная, то у потребителя будет преимущество, т. к. у него появится больше свободного ресурса для работы. Производитель, наоборот, должен будет замедлить свою работу.

Понятно, что в реальной жизни эта разность не может быть отрицательной, т. к. нельзя потреблять то, чего нет. Но для моделирования подобная ситуация вполне допустима. Это означает, что недостаток произведенного ресурса будет скомпенсирован в следующий момент времени соответствующим изменением скоростей потребителя и производителя.

Таким образом, критерий согласованности скоростей в каждый момент времени можно выразить с помощью следующей целевой функции:

$$|R_p - R_c| \rightarrow 0. \quad (12)$$

Другими словами, чем больше у нас избыток ресурса, тем сильнее модель должна компенсировать скорости исполнения.

Опишем влияние разности в уровне потребления и производства обменного ресурса на скорости работы программ. Пусть в предыдущий момент времени было фактически произведено R_p^{n-1} ресурса и потреблено R_c^{n-1} соответственно (считаем уровни в начальный момент нулевыми). Таким образом, в результате баланс уровней производства и потребления в текущий момент времени будет:

$$L^n = R_p^{n-1} - R_c^{n-1}. \quad (13)$$

Как покажем далее, данная величина будет динамическим аналогом мощности источника для обычных (системных) ресурсов. То есть она определяет доступный лимит в данный момент времени, но при этом зависит от состояния и истории исполнения.

Обозначим заявленные уровни потребления и производства в текущий момент времени как D_c^n и D_p^n соответственно. При условии, что процессы получают достаточное количество ресурсов, образуется разность ресурса

$$L' = L^n + D_p^n dt - D_c^n dt, \quad (14)$$

которую будет пытаться скомпенсировать планировщик. Данное уравнение является аналогом уравнений непрерывности в физике. Для удовлетворения критерия согласованности необходимо замедлить приложение, в сторону которого смещен баланс, и ускорить другой.

Исходя из физики явления предлагаем оценивать коэффициент недостаточности для обменных ресурсов по следующим формулам:

$$\gamma_p = \begin{cases} 1 - \frac{L'}{L^{\max}}, & L' \leq L^{\max}, \\ 0 & L' > L^{\max} \end{cases}, \quad (15)$$

для производителя и

$$\gamma_c = \begin{cases} \frac{L'}{L^{\max}} + 1, & L' \geq -L^{\max}, \\ 0 & L' < -L^{\max} \end{cases}, \quad (16)$$

для потребителя.

Здесь $L^{\max}$ – нормировочный множитель, определяющий степень толерантности к дисбалансу ресурсов. Его физический смысл – размер буфера между процессами, выраженный в тех же единицах, что и обменный ресурс.

Полученные значения участвуют в определении ограничивающего ресурса наравне с системными в алгоритме из раздела 2. После того, как определены коэффициенты недостаточности для каждого процесса, вычисляются реальные значения потребленных и произведенных данных $R_p = \gamma_p D_p^n dt$, $R_c = \gamma_c D_c^n dt$, которые используются в следующий момент времени для определения баланса уровней потребления.

Нетрудно представить, что предлагаемая математическая модель хорошо удовлетворяет описанным выше условиям согласованности скоростей. К примеру, если случилась такая ситуация, что один процесс недополучил системных ресурсов, а второму, наоборот, дали их в избытке, то мо-

дель отреагирует на это при расчете следующего момента времени. Причем, если дисбаланс будет существенный, то процесс просто остановится. В результате таких отложенных компенсаций могут возникать колебания, которые и наблюдаются в численном эксперименте.

Этот подход можно применять для моделирования взаимной блокировки приложений, если потребуется описание доступа к некоторому ресурсу или моделирование ожидания одного приложения другим. Для этого всего лишь необходимо принять $L^{\max} = 0$ и разрешать неопределенность $\frac{L'}{L^{\max}}$ как 0. Таким образом, процессы будут продолжать исполнение только в том случае, когда они оба дошли до определенной стадии исполнения.

6. Вычислительный алгоритм

Суть численного решения заключается в нахождении зависимости уровней ресурсов, выделенных каждому процессу, от времени. Для определения потребностей приложения необходимо вычислять интеграл. Он же определяет и время завершения процесса.

Единицы измерения. Для описания алгоритма вычисления необходимо прежде всего разобраться с размерностями величин, входящих в уравнения, и со способом получения входных данных.

Как было сказано в разделе 1, скорость исполнения приложения на эталонной системе постоянна, поэтому удобно ее взять тождественно равной единице. Таким образом, для определения $\bar{D}(x)$ необходимо знать, как система выделяла процессу ресурсы при монопольном исполнении $\bar{R}(t)$ и времени работы X . Тогда функция потребности ресурсов определяется как

$$\bar{D}(x) = \begin{cases} \bar{R}(x)|_{t=x}, & x \in [0, X], \\ 0, & x \notin [0, X]. \end{cases} \quad (17)$$

Для уровней ресурсов и их предельных мощностей удобнее всего выбрать размерность скорости потребления, например такты/с, Мб/с и т. д. При таком подходе будет корректно предположение о том, что если стадия может не завершиться за шаг интегрирования, то потребление будет уменьшено пропорционально невыполненной части. Другими словами, будет выполняться аналог закона сохранения для потребленного ресурса:

$$\int_0^{\infty} \bar{R}'(t) dt = \text{const}, \quad (18)$$

независимо от скорости исполнения процесса $u(t)$.

Для обменного ресурса ситуация несколько иная: потребность $\bar{D}$, как и для системных ресурсов, имеет размерность скорости. А вот предел потребления L' и $L^{\max}$ должен быть выражен в абсолютных единицах (байты и т. д.), т. к. в уравнении уже заложен множитель с размерностью времени.

Все дело в том, что системные ресурсы являются возобновляемыми. То есть в любой момент времени t система готова предоставить приложениям процессор или диск со своей максимальной производительностью, вне зависимости от того, сколько было использовано в предыдущий момент времени. Обменный ресурс, напротив, зависит от того, сколько его было использовано до этого.

Таким образом, для вычисления потребления ресурсов исполняющимися одновременно процессами, необходимо знать:

- $\bar{D}(x_n)$ – функции потребности в ресурсах, заданные таблично. Измеряются в ед/с с помощью системных утилит типа perfmon (или из файловой системы /proc на Unix). Зависимость снимается для каждого приложения в отдельности, при этом необходимо полагать $x = t$;

- $\bar{L}$ – мощность источника ресурсов. Измеряется в тех же единицах, что и $\bar{D}(x)$, с помощью специальных утилит, тестирующих производительность. Либо можно воспользоваться результатами предыдущего пункта и оценить $\bar{L}$ как

$$\bar{L} = \max_{\bar{D}, x} \bar{D}(x), \quad (19)$$

причем максимум берется для каждой компоненты независимо.

Численный метод. Зная, как получить исходные функции, можно приступить непосредственно к вычислению уровней потребления (6).

Подставим все функции для j -го процесса в уравнение (6):

$$\bar{R}_j(t) = \gamma_j(t) \bar{D}_j(x_j(t)) = \gamma_j(\bar{D}_1(x_1(t)), \dots, \bar{D}_N(x_N(t))) \bar{D}_j(x_j(t)). \quad (20)$$

Функции $x_1(t), \dots, x_N(t)$ являются интегралами с переменным верхним пределом.

Получается кольцевая зависимость: для вычисления x необходимо знание γ , но при этом, чтобы ее рассчитать требуются потребности в ресурсах, зависящих от текущего прогресса исполнения. Для разрешения этой проблемы пред-

лагается следующий метод, основанный на вычислении интеграла с переменным верхним пределом, описанным в [7]. В нем предлагается выполнять интегрирование один раз и при этом заносить промежуточные данные в таблицу.

Для аппроксимации функций $\bar{D}(x)$ используем ступенчатую интерполяцию:

$$\bar{D}(x) = \bar{D}(x_i), i: x \in [x_i, x_{i+1}). \quad (21)$$

Тогда область интегрирования можно так разбить на участки, что на каждом из них функции потребления для всех процессов постоянны. В этом случае вычисление продвижения для каждого процесса не составляет никакой сложности и считается алгебраически:

$$x_j^{n+1} = x_j^n + \gamma_j^n(x_1^n, \dots, x_N^n)(t^{n+1} - t^n), \quad (22)$$

где $(t^{n+1} - t^n)$ – интервал, на котором функции потребления постоянны.

Пусть мы находимся в точке t^n , при этом известны текущие состояния процессов $\{x_1^n, \dots, x_N^n\}$. Тогда, зная уровни потребления $\bar{D}_1(x_1^n), \dots, \bar{D}_N(x_N^n)$, можно вычислить для каждого процесса коэффициент недостаточности ресурсов γ_j^n по алгоритму из раздела 2. Так как γ зависит только от $\bar{D}$, то функции $\gamma(t)$ также будут ступенчатыми, благодаря выбранному способу интерполяции.

Для нахождения момента очередного перераспределения ресурсов t^{n+1} необходимо вычислить время до скачка запросов для каждого процесса:

$$\Delta t_j = \frac{x_j^k - x_j^n}{\gamma_j^n}, \quad (23)$$

где x_j^k – ближайшая справа к x_j^n точка, в которой известно значение табличной функции $\bar{D}_j$. Тогда время следующего перераспределения ресурсов будет:

$$t^{n+1} = t^n + \min_j \Delta t_j. \quad (24)$$

Можно возразить, что используемая аппроксимация функций $\bar{D}_j$ является не самой лучшей, и ее погрешность очень высока. Но здесь надо вспомнить, что мы имеем дело с системой, где все происходит дискретно. К примеру, потребление процессора 60 % означает, что из десяти квантов приложение исполнялось шесть. Более того, выбранное в разделе 1 определение стадии исполнения также подразумевает ступенчатое изменение потребностей.

7. Описание эксперимента

Рассмотрим варианты применения изученного метода для прогнозирования исполнения программ на нескольких примерах. Достоверность модели оценим по времени исполнения задач и общему виду графика потребления ресурсов – т. е. по тем параметрам, которые можно пронаблюдать на любой системе с помощью утилит типа `top` или `perfmon`. Сразу оговоримся, что нас интересует общий вид графиков потребления: критические точки, соотношение между потребляемыми ресурсами и т. д. – этого вполне достаточно для практического применения задач. Поэтому давать количественные оценки совпадения графиков не имеет смысла.

Для этого эксперимента в качестве взаимодействующих процессов выбран генератор случайных чисел и архиватор `gzip`, взаимодействующие через `pipe`. Как оказалось, очень удобно использовать встроенный в Linux генератор случайных чисел. В качестве производителя использовалась команда: `dd if=/dev/urandom bs=4k count=125000`. Задачу можно описать так: в одном процессе необходимо сгенерировать 500 Мб случайных чисел, а во втором – сжать полученную информацию и записать в файл.

Данный пример хорош тем, что позволяет получить истинные желаемые уровни потребления $\bar{D}$ для каждого процесса. Для этого процессы запускали по очереди, причем выходные данные от генератора случайных чисел записывались в файл на RAM-диске, а затем использовались для входных данных для архиватора. Тем самым удалось избежать дополнительных погрешностей, т. к. данные в этом случае поставлялись мгновенно (по сравнению с остальными затратами). К примеру, если бы файл располагался на обычном диске, то наблюдалось бы избыточное снижение скорости работы из-за обращений к диску, которых нет в случае взаимодействия напрямую.

Для большей точности все эксперименты ставились по десять раз, а результаты усреднялись. При этом, чтобы исключить влияние случайных внешних факторов, для каждой точки по оси времени исключались значения, являющиеся выбросами с вероятностью 90 %. Для определения, подчиняется ли подозрительная точка в последовательности закону нормального распределения, использовался Q-критерий, описанный Диксоном в [8].

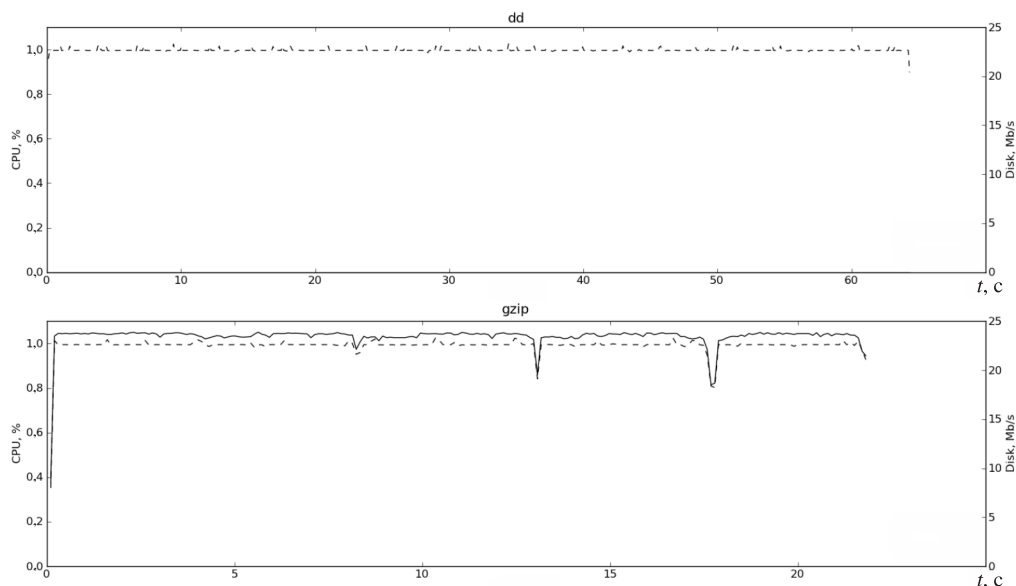


Рис. 1. Потребление ресурсов при монопольном исполнении
(-----) CPU; (—) DISK

В результате, для каждого процесса получили следующий набор функций:

$D_{cpu}(x)$ – доля времени, которую приложение исполнялось на процессоре;

$D_{dr}(x)$ (disk read) и $D_{dw}(x)$ (disk write) – скорости чтения и записи на диск. Сюда относятся данные, обработанные драйвером диска, т. е. которых не оказалось в системном буфере;

$D_{ar}(x)$ (application read) и $D_{aw}(x)$ (application write) – количество байт в секунду, считанных или записанных приложением через системные

вызовы. Данные величины отличаются от D_{dr} и D_{dw} тем, что сюда попадают также данные, полученные из системного буфера или от других приложений через FIFO.

Графики потребления ресурсов при монопольном исполнении представлены на рис. 1.

8. Модель с последовательным исполнением

Сперва исследуем поведение модели для случая, когда поставщик и потребитель ресурсов последовательно исполняются на одном процес-

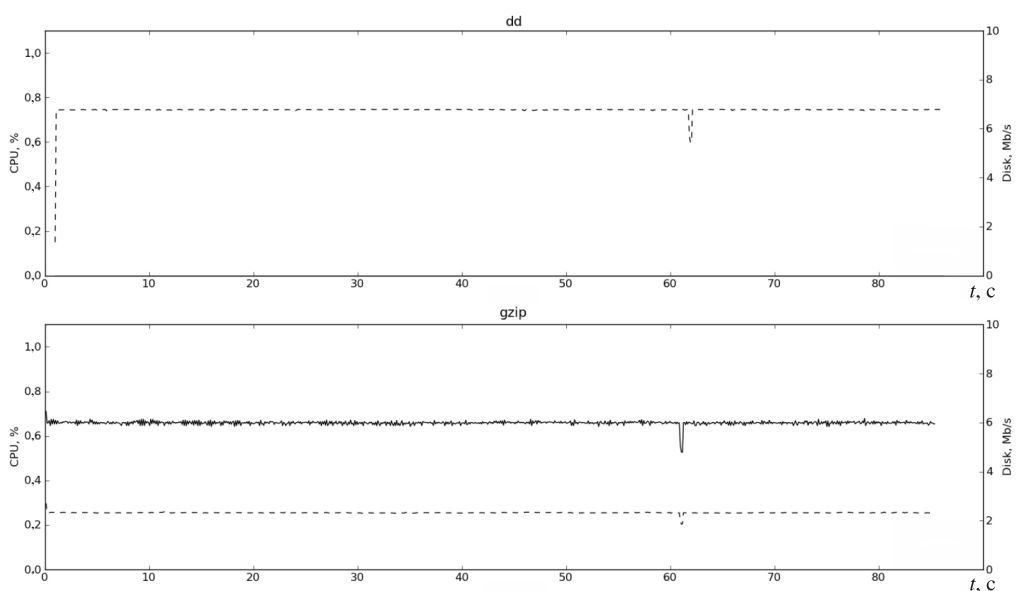


Рис. 2. Потребление ресурсов в эксперименте при исполнении на одном процессоре
(-----) CPU; (—) DISK

соре, тем самым конкурируя за его время. Чтобы этого добиться оба приложения запускались с явной привязкой к нулевому процессору.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2. Как видно из графиков, данный эксперимент хорошо согласуется со следствиями из закона Амдала [9]: т. к. исполнение у нас последовательное, то полное время завершения будет равно сумме времен каждого процесса

$$T = T_p + T_c, \quad (25)$$

где T_p – время работы производителя при эксклюзивном запуске; T_c – потребителя.

Опишем параметры, использованные для численного моделирования.

Набор ресурсов: процессор (cpu), диск (disk) и обменный ресурс (inter). Причем для диска бралась сумма записанных и считанных данных.

Лимит ресурсов:

$$\bar{L} = \{\text{cpu} = 1, 0, \text{disk} = 10 \text{ Mb/s}, \text{inter} = 5 \text{ Mb}\}. \quad (26)$$

Скорость диска выбрана как средняя производительность при случайном чтении. Для обменного ресурса буфер подобран так, чтобы вмещать в себя порцию данных, произведенных за несколько шагов интегрирования. Если его сделать очень маленьким, то модель будет показывать гораздо худшую производительность, чем есть на самом деле, т. к. процессы будут постоянно тормозиться из-за ожидания данных. Как показано в [6], размер системного буфера в Linux составляет 64 Кб,

а размер атомарной записи – всего 4 Кб. Тем не менее, на практике система достаточно хорошо справляется с планированием процессов, ожидающих ввода-вывода, поэтому эффективный лимит обменного ресурса значительно выше.

Функция запроса ресурсов производителем:

$$\bar{D}^P = \{\text{cpu} = D_{\text{cpu}}^{dd}, \text{disk} = D_{\text{dr}}^{dd} + D_{\text{dw}}^{dd}, \text{inter} = -D_{\text{aw}}^{dd}\}. \quad (27)$$

Так как диск этим приложением не используется, то фактически $D_{\text{disk}}^P(x) = 0$. Для обменного ресурса выбрано количество байт, отправляемое приложением на запись, т. к. единственная запись, которая производится приложением – передача данных потребителю. Знак «минус» показывает, что программа является поставщиком ресурса.

Для потребителя запишем функцию запроса в виде:

$$\bar{D}^C = \{\text{cpu} = D_{\text{cpu}}^{gzip}, \text{disk} = D_{\text{dr}}^{gzip} + D_{\text{dw}}^{gzip}, \text{inter} = D_{\text{ar}}^{gzip}\}. \quad (28)$$

Здесь, аналогично, обменным ресурсом являются байты, считанные приложением, т. к. они все поступили от производителя.

Результаты моделирования приведены на рис. 3. При сравнении графика с тем, что получилось в результате эксперимента, видно очень хорошее совпадение как по времени исполнения, так и по виду функций. Также на модельном гра-

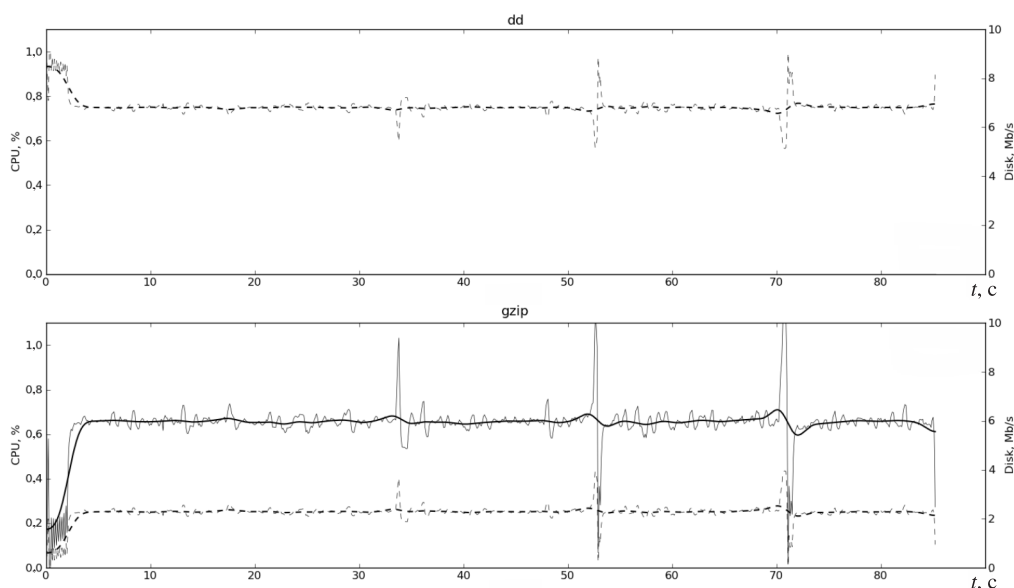


Рис. 3. Потребление ресурсов при исполнении на одном процессоре, численное моделирование (-----) CPU; (—) DISK

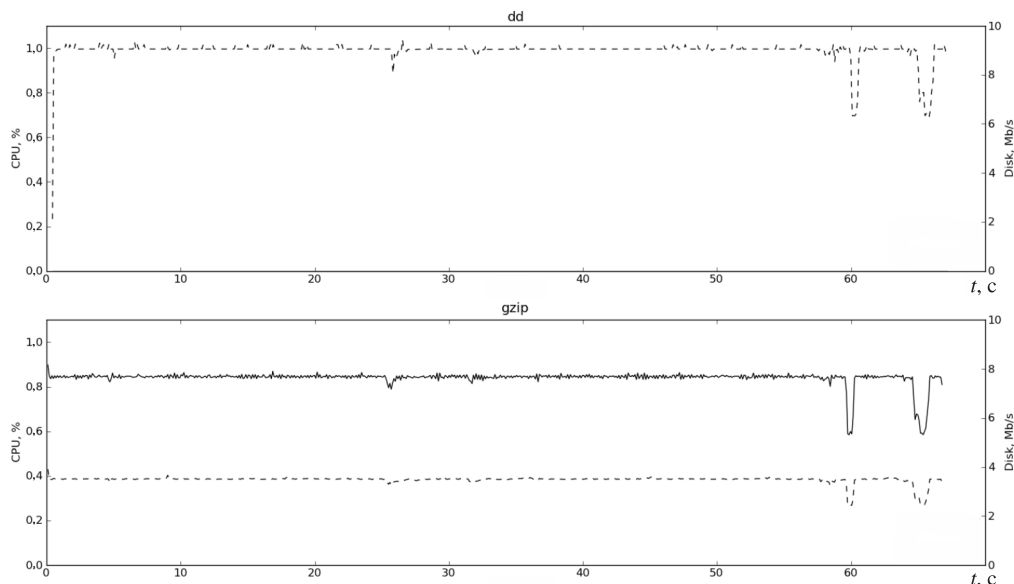


Рис. 4. Потребление ресурсов в эксперименте при исполнении на одном процессоре
(-----) CPU; (—) DISK

фике видны колебания, вызванные задержкой перераспределения ресурсов, которые были предсказаны ранее.

9. Модель с параллельным исполнением

Отличие от предыдущего эксперимента состоит в том, что взаимодействующие программы исполняются на разных процессорах параллельно. Если посмотреть на результаты эксклюзивного исполнения приложений, то видно, что архиватор обрабатывает примерно в три раза быстрее. Поэтому цель данного опыта – изучение поведения модели в случае, когда процесс ограничивается только обменным ресурсом. Второй при этом, будет исполняться монополично, т. к. программы конкурируют только за процессор, а он, в данном эксперименте, полностью доступен каждому.

Перед запуском каждый процесс явно привязывался к своему ядру для минимизации эффектов, возникающих при смене контекста на процессоре. Результаты эксперимента представлены на рис. 4. Они являются следствием закона Амдала [9]: т. к. исполнение у нас параллельное, то полное время завершения будет равно максимальному времени исполнения процесса

$$T = \max(T_P, T_C). \quad (29)$$

Для моделирования этой ситуации применен специальный прием, позволяющий «распараллелить» исполнение программ. Вместо одного про-

цессора явно введено два (cpu1 и cpu2), при этом каждое приложение требует только один из этих двух типов ресурсов. Хотя данный шаг и выглядит искусственно, он вполне точно описывает природу явления: процессы не могут так просто «перепрыгивать» с одного ядра на другое, при этом нельзя загрузить каждое больше, чем на 100 %. Такой же метод можно применять для моделирования чтения с разных дисков или передачи данных по разным сетевым интерфейсам и т. д.

Остальные ресурсы были такие же, как и в предыдущем эксперименте. Мощность системы:

$$\vec{L} = \{\text{cpu1} = 1, 0, \text{cpu2} = 1, 0, \text{disk} = 10\text{Mb/c}, \text{inter} = 5\text{Mb}\}. \quad (30)$$

Функция потребностей производителя:

$$\vec{D}^P = \{\text{cpu1} = D_{\text{cpu}}^{dd}, \text{cpu2} = 0, \text{disk} = D_{dr}^{dd} + D_{dw}^{dd}, \text{inter} = -D_{aw}^{dd}\}. \quad (31)$$

Функция запросов потребителя:

$$\vec{D}^C = \{\text{cpu1} = 0, \text{cpu2} = D_{\text{cpu}}^{gzip}, \text{disk} = D_{dr}^{gzip} + D_{dw}^{gzip}, \text{inter} = D_{ar}^{gzip}\}. \quad (32)$$

Результаты моделирования приведены на рис. 5. Как и в предыдущем случае, получено очень хорошее совпадение и по времени исполнения, и по виду функций.

Как было показано выше, результаты численного моделирования очень хорошо сходятся с экс-

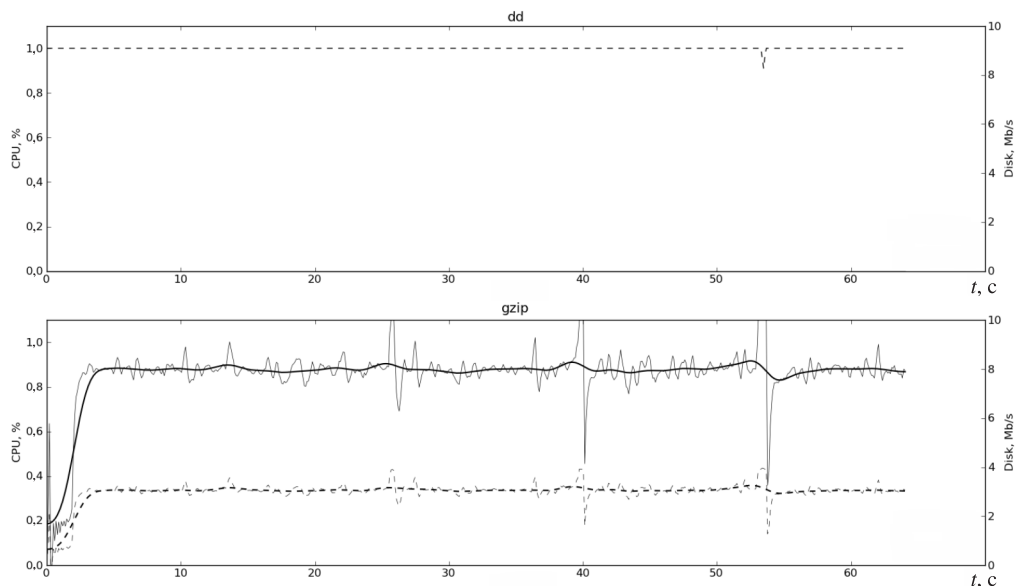


Рис. 5. Потребление ресурсов при выполнении на одном процессоре, численное моделирование (-----) CPU; (——) DISK

периментом как количественно (время завершения процессов), так и качественно (зависимость выделенных процессу ресурсов от времени). К достоинствам предложенного метода относятся его простота и универсальность. Вычислительный алгоритм легко адаптируется к различному типу задач, при этом изменяются только входные данные.

При построении модели предполагалось, что распределение ресурсов не зависит от истории их потребления. Если для процессора и сети это условие выполняется всегда, то для диска это не так. При наличии буферизации чтения возмож-

ность предоставления ресурсов сильно зависит от истории обращений. К примеру, если процесс начинает впервые обращаться к данным, то скорость чтения будет значительно ниже, чем при чтении из кэша. Скорость диска зависит также и от характера нагрузки: последовательное чтение происходит быстрее, т. к. время не тратится на позиционирование головки.

Несмотря на описанные ограничения, предлагаемый метод хорошо подходит для моделирования работы приложений, работающих по схеме поставщик–потребитель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Datamonitor Group.** Global top 10 software and services companies – industry, financial and SWOT analysis [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.datamonitor.com/>
2. **Тименков, Ю.В.** Кинематическая модель исполнения процесса [Текст] / Ю.В. Тименков, Д.В. Тименкова // Математические модели и задачи управления. –2011. –С. 177–185.
3. **Таненбаум, Э.** Современные операционные системы [Текст] / Э. Таненбаум. –2-е изд. –СПб.: Питер, 2007. –1038 с.
4. **Carroll, Aaron** I/O scheduling on RAID [Текст]/ Carroll Aaron // Master's thesis. –School of Electrical Engineering, University of NSW, Sydney 2052, Australia, 2008.
5. **Siever, Ellen.** Linux in a Nutshell [Текст] / Ellen Siever, Stephen Figgins, Robert Love [et al.]; 6 ed. –O'Reilly Media, 2009. –P. 944.
6. **Коньков, К.А.** Основы операционных систем: Курс лекций [Текст] / К.А. Коньков, В.Е. Карпов. –2-е изд. –Интернет-Университет информационных технологий, 2009. –536 с.
7. **Калиткин, Н.Н.** Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. –М.: Наука, 1978. –512 с.
8. **Dean, R.B.** Simplified statistics for small numbers of observations [Текст] / R.B. Dean, W.J. Dixon // Anal. Chem. –1951. –Vol. 23. –№ 4. –P. 636–638.
9. **Amdahl Gene.** Validity of the single processor approach to achieving large-scale computing capabilities [Текст] / Gene Amdahl // AFIPS Conf. Proc. –1967. –Vol. 30. –P. 483–485.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЛИНЕЙНО-УПРУГОГО ТЕЛА В ОКРЕСТНОСТИ УГЛОВОГО ВЫРЕЗА

Известно, что линейная теория упругости дает в угловой точке выреза сингулярное решение: напряжения стремятся к бесконечности [1, 2]. Напряженно-деформированное состояние (НДС) в окрестности угла может быть описано асимптотическими формулами, структура которых напоминает классические решения для трещины. Исследования решений в окрестности угловой точки имеют давнюю историю; в одной из первых публикаций [3] рассмотрена асимптотика вблизи вершины угла при различных однородных граничных условиях на берегах.

Асимптотические формулы для тензора напряжений $\underline{\tau}$ в окрестности углового выреза имеют вид

$$\underline{\tau}(r, \theta) = Kr^\lambda \underline{T}(\theta), \quad (1)$$

где r, θ – полярные координаты. Коэффициент интенсивности K (КИН) зависит от нагружения и формы области. Вместо (1) может быть сумма слагаемых вида $K_i r^{\lambda_i} \underline{T}_i$ – с различными собственными числами λ и соответствующими собственными функциями $\underline{T}(\theta)$. Но асимптотически главным членом при $r \rightarrow 0$ будет «наиболее сингулярный».

При оценке прочности главная задача – нахождение КИН. Для этого разработаны специальные методы: использование сингулярных конечных элементов (КЭ) [4], применение специальных вариационных формулировок [5] в окрестности угла, варьирование КИН как самостоятельных неизвестных [6]. В данной статье предлагается методика, использующая результаты КЭ-анализа на регулярных стандартных элементах и допускающая обобщение на случай температурных воздействий.

НДС в окрестности углового выреза

Рассматривается окрестность угла выреза в условиях плоской деформации. В полярных координатах материал занимает сектор $0 \leq r < \infty, \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$. Для вектора перемещений $\underline{u}$, тензора деформаций $\underline{\varepsilon}$ и тензора напряжений $\underline{\tau}$ имеем известные соотношения [6]:

$$\begin{aligned} \underline{u} &= u_\alpha(x_\alpha) \underline{e}_\alpha \equiv \underline{\tilde{u}}, \quad \underline{\varepsilon} = \varepsilon_{\alpha\beta} \underline{e}_\alpha \underline{e}_\beta \equiv \underline{\tilde{\varepsilon}}, \\ \underline{\tau} &= \underline{\tilde{\tau}} + \sigma_3 \underline{k} \underline{k}, \quad \underline{\tilde{\tau}} \equiv \tau_{\alpha\beta} \underline{e}_\alpha \underline{e}_\beta, \\ \underline{\varepsilon} &= \frac{1}{2\mu} (\underline{\tilde{\tau}} - \nu \underline{\tilde{\tau}} \underline{\tilde{E}}), \quad \underline{\tilde{\tau}} \equiv tr \underline{\tilde{\tau}}, \\ \underline{\tilde{E}} &= \underline{e}_\alpha \underline{e}_\alpha = \underline{E} - \underline{k} \underline{k}; \quad \sigma_3 = \nu \underline{\tilde{\tau}}. \end{aligned}$$

Здесь $\underline{e}_\alpha, \underline{k}$ – орты декартовых осей в плоскости и перпендикулярно ей, $\underline{E}$ – единичный тензор, μ, ν – модуль сдвига и коэффициент Пуассона; волна сверху означает составляющие векторов и тензоров в плоскости, по повторяющимся индексам – суммирование.

Границы сектора свободны от нагрузок

$$\underline{n} \cdot \underline{\tilde{\tau}}|_{\theta_{1,2}} = 0. \quad (2)$$

При равновесии без объемных сил в однородном материале напряжения определяются бигармонической функцией Эри:

$$\underline{\tilde{\tau}} = -\underline{k} \times \nabla \nabla \Phi \times \underline{k}, \quad \Delta \Delta \Phi = 0.$$

При переходе к комплексным переменным она выражается через две регулярные функции (формула Гурса):

$$\begin{aligned} \Phi &= \text{Re}(\bar{z} \varphi(z) + \chi(z)) = \\ &= \frac{1}{2} (\bar{z} \varphi(z) + z \bar{\varphi}(\bar{z}) + \chi(z) + \bar{\chi}(\bar{z})), \quad (3) \\ z &= x_1 + ix_2 = re^{i\theta}. \end{aligned}$$

Напряжения и перемещения представляются формулами Колосова–Мусхелишвили:

$$\begin{aligned} \sigma_1 + \sigma_2 &= 2(\varphi' + \bar{\varphi}'), \\ \sigma_2 - \sigma_1 + 2i\tau_{12} &= 2(\bar{z} \varphi'' + \psi'), \\ 2\mu(u_1 + iu_2) &= (3 - 4\nu)\varphi - z\bar{\varphi}' - \bar{\psi} \\ (\psi &\equiv \chi', \quad \sigma_1 \equiv \tau_{11}, \quad \sigma_2 \equiv \tau_{22}). \end{aligned} \quad (4)$$

Решение ищем в виде [2]

$$\varphi = Az^{\lambda+1}, \quad \psi = Bz^{\lambda+1}, \quad (5)$$

где постоянные A, B – комплексные, λ – вещественная. Из (4) получим

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= r^\lambda (\lambda + 1) (\lambda (-A_1 \cos(\lambda - 2)\theta + \\
 &+ A_2 \sin(\lambda - 2)\theta) + (2A_1 - B_1) \cos \lambda \theta - \\
 &\quad - (2A_2 - B_2) \sin \lambda \theta), \\
 \sigma_2 &= r^\lambda (\lambda + 1) (\lambda (A_1 \cos(\lambda - 2)\theta - \\
 &- A_2 \sin(\lambda - 2)\theta) + (2A_1 + B_1) \cos \lambda \theta - \\
 &\quad - (2A_2 + B_2) \sin \lambda \theta), \\
 \tau_{12} &= r^\lambda (\lambda + 1) (\lambda (A_1 \sin(\lambda - 2)\theta + \\
 &+ A_2 \cos(\lambda - 2)\theta) + B_1 \sin \lambda \theta + B_2 \cos \lambda \theta), \\
 2\mu u_1 &= r^{\lambda+1} ((3 - 4\nu)(A_1 \cos(\lambda + 1)\theta - \\
 &- A_2 \sin(\lambda + 1)\theta) - (\lambda + 1)(A_1 \cos(\lambda - 1)\theta - \\
 &\quad - A_2 \sin(\lambda - 1)\theta) - B_1 \cos(\lambda + 1)\theta + \\
 &\quad + B_2 \sin(\lambda + 1)\theta), \\
 2\mu u_2 &= r^{\lambda+1} ((3 - 4\nu)(A_1 \sin(\lambda + 1)\theta + \\
 &+ A_2 \cos(\lambda + 1)\theta) + (\lambda + 1)(A_1 \sin(\lambda - 1)\theta + \\
 &\quad + A_2 \cos(\lambda - 1)\theta) + B_1 \sin(\lambda + 1)\theta + \\
 &\quad + B_2 \cos(\lambda + 1)\theta).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Показатель λ должен удовлетворять неравенству

$$-1 < \lambda < 0. \tag{7}$$

Правое неравенство – от убывания напряжений на бесконечности. Левое следует из ограниченности энергии деформации:

$$\int_{\theta^-}^{\theta^+} d\theta \int_0^\infty P r dr < \infty \Rightarrow 2\lambda + 1 > -1,$$

поскольку Π – квадратичная функция от деформаций (и напряжений).

Для определения коэффициентов A_α, B_α и параметра λ остались граничные условия (2). Это дает линейную алгебраическую однородную систему (ЛАОС); ее определитель должен равняться нулю.

В классической задаче о трещине $\theta_1 = -\pi$, $\theta_2 = \pi$. Условия $\sigma_2 = \tau_{12} = 0$ при $\theta = \pm\pi$ приводят к ЛАОС для A_α, B_α . Равенство нулю определителя системы позволяет найти $\lambda = -1/2$. Решив далее ЛАОС, получим $B_1 = A_1/2$, $B_2 = -3A_2/2$. Формулы (6) в этом случае принимают известный вид [2, 6]. При этом $A_1 = K_1/\sqrt{2\pi}$, $A_2 = -K_2/\sqrt{2\pi}$, где K_1, K_2 – коэффициенты интенсивности напряжений при нормальном отрыве и сдвиге в плоскости.

Решением ЛАОС с вырожденной матрицей является собственный вектор с нулевым собственным значением – находится стандартными

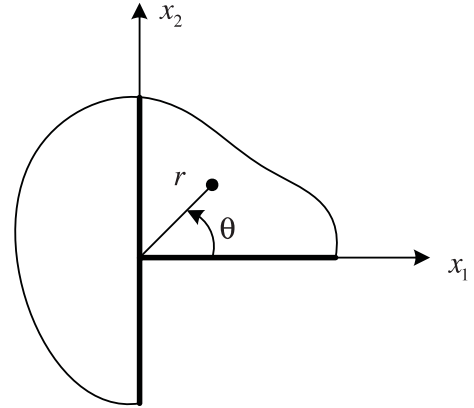


Рис.1. Угол накладки

численными методами:

$$(A_1, A_2, B_1, B_2)^T = KY, \quad \|Y\| = 1. \tag{8}$$

Нормированный вектор-столбец Y определяется однозначно, а коэффициент K пока произволен. Явления отрыва и сдвига в общем случае объединены (для трещины они разделяются).

Асимптотическими формулами (6) также описывается НДС в окрестности угла выреза, когда область состоит из нескольких секторов с разными материалами. Каждый такой сектор ограничен лучами $\theta = \theta_k$ и $\theta = \theta_{k+1}$, $\theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_n < \theta_{n+1}$. В k -м секторе справедливы асимптотические формулы с коэффициентами $A_1^{(k)}, A_2^{(k)}, B_1^{(k)}, B_2^{(k)}$. Для их определения имеем условия (1) при $\theta = \theta_1, \theta_{n+1}$ и по четыре условия непрерывности напряжений и перемещений при $\theta = \theta_k$, $k = 2, \dots, n$, что дает ЛАОС для $4n$ коэффициентов. Равенство нулю определителя – уравнение для λ . Решение ЛАОС с вырожденной матрицей (размерности $4n$) выглядит аналогично (8).

Эти построения для случая, когда биссектриса выреза ортогональна линии раздела материалов, приведены в [4]. Там дано в явном виде и уравнение для λ .

Далее рассматривается имеющий большое практическое значение случай с двумя секторами и $\theta_1 = 0, \theta_2 = \pi/2, \theta_3 = 3\pi/2$ (рис. 1).

Он определяет асимптотику НДС на границе крепления накладки к основанию. В асимптотических формулах восемь неизвестных коэффициентов, для них существует восемь граничных условий. Значение λ и столбец $Y = (A_1^0, \dots, B_2)^T$ ($\|Y\| = 1, B_2 > 0$) определяются только свойствами материала. Коэффициент интенсивности K зависит от нагружения области вдали от угла.

Критерий прочности и методика расчета КИН

Сходство решений вблизи угла и у фронта трещины позволяет применить аналогичные методы для оценки прочности соединения накладки с основанием. Известен «силовой» критерий прочности [1, 2, 6] $K < K^*$ – значение КИН не должно превышать заданной предельной величины. Применительно к угловому вырезу предлагается следующий критерий:

$$K_-^* < K < K_+^* \quad (K_-^* < 0, \quad K_+^* > 0) \quad (9)$$

(КИН может быть и отрицательным).

Числовой анализ асимптотических формул показывает, что при $K > 0$ на луче $\theta = \pi/2$ будет $\sigma_1 > 0, \tau_{12} > 0$, что способствует отрыву накладки и сдвигу ее «вверх». В этом случае предельная нагрузка определится через K_+^* . Если же $K < 0$, то разрушение произойдет при $K = K_-^*$. Эти очевидные соображения, однако, требуют экспериментальной проверки.

Критические значения K_-^*, K_+^* определяются экспериментально. Для этого необходимы два эксперимента: в одном система нагрузок дает положительный КИН, в другом – отрицательный.

Вычисление КИН – главная (и сложная) задача. В данной статье предлагается подход к ее решению, основанный на применении теоремы взаимности работ в окрестности угла выреза. Идеи этого подхода можно найти в [1].

В общем случае теорема взаимности работ для области V с границей O выражается равенством [6]:

$$A_{12} \equiv \int_V \underline{f}_1 \cdot \underline{u}_2 dV + \int_O \underline{p}_1 \cdot \underline{u}_2 dO = A_{21}.$$

Имеются в виду два состояния тела с различными воздействиями.

Рассмотрим изображенную на рис. 2 окрестность угла $\tilde{F}$.

Мысленно выделив окружностью C мало-

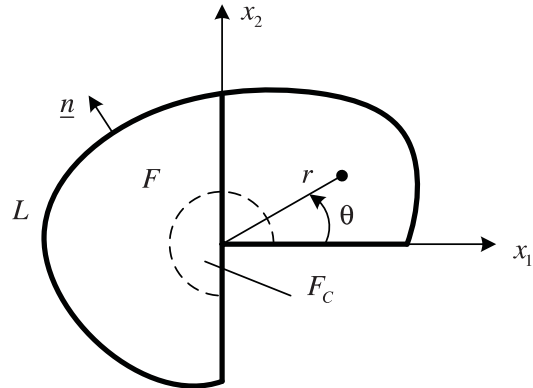


Рис. 2. К теореме взаимности

го радиуса a окрестность F_c , получим область $F = \tilde{F} - F_c$. Ее граница $L \vee L_1 \vee L_2 \vee C$, где L_1 и L_2 – границы выреза вне окружности C .

В первом состоянии действуют «объемные» силы $\underline{f}$ и «поверхностные» $\underline{p}$:

$$\underline{f}_1 = \underline{f}, \quad \underline{p}_1|_{L \vee L_1 \vee L_2} = \underline{p}, \quad \underline{u}_1 = \underline{u}. \quad (10)$$

Нагрузки на C при малом радиусе a определяются асимптотическими формулами (6) с известным КИН:

$$\underline{\tau} = K \underline{T}, \quad \underline{p}_1|_C = -K \underline{T}_r, \quad \underline{T}_r = \underline{e}_r \cdot \underline{T}, \quad (11)$$

где $\underline{T}$ – асимптотический тензор напряжений (6) с коэффициентами $\underline{Y}$ из (10).

Во втором состоянии во всей области справедливы асимптотические формулы (6) и $K = 1$:

$$\underline{u}_2 = \underline{U}, \quad \underline{\tau}_2 = \underline{T}, \quad \underline{f}_2 = 0, \quad (12)$$

$$\underline{p}_2|_{L \vee C} = \underline{n} \cdot \underline{T}, \quad \underline{p}_2|_{L_1 \vee L_2} = 0$$

($\underline{U}$ – асимптотические перемещения). Применив теорему взаимности работ в области F , имеем:

$$A_{12} = \int_F \underline{f} \cdot \underline{U} dF + \int_{L_1 \vee L_2 \vee L} \underline{p} \cdot \underline{U} dl - K \int_C \underline{T}_r \cdot \underline{U} dl,$$

$$A_{21} = \int_L \underline{n} \cdot \underline{T} \cdot \underline{u} dl - \int_C \underline{T}_r \cdot \underline{u} dl.$$

Откуда

$$K = \frac{\int_F \underline{f} \cdot \underline{U} dF + \int_{L_1 \vee L_2 \vee L} \underline{p} \cdot \underline{U} dl - \int_L \underline{n} \cdot \underline{T} \cdot \underline{u} dl + \int_C \underline{T}_r \cdot \underline{u} dl}{\int_C \underline{T}_r \cdot \underline{U} dl}. \quad (13)$$

Для вычисления КИН по этой формуле необходимо знать НДС на границе F , определяемое заданными нагрузками $\underline{f}$ и $\underline{p}$. Поскольку сингулярности в этой области нет, то это НДС может быть найдено численно с помощью МКЭ. Нагрузка на L равна $\underline{p} = \underline{n} \cdot \underline{\tau}$.

Формула (13) допускает обобщение на случай с температурными воздействиями. Действительно, трехмерные уравнения теории упругости с температурными добавками имеют вид [6]:

$$\nabla \cdot \underline{\tau} + \underline{f} = 0, \quad \underline{\varepsilon} = \nabla \underline{u}^s,$$

$$\begin{aligned}\underline{\varepsilon} &= \underline{\varepsilon}_\tau + \underline{\varepsilon}_\Theta \Leftrightarrow \underline{\tau} = \underline{\tau}_\varepsilon + \underline{\tau}_\Theta, \\ \underline{\varepsilon}_\tau &\equiv \frac{1}{2\mu} \left(\underline{\tau} - \frac{\nu}{1+\nu} \tau \underline{E} \right), \\ \underline{\varepsilon}_\Theta &\equiv \alpha \Theta \underline{E}, \quad \underline{\tau}_\varepsilon \equiv 2\mu \left(\underline{\varepsilon} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon \underline{E} \right), \\ \underline{\tau}_\Theta &\equiv -H \Theta \underline{E}, \quad H \equiv \frac{E\alpha}{1-2\nu}; \\ \underline{u}|_{O_1} &= \underline{u}_0, \quad \underline{n} \cdot \underline{\tau}|_{O_2} = \underline{p}.\end{aligned}\quad (14)$$

Здесь Θ – изменение температуры, $\tau \equiv tr \underline{\tau}$, $\varepsilon \equiv tr \underline{\varepsilon}$ – первые инварианты (следы) тензоров.

$$K = \frac{\int_F (\nabla \cdot \underline{\tau}_\Theta + \underline{f}) \cdot \underline{U} dF + \int_{L_1 \vee L_2 \vee L} (-\underline{n} \cdot \underline{\tau}_\Theta + \underline{p}) \cdot \underline{U} dl - \int_L \underline{n} \cdot \underline{T} \cdot \underline{u} dl + \int_C \underline{T}_r \cdot \underline{u} dl}{\int_C \underline{T}_r \cdot \underline{U} dl}.\quad (16)$$

Примеры вычислений

Пример 1. Как иллюстрацию изложенной выше методики рассмотрим вычисление КИН для биметаллической области на рис. 2. Свойства материалов секторов: $E_1 = 306$ ГПа; $\nu = 0,1$; $E_2 = 128$ ГПа; $\nu = 0,33$ (соединение бериллий-бронза из статьи [7]). Задаем точное решение

$$\begin{aligned}\underline{u} &= \underline{U} + \underline{\hat{u}}, \quad \underline{\tau} = \underline{T} + \underline{\hat{\tau}}; \\ \underline{\hat{\tau}}^{(k)} &= 2s^{(k)} \underline{e}_2 \underline{e}_2, \quad (k=1,2), \\ E_k u_1^{(k)} &= -2\nu_k (1+\nu_k) s^{(k)} x_1, \\ E_k u_2^{(k)} &= 2(1-\nu_k^2) s^{(k)} x_2, \quad s^{(1)} = 1, \\ s^{(2)} &= \frac{E_2(1-\nu_1^2)}{E_1(1-\nu_2^2)};\end{aligned}\quad (17)$$

здесь $K = 1$.

Из (14) следует постановка «в перемещениях» с модифицированными объемными и поверхностными нагрузками:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \underline{\tau}_\varepsilon + \nabla \cdot \underline{\tau}_\Theta + \underline{f} &= 0, \\ \underline{u}|_{O_1} &= \underline{u}_0, \quad \underline{n} \cdot \underline{\tau}_\varepsilon|_{O_2} = -\underline{n} \cdot \underline{\tau}_\Theta + \underline{p}.\end{aligned}\quad (15)$$

При наличии температурных воздействий асимптотические формулы (6) сохраняются. Так как при $r \rightarrow 0$ $\underline{\tau}_\Theta$ ограничен, то $\underline{\tau}_\varepsilon$ асимптотически совпадает с $\underline{\tau}$ и может быть описан формулами (6). Применяя к задаче (15) формулу (13), получим

Параметры асимптотических формул численно определяются из соответствующей ЛАОС:

$$\begin{aligned}\lambda &= -0,478, \\ Y &= (0,231 \quad 0,528 \quad -0,351 \quad 0,253 \\ &\quad 0,177 \quad 0,489 \quad -0,422 \quad 0,181)^T.\end{aligned}\quad (18)$$

Это – округленные значения; при расчетах необходима максимальная точность.

Вычисления КИН по формуле (13) проводились двумя способами. Во-первых, с непосредственной подстановкой точного решения (17) в (13). Во-вторых, с использованием численного решения в пакете ANSYS. Внешняя граница L – окружность радиусом $R = 10$ мм. Отношение радиусов $a/R = 0,9$ (рассматривались и многие

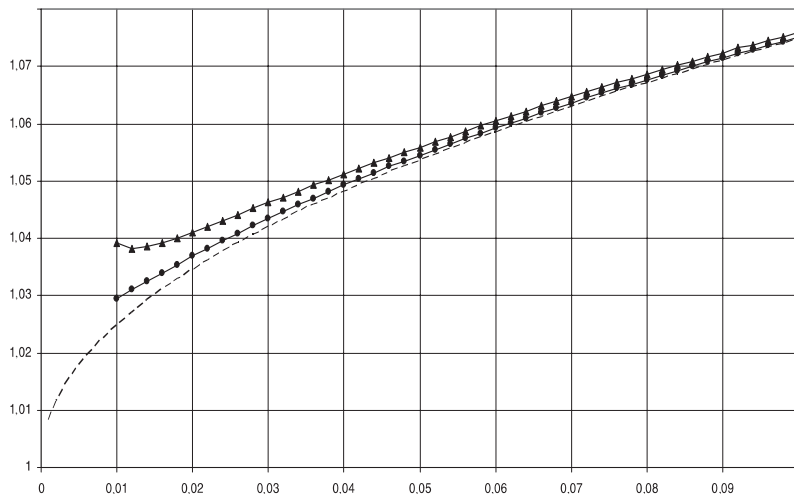


Рис. 3. Зависимости $K(a)$ при использовании точного и численного решений (---) Точное решение; (—▲—) КЭ-1; (—●—) КЭ-2

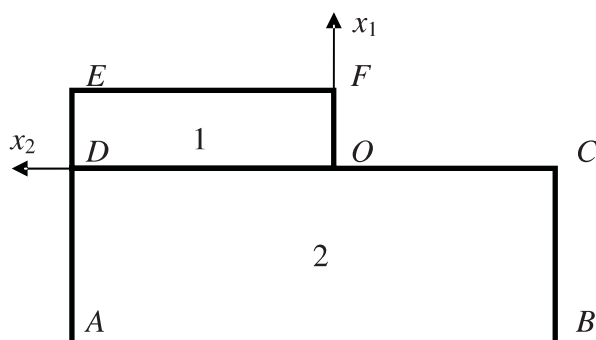


Рис. 4. Расчетная модель для примера 2

другие значения). Остался только один произвольный параметр a . Очевидно, что погрешность вычислений должна стремиться к нулю при $a \rightarrow 0$. Результаты расчета КИН как функции $K(a)$ приведены на рис. 3.

КЭ-расчеты проделаны на двух сетках. Характерный размер элементов сетки 1 в окрестности угла – от $2,3 \cdot 10^{-3}$ мм; сетка 2 получена из сетки 1 локальным сгущением элементов вблизи нуля и имеет вдвое меньший размер КЭ. Видно, что значение $K(a)$, вычисленное по теоретическому НДС, стремится к точному значению КИН. Вычислительные неудобства возможны от возрастания (при $a \rightarrow 0$) угла наклона касательной.

Пример 2. Рассмотрим образец, изображенный на рис. 4. Плитка 1 прикреплена к основанию 2, материалы областей 1 и 2 такие же, как

в предыдущем примере. Размеры образца (мм): $AD = 195$, $DE = 80$, $EF = 250$, $OC = 200$. На части границы заданы перемещения: $AB: u_1 = 0$; $AE: u_2 = 0$; $CB: u_1 = \text{const}$. На линии EF приложена равномерная нормальная распределенная нагрузка $p = 100$ МПа. Остальные участки границы свободны. Задача рассматривается в условиях плоской деформации.

Параметры асимптотических формул в угловой точке такие же, как в предыдущем примере, т. е. (18). Значение КИН, найденное по формуле (13) при $a = 0,004$ мм и $a/R = 0,9$ с использованием численного решения из ANSYS, следующее:

$$K_p = 35,04.$$

Пример 3. Пусть теперь линия EF также свободна от нагрузок, а образец равномерно нагрет до $T = 20$ °С относительно температуры недеформированного состояния. Свойства материалов считаем не зависящими от температуры, поэтому параметры асимптотических формул также определяются (18). Для вычисления КИН следует использовать формулу с температурными добавками (16). При $a = 0,004$ мм и $a/R = 0,9$ получим:

$$K_T = 34,12.$$

Таким образом, нагрев образца на $T = 1$ °С вызывает такое же НДС в окрестности угла, что и приложение равномерной нормальной нагрузки $p = 4,88$ МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Партон, В.З.** Методы математической теории упругости [Текст] / В.З. Партон, П.И. Перлин. –М.: Наука, 1981. –688 с.
2. **Морозов, Н.Ф.** Математические вопросы теории трещин [Текст] / Н.Ф. Морозов. –М.: Наука, 1984. –256 с.
3. **Williams, M.** Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extension [Текст] / M. Williams // ASME J. of Applied Mechanics. –1952. –Vol. 74. –P. 526–528.
4. **Carpinteri, A.** Numerical evaluation of generalized stress-intensity factors in multi-layered composites [Текст] / A. Carpinteri, M. Paggi, N. Pugno // International J. of Solids and Structures. –2006. –Vol. 43. –P. 627–641.
5. **Szabo, B. A.** Numerical analysis of singularities in two dimensions. Part 2: Computation of generalized flux/stress intensity factors [Текст] / B. A. Szabo, Z. Yosibash // International J. for Numerical Methods in Engineering. –1996. –Vol. 39. –P. 409–434.
6. **Елисеев, В.В.** Механика упругих тел [Текст] / В.В. Елисеев. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. –336 с.
7. **Gervash, A.A.** Metallographic analysis and strength investigation of different Be-Cu joints [Текст] / A.A. Gervash [et al.] // J. of Nuclear Materials. –1996. –P. 626–631.



УДК 510.67

В.Г. Бурлов, Г.Г. Магулян, А.В. Матвеев

ОБЩИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Сложная система в своем развитии от зарождения идеи по ее созданию до непосредственного применения проходит ряд этапов, составляющих своего рода жизненный цикл [1, 2]. На протяжении этого цикла проводятся исследования, направленные на принятие рациональных решений. Исходя из особенностей цели и задач исследований, жизненный цикл сложной системы может быть представлен следующими основными этапами [1, 2]:

- выбор облика системы;
- проектирование элементов системы;
- изготовление элементов системы;
- эксплуатация элементов в составе системы;
- непосредственное применение элементов в составе системы.

Этапы представляют собой замкнутый цикл, в котором условия функционирования системы на этапе непосредственного применения являются исходными для этапа выбора облика системы. Неверное решение, принятое на этапе выбора облика системы, равносильно дальнейшему созданию нерациональной системы в целом [2]. Формирование облика системы позволяет определить пути решения проблем, для разрешения которых создается система [3]. Рассмотрим вопросы разработки и обоснования облика системы обеспечения безопасности и способов ее функционирования.

Введем соответствующее определение облика системы.

Определение 1. Обликом системы назовем ориентировочные, основополагающие характеристики системы и отношений между ее элементами, определяющие возможности системы и механизмы реализации этих возможностей [3, 4].

Рассмотрим использование понятие облика системы применительно к системе обеспечения безопасности. С этой целью введем следующее определение.

Определение 2. Система обеспечения безопасности (СОБ) – это множество элементов, средств, приспособленных и технически при-

годных для защиты от негативных воздействий среды, находящихся в отношениях и связях друг с другом и образующих определенную целостность, единство [4, 5].

Будем характеризовать СОБ на каждый момент времени $t \in T$ вектором состояния x , компонентами которого являются:

- компоненты, отражающие расположение элементов и технических средств в пространстве;
- компоненты, отражающие состояния агрегатов и подсистем СОБ, зон воздействия внешней среды, влияния и т. п.

В процессе функционирования в момент времени $t \in T$ (T – допустимая длительность функционирования системы) вектор x принимает значение из множества допустимых значений X . Тогда процесс функционирования СОБ будет характеризоваться парой элементов из множеств T и X , которую определим так.

Определение 3. Множество $R = X \times T$ (декартово произведение множеств X и T) есть множество допустимых значений пространственно-временных состояний (ПВС) СОБ, зон воздействия, влияния и т. п. в процессе решения целевой задачи по обеспечению безопасности.

На множестве R в процессе синтеза СОБ формируется множество требуемых пространственно-временных состояний СОБ, которое определим следующим образом.

Определение 4. Множество требуемых пространственно-временных состояний (ПВС) СОБ, зон воздействия, влияния и т. п. при решении целевой задачи по обеспечению безопасности $Q \subset R$ называется *районом сосредоточения основных усилий* (РСОУ) СОБ.

РСОУ – первое из трех базовых понятий предлагаемого подхода. Оно отражает сущность функционирования СОБ. Множество Q представляет собой модель действия СОБ в силу следующего. Объект существует в пространстве и времени. Движение, в свою очередь, есть изменение пространства и времени [1, 6]. Поэтому декартово

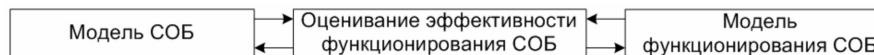


Рис. 1. Схема взаимодействия базовых элементов процесса синтеза СОБ

произведение множества требуемых ПВС определяет движение (изменение состояний агрегатов и подсистем СОБ, зон воздействия внешней среды, влияния и т. п.), зависящее от соответствующих управляющих воздействий.

Так как обычно процесс функционирования характеризуется в первую очередь способом, то определим его и сравним с РСОУ.

Определение 5. Способ действий – это порядок и приемы использования системы для решения целевых задач [3, 4].

Сопоставляя определения РСОУ и способа действий можно увидеть в этих понятиях общую сущность, при этом характеристики РСОУ носят конструктивный характер и могут быть вычислимы.

На каждом элементе множества Q СОБ функционирует с определенной производительностью.

Определение 6. Производительностью СОБ называется величина (функция), характеризующая способность решения определенного количества целевых задач СОБ в ед. времени.

Производительность системы зависит от возможностей СОБ и механизмов реализации этих возможностей. Поэтому приведем соответствующие определения.

Определение 7. Возможности СОБ – это количественные и качественные показатели, характеризующие способность СОБ по выполнению определенных целевых задач за установленное время в конкретной обстановке. Количество оцениваются вектором возможностей $v(r) \in V$, где V – ограниченное, замкнутое множество возможностей, $r \in Q$ – вектор требуемых ПВС СОБ.

Определение 8. Эффективность функционирования (ЭФ) СОБ есть степень реализации возможностей системы в процессе решения целевых задач по обеспечению безопасности. Оценивается показателем I , характеризующим выполнение целевых задач с учетом затрат материальных средств, различных ресурсов и време-

ни. ЭФ – второе базовое понятие предлагаемого подхода.

Определение 9. Управление СОБ – это целенаправленное воздействие разработчика, руководителя СОБ на систему с целью обеспечения требуемой ЭФ в различных условиях обстановки. Реализуется вектором управления $u(r) \in U$, где U – замкнутое, ограниченное множество управлений, $r \in Q$ – вектор требуемых ПВС СОБ.

Естественно предположить, что СОБ в каждой точке пространственной области Q функционирует в соответствии со своим целевым предназначением с определенной производительностью, характеризуемой функцией $\varphi(r)$ – плотностью распределения производительности СОБ в пространстве. Если с каждой точкой определенной пространственной области связана некоторая скалярная или векторная величина, то говорят, что задано поле этой величины, соответственно, скалярное или векторное. Таким образом, предположим, что СОБ в процессе функционирования формирует некоторое поле эффективности $I(Q)$, где $Q \subset R$.

Зная свойства поля и проинтегрировав его потенциал поля эффективности $\varphi(r)$ по области Q можно получить результат действия СОБ по всей области Q (РСОУ). Поэтому применим понятие потенциала поля для определения свойств СОБ.

Определение 10. Функция $\varphi(r) = \Phi(u(r), v(r), r)$ – потенциал поля эффективности (ППЭ) моделируемой СОБ, где $u(r)$, $v(r)$ – вектора управления и возможностей СОБ, а $r \in Q$ – вектор требуемых ПВС СОБ. ППЭ – третье базовое понятие предлагаемого подхода.

Синтез СОБ основан на установлении разработчиком соответствия между моделью СОБ и способом ее функционирования в соответствии с целевым предназначением СОБ (рис. 1).

Руководствуясь принципом сохранения потенциальной эффективности [3] получено условие замыкания мгновенной деятельности СОБ по всему множеству Q , представляющее собой формализованное уравнение синтеза:

$$\int_Q \varphi(r) dr = \int_Q \Phi(u(r), v(r), r) dr = I(Q). \quad (1)$$

Модель действия
Модель системы
Результат замыкания

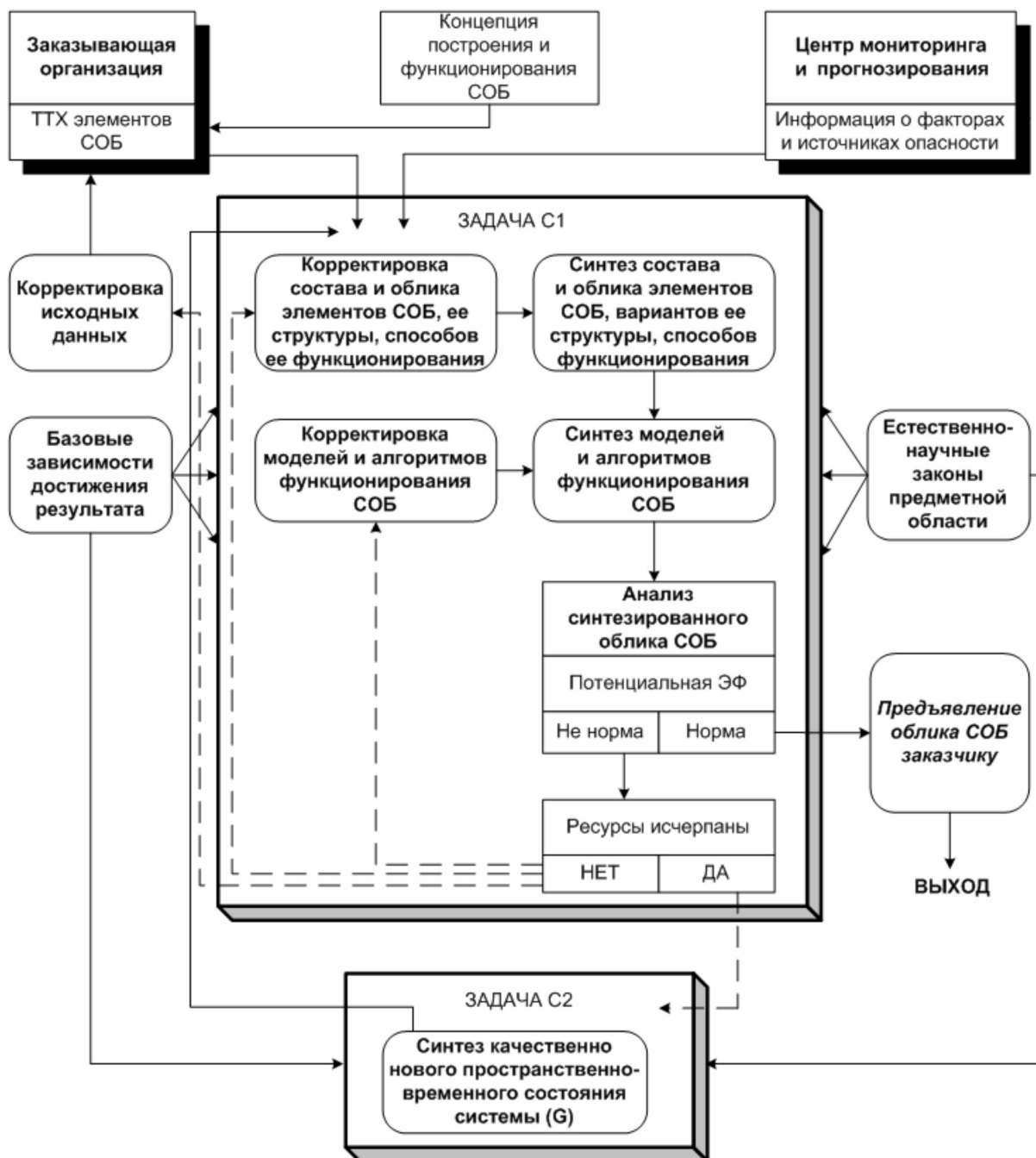


Рис. 2. Структурная схема обобщенного алгоритма синтеза СОБ

При таком подходе требуемая потенциальная ЭФ СОБ объединяет ПВС СОБ и технические возможности в единое целое, направленное на достижение целевых задач, а разработчик получает инструмент для синтеза СОБ с требуемыми свойствами.

Структура множества Q является носителем возможностей СОБ и механизмов их реализации.

Предназначение системы определяется с помощью интеграла (1).

Формирование структуры СОБ и распределения функций между ее элементами задается множеством G :

1. $X_{q_i} \subset X_{q_j}$;
2. $X_{q_i} \cap X_{q_j} = 0$, если $i \neq j$;

$$3. \bigcup_{i \in [1, N]} X_{q_i} = X_q;$$

$$4. \sum_{i=1}^N \int_T (\Phi_i(u_i(t), v_i(t)) \cdot X_{q_i}) dt = I,$$

где X_{q_i} – требуемые пространственно-временные состояния i -го элемента СОБ; N – количественный состав СОБ; I – показатель требуемой потенциальной ЭФ СОБ.

Решение задачи синтеза СОБ при заданном множестве G в этом случае сведется к отысканию экстремума:

$$\text{ЗАДАЧА C1:} \quad \text{extr } I(U, V, u(r), v(r)).$$

Решение задачи синтеза при нефиксированном множестве G и заданных U, V системы обеспечения безопасности сведется к отысканию экстремума:

$$\text{ЗАДАЧА C2:} \quad \text{extr } I(G).$$

Такой подход к синтезу СОБ позволил конструктивно определить, что должны содержать и давать разработчику методология, методы и технология моделирования СОБ.

Методология должна содержать условия, определяющие свойства множества требуемых пространственно-временных состояний системы Q .

Методы должны содержать условия, определяющие переход из одного состояния в требуемое состояние на множестве требуемых пространственно-временных состояний системы Q .

Технология должна содержать условия реализации переходов из одного состояния в требуемое состояние на множестве требуемых пространственно-временных состояний системы Q .

Для решения сформулированных задач, в первую очередь, необходимо установить факт существования интеграла (1). Для этого подынтегральная функция ППЭ должна быть ограничена

и иметь конечное число точек разрыва на множестве Q . Практическое рассмотрение свойств потенциала поля эффективности позволило установить факт удовлетворения условиям ограниченности и кусочно-непрерывности на множестве определения [4, 7].

На рис. 2 представлена структурная схема обобщенного алгоритма синтеза СОБ. Данная схема имеет двухуровневую вложенность (решения задач C1 и C2), а также трехуровневую вложенность при решении задачи C1.

Вложенность по задачам требуется для поиска качественно нового множества пространственно-временных состояний СОБ в случае, если традиционные среды, физические и другие естественно-научные основы не позволяют СОБ решать поставленные задачи с требуемой ЭФ. В трехуровневой вложенности особое место занимает внешний цикл по корректировке исходных данных, выдаваемых заказчиком.

Таким образом, предложенный подход позволяет при синтезе модели и способов функционирования системы обеспечения безопасности рассмотреть постановку задачи, основанную на решении интегральных уравнений, установив при этом возможность формирования модели и способов функционирования СОБ, удовлетворяющих требуемому значению показателя эффективности. С целью получения наилучших значений характеристик модели и способов функционирования системы обеспечения безопасности на множестве возможных значений в дальнейшем необходимо рассмотреть постановку задачи, основанную на решении вариационной задачи.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ, грант № МК-15.2011.10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильичев, А.В. Эффективность проектируемых элементов сложных систем [Текст] / А.В. Ильичев, В.Д. Волков, В.А. Грушанский. – М.: Высш. шк., 1982. –174 с.
2. Ильичев, А.В. Эффективность проектируемой техники [Текст] / А.В. Ильичев. – М.: Машиностроение, 1991. –215 с.
3. Бурлов, В.Г. Основы моделирования социально-экономических и политических процессов (Методология. Методы): Учеб. пособие [Текст] / В.Г. Бурлов. –СПб.: НП «Стратегия будущего», 2007. –267 с.
4. Матвеев, А.В. Системное моделирование управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций: Дис. ... канд. техн. наук [Текст] / А.В. Матвеев. –СПб.: Изд-во СПб УГПС МЧС России, 2007. –150 с.
5. Матвеев, А.В. Основы теории анализа и управления риском в чрезвычайных ситуациях [Текст] / А.В. Матвеев, В.Г. Бурлов, В.В. Матвеев [и др.]. –СПб.: НПО «Стратегия будущего», 2003. –407 с.
6. Ростовцев, Ю.Г. Задачи знакового моделирования. Ч.1: Методологические аспекты знакового моделирования [Текст] / Ю.Г. Ростовцев. –СПб.: Изд-во ВИКА им. А.Ф.Можайского, 1996. –147 с.
7. Матвеев, А.В. Аналитическая модель системы управления пожарной безопасностью АЭС / А.В. Матвеев, М.В. Иванов, А.Б. Шевченко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 6. –С. 91–95.



УДК 004.942

Л.А. Галиуллин, Е.В. Зубков, Д.И. Мочалов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Улучшение параметров двигателей возможно лишь при тщательном изучении происходящих в них процессов, т. к. легкодоступные резервы улучшения их конструкции практически уже исчерпаны.

В связи с этим приобрело особую значимость исследование двигателей на переходных и неустановившихся режимах с использованием специальных стендов, созданных для этих целей, что значительно сокращает время и продолжительность доводочных работ [1].

С помощью математического моделирования (ММ) можно проанализировать протекание отдельных рабочих процессов и всего рабочего цикла, прогнозировать основные показатели и характеристики двигателя. Модель не может быть полностью адекватна объекту и отражает лишь определенные его свойства, представляющие интерес для целей конкретного исследования [2].

В процессе работы над автоматизированной системой испытаний двигателя реальной необходимостью становится определение математической модели двигателя для настройки параметров АСИ дизельных двигателей. Знание математической модели дизельных двигателей обеспечивает возможность учета динамических свойств двигателя при разработке систем автоматического управления и автоматического регулирования. Кроме того, эти уравнения могут использоваться для управления режимами работы дизельных двигателей с помощью ЭВМ в ходе стендовых испытаний [3].

Модели строятся в виде систем дифференциальных, интегральных, алгебраических уравнений и др.

Представление модели управления режимами испытаний дизеля в виде графа. На рис. 1 в виде графа представлена модель управления дизельным двигателем. Здесь $U(t) = (U_1(t), U_2(t), \dots, U_p(t))^T$ – вектор входных параметров модели; $Y(t) = (Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_z(t))^T$ – вектор выходных параметров модели; $X(t) = (X_1(t), X_2(t), \dots, X_m(t))^T$ – вектор переменных состояния.

Вектор входных параметров $U(t)$ определяет следующие операции: управление частотой вращения вала двигателя, тормозным устройством, температурами масла, топлива, охлаждающей жидкости, имитация условий эксплуатации двигателя (например, имитация погодных условий) и т. д.

Вектор выходных параметров $Y(t)$ определяет контролируемые параметры двигателя, например, частоту вращения вала двигателя, расход топлива, дымность и т. д.

Вектор переменных состояния $X(t)$ определяет функционирование модулей двигателя и управляющих устройств, таких, как рейка топливного насоса высокого давления (ТНВД), тормозное устройство и т. д.

Данный граф в зависимости от требований качества создаваемой математической модели позволяет связывать или не связывать переменные модели, установив весовые коэффициенты на дугах графа равными нулю.

Математическая модель управления режимами испытаний дизеля. Модель дизельного двигателя с наддувом как объект, управляемый по частоте вращения коленчатого вала, описывается линейным дифференциальным уравнением [4, 5]:

$$T_2^2 \frac{d^2 \omega(t)}{dt^2} + T_1 \frac{d\omega(t)}{dt} + T_0 \omega(t) = T_h \frac{dh(t)}{dt} + K_h h(t) - T_M \frac{dM_c(t)}{dt} - K_M M_c(t), \quad (1)$$

где $\omega(t)$ – частота вращения коленчатого вала; $h(t)$ – перемещение рейки топливного насоса; $M_c(t)$ – значение нагрузки; t – время; $T_2, T_1, T_0, T_h, K_h, T_M, K_M$ – постоянные величины, зависящие от инерционности, величины хода рейки ТНВД и параметров нагрузочного устройства двигателя.

Эта модель содержит одну выходную величину $\omega(t)$ и две входных: $h(t)$ и $M_c(t)$. С учетом модели (1) и представления модели управления дизельным двигателем в виде графа (рис. 1), получим граф, изображенный на рис. 2. Здесь ω и M_c – входные параметры требуемой частоты враще-

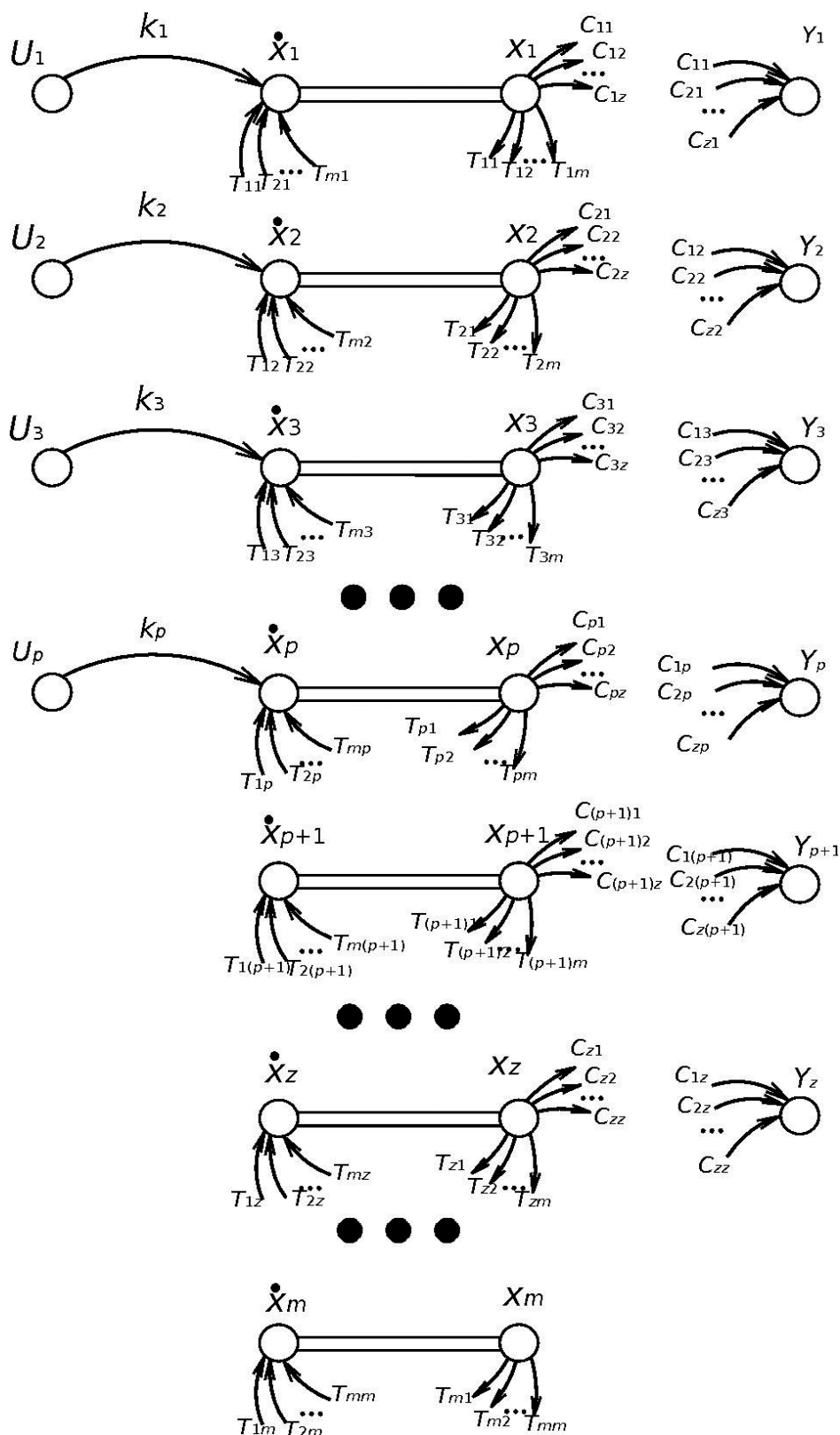


Рис. 1. Представление модели управления дизельным двигателем в виде графа

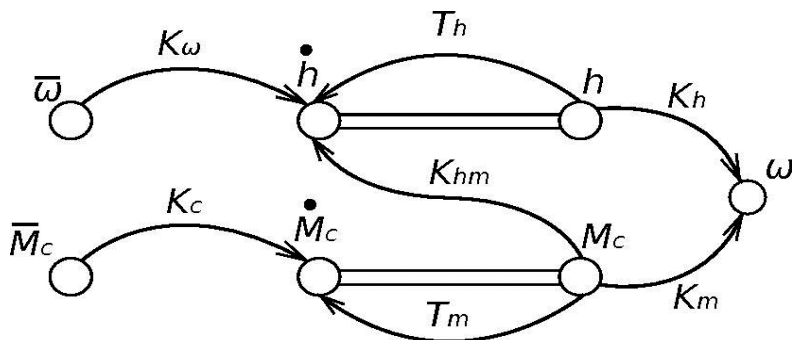


Рис. 2. Граф представления модели управления дизельного двигателя с двумя входными и одним выходным значениями

ния вала двигателя и нагрузки, соответственно; h и M_C – переменные, определяющие положение рейки ТНВД и нагрузку, соответственно; ω – выходной сигнал, показывающий частоту вращения вала двигателя.

В соответствии с приведенным графом, математическая модель управления дизельным двигателем может быть представлена в виде формул:

$$\begin{cases} \frac{dh(t)}{dt} = T_h \cdot h(t) + K_{hm} \cdot M_C(t) + K_{\omega} \cdot \varpi(t) + 0 \cdot \overline{M_C} \\ \frac{dM_C(t)}{dt} = 0 \cdot h(t) + T_m \cdot M_C(t) + 0 \cdot \varpi(t) + K_c \cdot \overline{M_C} \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega = K_h \cdot h(t) + K_m \cdot M_c(t). \quad (3)$$

Проверка адекватности полученной модели управления режимами испытаний дизеля. Модель управления дизельным двигателем, представленная в виде формул (2) и (3), может использоваться для имитационного моделирования режимов испытаний с помощью пакета SciLab. Для этого необходимо получить векторную передаточную функцию $W(p)$:

$$W(p) = C(p \cdot E - A)^{-1} \cdot B. \quad (4)$$

Здесь A, B, C – матрицы и вектор, получаемые из коэффициентов формул (2) и (3). Таким образом,

$$A = \begin{pmatrix} T_h & K_{hm} \\ 0 & T_m \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} K_\omega & 0 \\ 0 & K_c \end{pmatrix}, C = (K_h \quad K_m).$$

Подставляя в формулу (4) значения A , B , C получим векторную передаточную функцию:

$$\begin{aligned}
W(p) &= \\
&= \left(\frac{K_h \cdot K_\omega}{p - T_h} \frac{K_h \cdot K_{hm} \cdot K_c + K_m \cdot K_c (p - T_h)}{(p - T_h) \cdot (p - T_m)} \right) = \\
&= \left(\frac{K_h \cdot K_\omega}{p - T_h} \frac{K_h \cdot K_{hm} \cdot K_c + K_m \cdot K_c (p - T_h)}{p^2 - (T_h + T_m)p + T_h \cdot T_m} \right). \tag{5}
\end{aligned}$$

Для получения коэффициентов, определяющих инерционность, величину хода рейки ТНВД и параметры нагрузочного устройства с помощью метода наименьших квадратов для полученной модели, воспользуемся экспериментальной характеристикой зависимости частоты вращения вала двигателя КАМАЗ 740.60 от времени. В результате коэффициенты примут следующие значения: $T_h = -3,333$; $T_m = 0,933$; $K_\omega = 0,008$; $K_h = 120$; $K_m = 0,68$; $K_c = -1,32$; $K_{hm} = -0,005$, а векторная передаточная функция (5) примет вид:

$$W(p) = \left(\frac{1}{1 + 0,3 \cdot p} \quad \frac{-2,16 - 0,9 \cdot p}{3,2 + 2,4 \cdot p + p^2} \right). \quad (6)$$

В процессе проведения испытания двигателя КАМАЗ 740.60 получены данные, снятые по международному стандарту 1585 в стационарных режимах на стенде КИ-15711-01 и использованные для построения характеристик одного из этапов испытаний дизельных двигателей.

Произведены измерения и запись на автоматизированную установку по сбору и обработке поступающих данных следующих параметров: крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала.

Экспериментальная установка состоит из исследуемого объекта – двигателя и имитатора переменного режима нагрузки.

Экспериментальные исследования двигателя при неустановившейся нагрузке:

1) нагружая двигатель, обязательно выжидают более 20 мин, пока M_c и ω не станут постоянными, и только потом производят замер;

2) максимальный момент сопротивления тормозной установки при проведении экспериментов подбирается таким образом, чтобы обороты коленчатого вала двигателя не уменьшались ниже

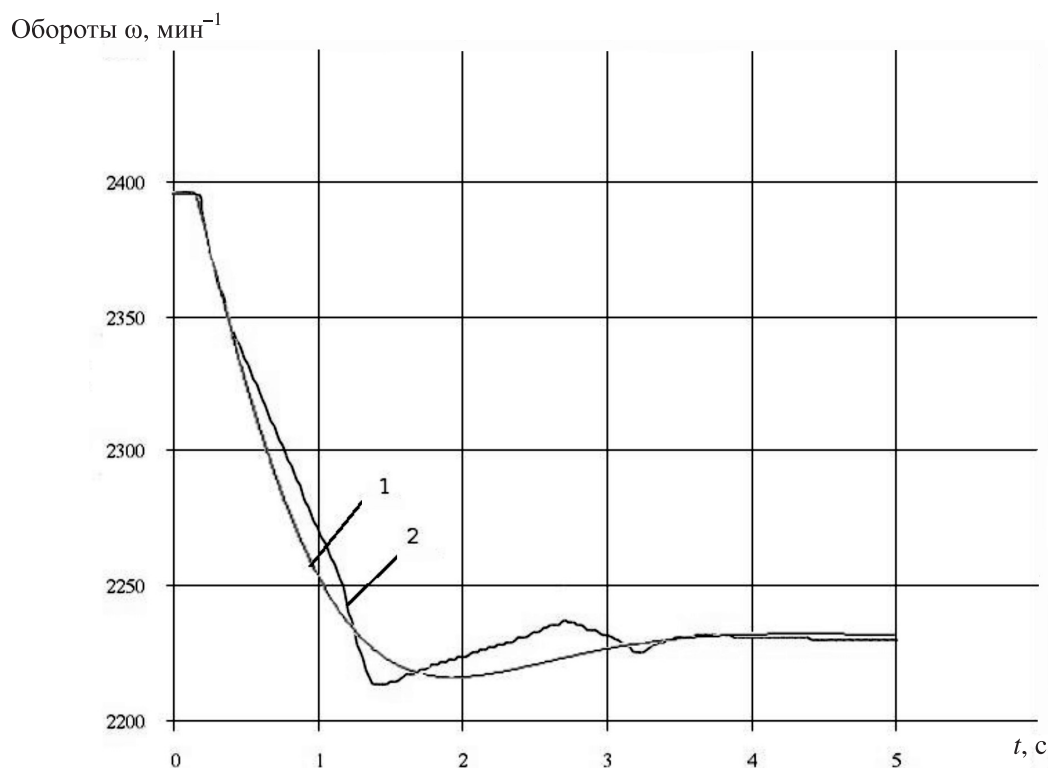


Рис. 3. Переходные характеристики дизельного двигателя
1 – смоделированная; 2 – экспериментальная

2200 мин⁻¹ при набросе нагрузки, т. к. двигатель при уменьшении частоты вращения вала ниже этого значения начинает работать с перегрузкой;

3) результат экспериментальных исследований – характеристика работы дизельных двигателей, полученная в режиме, когда $h = \text{const} = \text{max}$, а $M_c = \text{var}$ (происходит наброс нагрузки);

График на рис. 3 характеризует работу двигателя в режиме наброса нагрузки. По нему видно, что после прогрева двигателя происходит наброс нагрузки на вал, обороты двигателя снижаются, и спустя примерно 4 с дизельный двигатель начинает работать в установившемся режиме. При испытаниях максимальная нагрузка $M_c = 244,12 \text{ нм}$.

Такое совмещение характеристик дает представление о точности моделирования. На участках, максимально удаленных друг от друга, погрешность моделирования составляет по частоте вращения вала двигателя около 10 об./мин.

Для проверки адекватности модели применен метод наименьших квадратов. Путем сравнения экспериментальной переходной характеристики и смоделированной определена погрешности мо-

делирования. Экспериментальная характеристика имеет погрешность $\pm 0,5 \%$, определяемую техническими характеристиками выбранного испытательного стенда. Погрешность смоделированной характеристики относительно экспериментальной составляет $0,076 \pm 0,04 \%$ с надежностью 99 %, что говорит об адекватности модели.

К достоинствам предложенной математической модели, по сравнению с использовавшейся ранее, можно отнести ее большую универсальность, что позволяет учитывать любое число факторов, влияющих на систему испытаний.

Представление модели в виде графа помогает легко обнаружить связи между элементами испытательного стенда и внешними факторами, описав их в виде системы дифференциальных уравнений. Решение этих уравнений позволит получать вектора управления испытательным стендом для любых возможных режимов работы дизельных двигателей. Количество рассматриваемых факторов определяет точность моделирования, позволяя тем самым управлять качеством проведения испытаний.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биктимиров, Р.Л. Математическое обеспечение автоматизированных систем исследований и испытаний двигателей внутреннего сгорания [Текст] / Р.Л. Биктимиров, И.Х. Садыков, А.Х. Хайруллин. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
2. Луканин, В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учебник для вузов [Текст] / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Т.Ю. Кричевская [и др.]; под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. – М.: Высш. шк., 2005. – 2-е изд., перераб. и доп. – 414 с.
3. Луканин, И.Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС: Учебник для вузов [Текст] / И.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Т.Ю. Кричевская [и др.]; под ред. И.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. – М.: Высш. шк., 2005. – 2-е изд., перераб. и доп. – 414 с.
4. Лоусон, Ч. Численное решение задач методом наименьших квадратов [Текст] / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М.: Наука, 1986. – С. 15–19.
5. Крутов, В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания [Текст] / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 415 с.

УДК 62-126, 62-232.1, 004.942

*Н.Н. Куриков, Н.Н. Шабров, Н.Г. Мелещенко***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ В ПРОУШИНАХ ПРИЦЕПНОГО ШАТУНА ЗВЕЗДООБРАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Россия – одна из ведущих стран по производству судовых, тепловозных дизелей и дизель-генераторов. В настоящее время можно выделить восемь основных производителей тепловозных дизелей, 14 производителей судовых двигателей и 17–18 предприятий, производящих дизель-генераторы. Среди них такие флагманы дизелестроения, как ОАО «Коломенский завод», ОАО «Звезда», ОАО «Волжский моторный завод», ОАО «Барнаултрансмаш», ОАО «Пензадизельмаш», ОАО «Брянский моторостроительный завод», ОАО «РУМО» [5]. По конструкции дизели выпускаются самых разнообразных типов:

двухтактные крейцкопфные тронковые малооборотные (110–255 мин⁻¹) мощностью 1100–27300 кВт (ДКРН – ОАО «Брянский моторостроительный завод»);

четырёхтактные рядные и V-образные с турбонаддувом мощностью 450–5000 кВт, с частотой вращения 600–2000 мин⁻¹ (ЧН 30/38, Д 49 (ЧН 26/26) – ОАО «Коломенский завод», 12 ЧН 1820 – ОАО «Звезда»);

четырёхтактные в звездообразном исполнении (ЧН 16/17 – ОАО «Звезда»). Наряду с дизелями большой мощности, производятся дизели средней мощности 200–1000 кВт (1ПДГ4В – ОАО «Пензадизельмаш», ЧН 16.5/18.5 – ОАО «Дизельпром») и малой мощности 10–55 кВт (Ч 8.5/11 –

ОАО «Дагдизель», Ч 11/13 – ОАО «Рыбинские моторы»).

Кроме того, в эксплуатации находится большое количество дизелей устаревших конструкций.

Одна из актуальных задач проектирования нового двигателя и модернизации имеющейся конструкции – повышение его удельной мощности. Данная задача становится особенно важной для двигателей, применяемых на боевых торпедных, ракетных, ракетно-артиллерийских и десантных кораблях и катерах, патрульных таможенных и пограничных катерах, катерах береговой охраны, рейдовых тральщиках и пожарных судах, представительских, правительственных, разъездных и прогулочных катерах. На указанных типах судов применяются легкие высокооборотные 42- или 56-цилиндровые четырехтактные звездообразные дизельные двигатели водяного охлаждения с газотурбинным наддувом размерности ЧН 16/17.

Повышение удельной мощности двигателя может быть достигнуто снижением массы его компонент. Массы деталей шатунно-поршневой группы, в т. ч. прицепных шатунов, во многом определяют механические нагрузки в двигателе, снижение которых даст возможность уменьшить его общую массу при сохранении работоспособности. Возникает оптимизационная задача, цель которой – определение наилучшей формы при-

цепного шатуна (наилучшего распределения материала) при сохранении его прочностных и жесткостных характеристик [4].

Граничными условиями в оптимизационной задаче являются, среди прочих, силы, действующие на шатун со стороны других деталей, распределенные по поверхностям проушин. Сопоставимость размеров проушин с размерами шатуна исключает возможность следования принципу Сен-Венана при нагружении объекта, и возникает необходимость задания точного распределения сил. Данное распределение может быть определено путем решения задачи контактного взаимодействия прицепного шатуна с другими деталями двигателя.

Конструкция КШМ звездообразного двигателя

На рис. 1 представлена схема одной секции звездообразного двигателя. Секция состоит из семи цилиндров I – VII, где III – главный, а остальные – прицепные. Главный шатун входит в шарнирное соединение непосредственно с шейкой кривошипа (на рисунке не показан). Шатуны

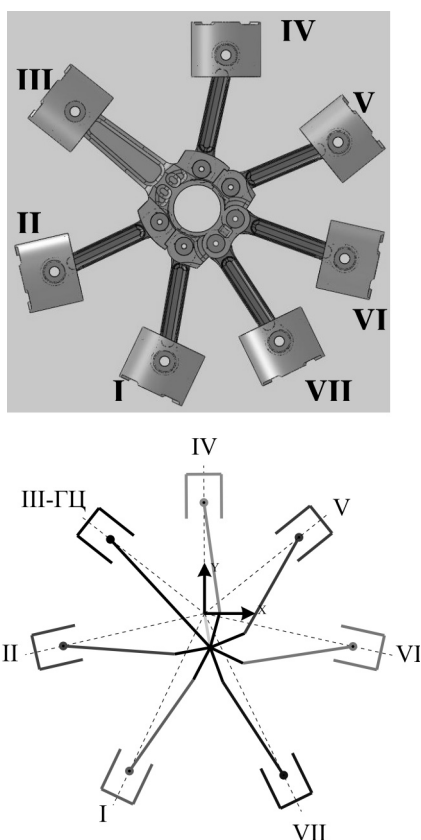


Рис. 1. Схема одной секции звездообразного двигателя

остальных цилиндров входят в шарнирные соединения с главным шатуном посредством пальцев, расположенных в кривошипной головке главного шатуна. Главный шатун разъемный.

Благодаря такой конструкции удастся достичь компактных размеров двигателя, имеющего 42 или 56 цилиндров. Диаметр цилиндра составляет 160 мм, ходом поршня 170 мм. Расположение цилиндров в виде 7-лучевой звезды с углом развала между блоками $51^{\circ}25'43''$.

Кинематические параметры механизма, необходимые для определения действующих нагрузок

Кинематика кривошипно-шатунного механизма охватывает следующий круг вопросов: угловые перемещения и скорость кривошипа, угловые перемещения, скорость и ускорение шатуна, линейные перемещения, скорость и ускорение поршня. Принимается аналитический метод изложения, поэтому все кинематические величины выражаются аналитически в виде функций от геометрических размеров механизма и независимого переменного, за которое принимается угол поворота кривошипа α . При обычных кинематических и динамических расчетах угловая скорость кривошипа полагается постоянной [4].

На рис. 2 дана схема кривошипно-шатунного механизма с одним прицепным шатуном, на которой проставлены основные обозначения для этого механизма: R – радиус кривошипа коленчатого вала, м; L – длина главного шатуна, м; α – угол поворота кривошипа от оси главного цилиндра, рад; β – угол отклонения оси главного шатуна от оси главного цилиндра, рад; r – расстояние оси пальца прицепного шатуна от оси подшипника кривошипной головки главного шатуна, м; l – длина прицепного шатуна, м; α_1 – угол поворота кривошипа от оси рассматриваемого бокового цилиндра, рад; β_1 – угол отклонения (или угловое перемещение) оси прицепного шатуна от оси соответствующего бокового цилиндра, рад; γ – угол между осями бокового и главного цилиндров звезды, рад; γ_1 – угол между осью главного шатуна и плоскостью, проведенной через ось подшипника кривошипной головки главного шатуна и ось пальца прицепного шатуна, рад; ψ – разность между углами γ_1 и γ ($\psi = \gamma_1 - \gamma$), рад.

Рассматриваемый механизм двигателя ЧН16/17 имеет следующие геометрические па-

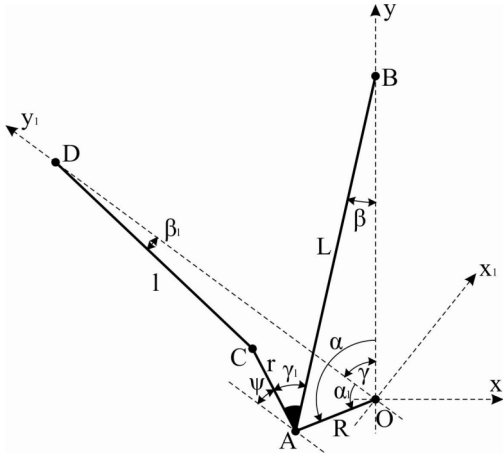


Рис. 2. Кривошипно-шатунный механизм с прицепным шатуном

параметры: $R = 0,085$ м, $r = 0,092$ м, $l = 0,268$ м, $L = 0,360$ м, количество цилиндров одной звезды двигателя $i = 7$, $\gamma = 360/i = 51,43^\circ$. Номинальная частота вращения коленчатого вала $n = 2000$ об/мин.

Неизвестные перемещения, скорости и ускорения звеньев механизма определяются начиная с главного цилиндра.

Угловое перемещение главного шатуна:

$$\beta(\alpha) = \arcsin\left(\frac{x_B(\alpha) - x_A(\alpha)}{L}\right),$$

где $x_A(\alpha)$, $x_B(\alpha)$ – координаты точек A и B в системе координат главного цилиндра (XY) (рис. 2):

$$x_A(\alpha) = -R \sin(\alpha), \quad x_B(\alpha) = 0.$$

Угловая скорость и угловое ускорение главного шатуна получаются отсюда дифференцированием по времени:

$$\omega(\alpha) = \beta'(\alpha) \cdot \dot{\alpha};$$

$$\varepsilon(\alpha) = \beta''(\alpha) \cdot \dot{\alpha}^2 + \beta'(\alpha) \cdot \ddot{\alpha},$$

поскольку угловая скорость коленчатого вала считается постоянной, то $\ddot{\alpha} = 0$, $\dot{\alpha} = n \frac{2\pi}{60}$.

Перемещение, скорость, ускорение поршня главного цилиндра (точка B на рис. 2):

$$y_B(\alpha) = y_A(\alpha) + L \cos(\beta(\alpha)); \quad y_A(\alpha) = R \cos(\alpha);$$

$$v_B(\alpha) = \frac{\partial y_B(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \dot{\alpha};$$

$$w_B(\alpha) = \frac{\partial v_B(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \dot{\alpha} = \frac{\partial^2 y_B(\alpha)}{\partial \alpha^2} \cdot \dot{\alpha}^2 + \frac{\partial y_B(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \ddot{\alpha}.$$

Для определения углового перемещения, скорости и ускорения прицепного шатуна, перемещения, скорости и ускорения поршня бокового цилиндра введем дополнительную систему ко-

ординат, одна из осей которой совпадает с осью бокового цилиндра (X_1Y_1). В этой системе координат определим положение точек A , C и D как функций независимой переменной α :

$$\alpha_i(\alpha) = \alpha - \gamma;$$

$$x_1^A(\alpha) = -R \sin(\alpha_i(\alpha));$$

$$y_1^A(\alpha) = R \cos(\alpha_i(\alpha));$$

$$x_1^C(\alpha) = x_1^A(\alpha) + r \sin(\beta(\alpha) - \psi);$$

$$x_1^D = 0.$$

Угловые перемещение, скорость и ускорение прицепного шатуна:

$$\beta_i(\alpha) = \arcsin\left(\frac{x_1^D(\alpha) - x_1^C(\alpha)}{l}\right);$$

$$\omega_i(\alpha) = \beta_i'(\alpha) \cdot \dot{\alpha};$$

$$\varepsilon_i(\alpha) = \beta_i''(\alpha) \cdot \dot{\alpha}^2 + \beta_i'(\alpha) \cdot \ddot{\alpha}.$$

Перемещение, скорость, ускорение поршня главного цилиндра (точка D на рис. 2):

$$y_1^D(\alpha) = y_1^C(\alpha) + l \cos(\beta_i(\alpha)),$$

$$y_1^C(\alpha) = y_1^A(\alpha) + r \cos(\beta(\alpha) - \psi);$$

$$v_1^D(\alpha) = y_1^{D'}(\alpha) \cdot \dot{\alpha};$$

$$w_1^D(\alpha) = y_1^{D''}(\alpha) \cdot \dot{\alpha}^2 + y_1^{D'}(\alpha) \cdot \ddot{\alpha}.$$

Силы, действующие в КШМ

Силы, действующие в кривошипно-шатунном механизме, можно разделить на следующие силы: от рабочих газов в цилиндрах двигателя; от инерции двигающихся масс кривошипно-шатунного механизма; реакций связей; тяжести звеньев механизма.

Силы от рабочих газов определяются на основании индикаторной диаграммы двигателя, представляющей изменение давления рабочих газов в цилиндре на поршень по ходу поршня. Диаграмма получается различными способами. При проектировании нового двигателя ее строят на основании теплового расчета двигателя. Для динамического расчета существующего или проектируемого двигателя можно ограничиться так называемой *стандартной диаграммой*, которая строится на основании среднего эффективного давления, причем для ряда коэффициентов, необходимых для ее построения, принимают некоторые, выработанные практикой, средние значения. Наконец, для существующего работающего двигателя индикаторную диаграмму получают экспериментально посредством записи ее индикаторами.

У обычных двигателей индикаторные диаграммы для всех цилиндров одинаковы [2].

Имея индикаторную диаграмму, представляющую закон изменения давления газов на поршень в зависимости от пути поршня, и зная для данного кривошипно-шатунного механизма закон изменения пути поршня по углу поворота кривошипа α , легко найти давление газов на поршень, соответствующее любому углу поворота кривошипа α .

Сила избыточного давления на поршень определяется как

$$F_{\Gamma} = \int_{A_{\Pi}} (p_{\Gamma} - p_0) \cdot dA_{\Pi},$$

где p_{Γ} – удельное давление рабочих газов в цилиндре, определяемое по индикаторной диаграмме; p_0 – атмосферное давление на выхлопе; A_{Π} – площадь рабочей поверхности поршня.

На рис. 3 представлены силы избыточного давления на поршни цилиндров одной звезды. Начало черной кривой (ГЦ) соответствует верхней мертвой точке поршня главного цилиндра. Каждая последующая кривая получена сдвигом кривой ГЦ по направлению вращения коленчатого вала двигателя на величину угла, соответствующую верхней мертвой точке соответствующего цилиндра (см. рис. 2):

$$\alpha_m : y_1^D(\alpha_m) \rightarrow \max;$$

$$F_{\Gamma}^i(\alpha) = \begin{cases} F_{\Gamma}(\alpha - \alpha_m), \alpha - \alpha_m \geq 0; \\ F_{\Gamma}(4\pi + \alpha - \alpha_m), \alpha - \alpha_m < 0. \end{cases}$$

В качестве нагрузок, действующих на прицепной шатун, рассматриваются силы реакции поршневого и прицепного пальцев, силы инерции и силы тяжести. Силы инерции становятся известными сразу после кинематического расчета.

Для определения сил, действующих на пальцы головок прицепного шатуна со стороны поршня и главного шатуна, необходимо рассмотреть равновесие отдельной структурной группы ВВП шатун–поршень, равновесие шатуна, поршня и каждого пальца. Силы, действующие на звенья группы ВВП, показаны на рис. 4, где S^{pp1} – центр масс поршня в сборе с пальцем; S^r – центр масс прицепного шатуна; F^r – сила давления газов на поршень, Н; Φ^{pp1} – главный вектор сил инерции поршня в сборе с пальцем, Н; Φ^r – главный вектор сил инерции шатуна, Н; M_{ϕ}^r – главный момент сил инерции прицепного шатуна относительно его центра масс, кг·м²; M^{op} – момент реакции гильзы цилиндра на поршень, Н·м; G^{pp1} – суммарный вес поршня и поршневого пальца, Н; G^r – вес шатуна, Н; R^{op} – сила реакции, действующая со стороны гильзы цилиндра на поршень, Н; R^{p1r} – сила реакции, действующая со стороны поршневого пальца на прицепной шатун, Н; R^{p2r} – сила реакции, действующая со стороны прицепного пальца на прицепной шатун, Н.

При анализе группы поршневой палец объединяется с поршнем. Определению подлежат силы реакций связей R^{op} и R^{p2r} .

Для составления уравнений равновесия структурной группы ВВП необходимо воспользоваться принципом Германа–Эйлера–Даламбера для несвободной механической системы. Уравнения, представляющие сумму внешних сил и реакций связей, действующих на группу ВВП, а также сумму моментов внешних сил, реакций связей и сил инерции, действующих на прицепной шатун относительно оси поршневой головки:

$$F^{\Gamma} + \Phi^{pp1} + G^{pp1} + R^{op} + \Phi^r + G^r + R^{p2r} = 0;$$

$$M_{\phi}^r + DSr \times \Phi^r + DSr \times G^r + DC \times R^{p2r} = 0,$$

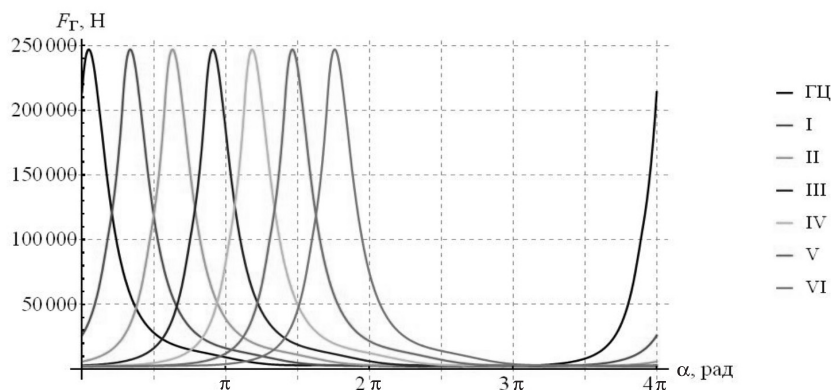


Рис. 3. Силы избыточного давления на поршни цилиндров одной звезды

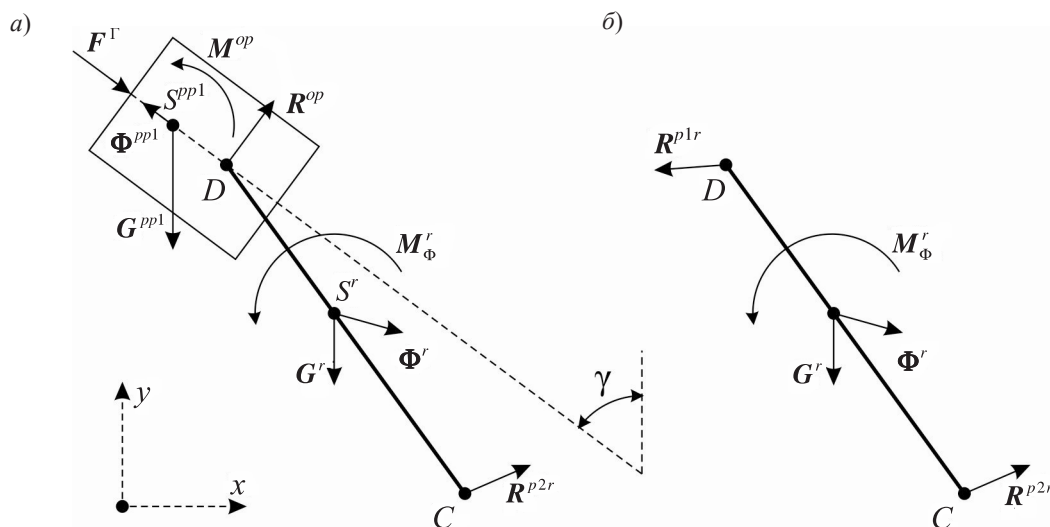


Рис. 4. Силы, действующие на структурную группу ВВП (а) и на прицепной шатун (б)

где DSr и CD – векторы, соединяющие центр масс прицепного шатуна с прицепной головкой и прицепную головку шатуна с поршневой соответственно. Из этой системы уравнений определяются силы реакций связей R^{op} и R^{p2r} .

Далее, из уравнения равновесия шатуна определяется сила реакции R^{p1r} , действующая со стороны поршневого пальца на прицепной шатун:

$$R^{p1r} = -(\Phi^r + G^r + R^{p2r}).$$

Векторные диаграммы реакций R^{p1r} и R^{p2r} представлены на рис. 5. Все прицепные шатуны работают в примерно одинаковых условиях.

Для цилиндра I силы реакции в проушинах прицепного шатуна в момент времени, соответствующий максимальному давлению рабочих га-

зов, представлены в табл. 1 (в системе координат, связанной с шатуном, ось X направлена вдоль шатуна, ось Y направлена в сторону цилиндра II).

Конечно-элементная модель шатунно-поршневой группы

Для точного определения распределения контактных давлений, возникающих на поверхностях проушин прицепного шатуна, необходимо учесть податливости деталей шатунно-поршневой группы, находящихся в непосредственной близости с прицепным шатуном. Для этого строится конечно-элементная модель части механизма, рис. 6. КЭ модель построена с помощью пре-процессора Altair Hypermesh.

При построении КЭ сетки учтена симметрия

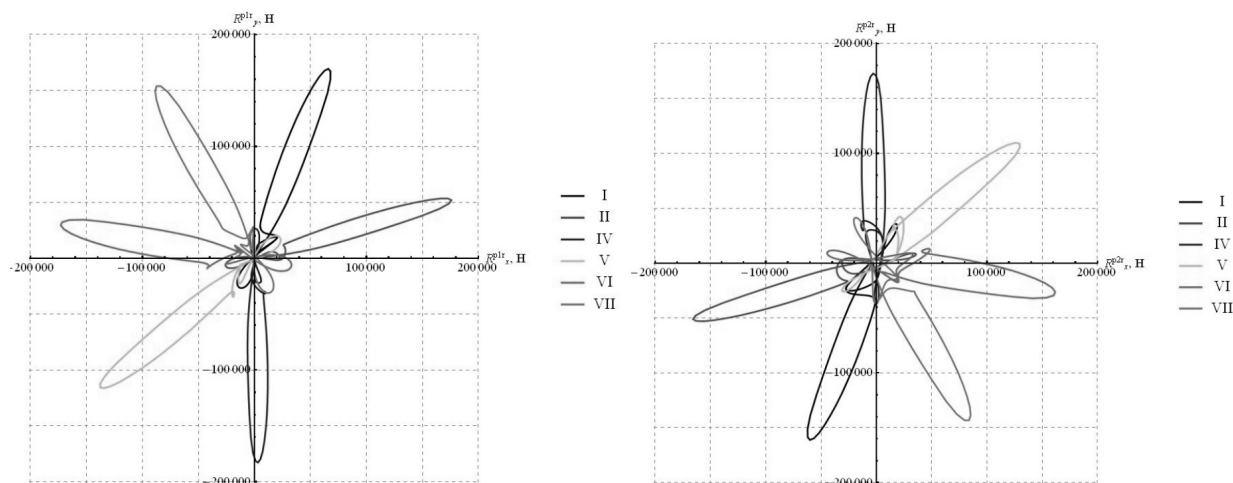


Рис. 5. Векторные диаграммы сил реакции прицепного и поршневого пальцев

Таблица 1

Значения сил реакций в проушинах прицепного шатуна

	X-компонента, Н	Y-компонента, Н	Абсолютная величина, Н
R^{p1r}	181076	-710	181077
R^{p2r}	-171988	-1575	171996

деталей механизма относительно плоскости движения прицепного шатуна. Рассмотрена только четверть крышки главного шатуна (две плоскости симметрии). В граничных условиях учтены:

условия симметрии;

невозможность перемещения узлов крышки, лежащих на плоскости разреза, в направлении, перпендикулярном этой плоскости;

невозможность радиального перемещения узлов крышки, принадлежащих цилиндрической поверхности, по которой главный шатун сажается на коленчатый вал;

возможность перемещения поршня и поршневого пальца только вдоль оси поршня.

Таким образом, рассматриваемая часть главного шатуна оказывается полностью закрепленной, ее перемещения как твердого тела невозможны. Поршень может перемещаться только вдоль своей оси вместе с пальцем. Перемещения прицепного шатуна, прицепного пальца, прицепной

и поршневой втулок ограничены контактными взаимодействиями деталей между собой. С целью предотвращения перемещения этих объектов как твердых тел до установления всех контактов к ним прикреплены слабые пружинки.

Внешние нагрузки приложены к модели следующим образом. К поверхности поршня приложено давление рабочих газов, определенное по индикаторной диаграмме в соответствии с рассматриваемым положением механизма. Ко всем деталям, кроме главного шатуна (закрепленного), приложены силы тяжести. Прицепной шатун совершает плоское движение и испытывает влияние сил инерции, которые в соответствии с теоремой об ускорениях точек плоской фигуры можно разделить на три группы: сила инерции в поступательном движении оси поршневой головки, сила инерции во вращательном движении вокруг оси поршневой головки и центробежная сила инерции в том же вращении.

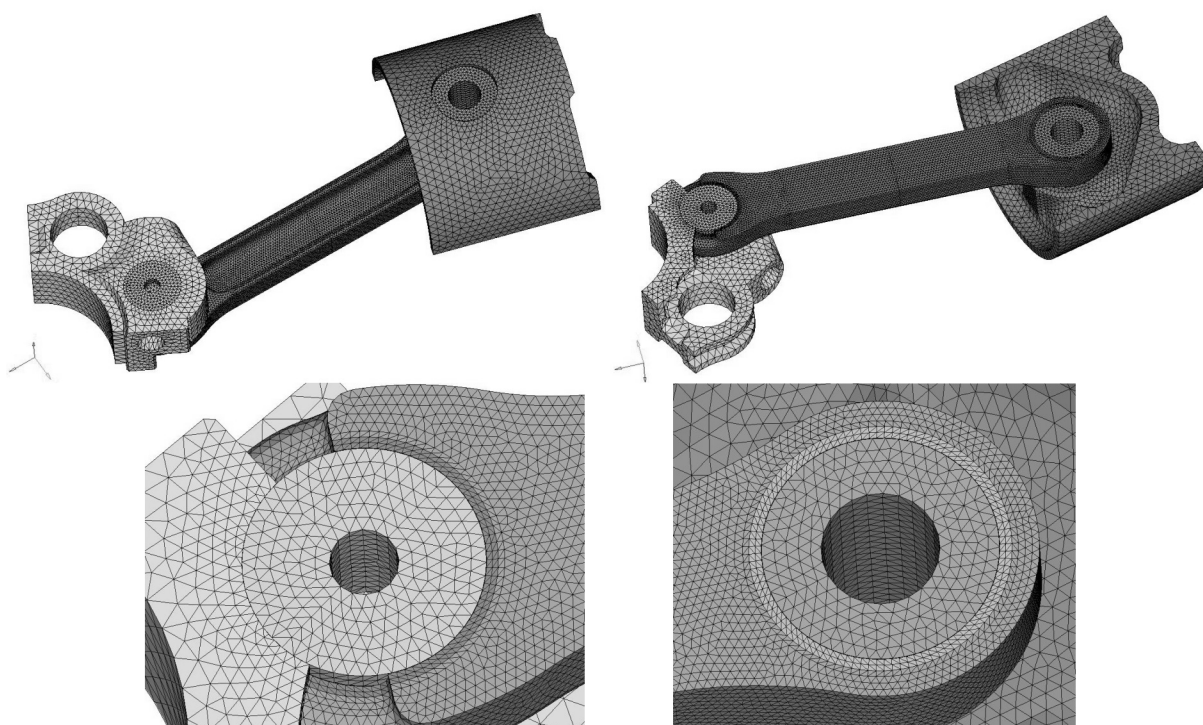


Рис. 6. КЭ модель шатунно-поршневой группы

Все приложенные нагрузки сведены в табл. 2.

КЭ сетка состоит из 226 171 элементов, построенных на 287 041 узле. Для прицепного шатуна, втулок и пальцев использованы десяти-, а для главного шатуна и поршня – четырехузловые тетраэдры. Выбор типа элемента обусловлен априорными представлениями о влиянии жесткостей отдельных деталей сборки на характер распределения контактных давлений по поверхностям проушин прицепного шатуна. Главный шатун и поршень воздействуют на прицепной шатун через палец и втулку, т. е. отклонение их модельных жесткостей от действительных величин в наименьшей степени сказывается на результате решения.

Общее количество контактных элементов в модели – 25 014. Необходимо отметить, что не все контактные элементы используются – в данном положении механизма контактные поверхности

(являющиеся цилиндрическими) соприкасаются лишь по некоторым участкам. Этот факт можно было бы отнести к недостаткам модели (большое количество неиспользуемых контактных элементов увеличивает время расчета), однако это позволяет с минимальными временными затратами перестроить модель для расчета механизма в другом положении, а также уберегает от возможных ошибок при задании контактных элементов наперед неизвестной площади контактной поверхности [7].

В качестве типа контактного взаимодействия выбран жесткий контакт поверхность–поверхность, наиболее подходящий для общих случаев взаимодействия [1].

Материалы компонент сборки: алюминиевый сплав для поршня, сталь для главного и прицепного шатунов и пальцев, бронза для втулок. Поскольку подразумевается, что механизм ра-

Таблица 2

Нагрузки, приложенные к компонентам сборки

Деталь шатунно-поршневой группы	Приложенные нагрузки
Главный шатун	Не нагружен
Прицепной шатун	Сила инерции в поступательном движении оси поршневой головки Сила инерции во вращательном движении вокруг оси поршневой головки Центробежная сила инерции во вращательном движении вокруг оси поршневой головки Сила тяжести
Поршень	Сила инерции в поступательном движении Давление рабочих газов Сила тяжести
Поршневой палец	Сила инерции в поступательном движении Сила тяжести
Прицепной палец	Не нагружен, т. к. запрессован в главном шатуне
Поршневая втулка	Центробежная сила инерции во вращательном движении вокруг оси поршневой головки Сила инерции в поступательном движении Сила инерции во вращательном движении вокруг оси поршневой головки Сила тяжести
Прицепная втулка	Центробежная сила инерции во вращательном движении вокруг оси поршневой головки Сила инерции в поступательном движении Сила инерции во вращательном движении вокруг оси поршневой головки Сила тяжести

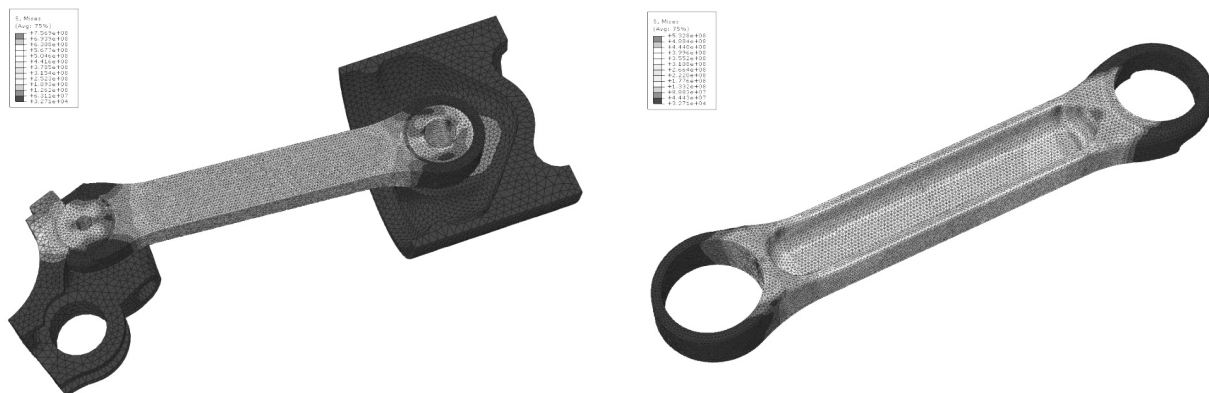


Рис. 7. Эквивалентные напряжения Мизеса во всей сборке и отдельно в прицепном шатуне

ботает в нормальном режиме и материал не выходит за пределы упругой стадии, модели материалов приняты линейными.

Результаты расчета

Расчет проведен с помощью пакета КЭ анализа Abaqus 6.9.3. В данном разделе представлены результаты расчетов механизма в положении, соответствующем моменту максимального давления рабочих газов в цилиндре. На рис. 7 показано распределение эквивалентных напря-

жений Мизеса.

На рис. 8 показано распределение контактных давлений в поршневой и прицепной проушинах прицепного шатуна.

Картина распределения контактных давлений качественно соответствует результатам, представленным в [3].

Воспользовавшись в среде Abaqus следующим Python-макросом, можно определить главные вектора узловых сил в проушинах поршневой и прицепной головок шатуна:

```
from odbAccess import*
from abaqusConstants import*
odb = session.odbs[session.odbs.keys()[-1]]
lastFrame = odb.steps['applyPressure'].frames[-1]
fieldOut = lastFrame.fieldOutputs['CNORMF']
nSet = odb.rootAssembly.instances['PART-1-1'].nodeSets['LINKROD_LOWER']
subSet = fieldOut.getSubset(region = nSet)
RF = subSet.values
Rp2rDCx = 0
Rp2rDCy = 0
Rp2r = 0
for f in RF:
    Rp2rDCx = Rp2rDCx + f.data[0]
    Rp2rDCy = Rp2rDCy + f.data[1]
Rp2r = sqrt( Rp2rDCx**2 + Rp2rDCy**2 )
print «Rp2rDCx = », 2*Rp2rDCx, «; Rp2rDCy = », 2*Rp2rDCy, «; Rp2r = », 2*Rp2r
```

Данный макрос обходит все узлы, входящие в именованный набор *LINKROD_LOWER*, и суммирует соответствующие компоненты контактных узловых сил, вычисляя тем самым главные вектора. В табл. 3 сведены результаты аналитического расчета сил реакций (см. табл. 1) и результаты КЭ расчета.

Результаты применения вычислительного кластера

КЭ расчеты осуществлены с помощью решателя Abaqus/Standard версии 6.9.3 (при использовании прямого решателя систем уравнений) в статической постановке, без учета нелинейных геометрических эффектов. Расчеты проведены на

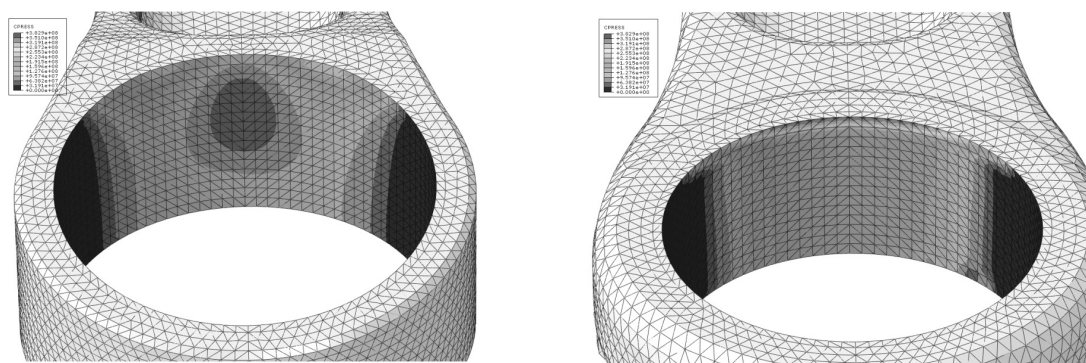


Рис. 8. Распределение контактных давлений в поршневой (слева) и прицепной (справа) проушинах прицепного шатуна

Таблица 3

Сопоставление значений сил реакций поршневой и прицепной головок шатуна, полученных аналитическим путем и с помощью МКЭ

	Аналитический расчет	КЭ расчет	Расхождение, %
$R^{p1r}_{x^0}$, Н	181076	182981	1,1
$R^{p1r}_{y^0}$, Н	-710	-711	0,1
$R^{p2r}_{x^0}$, Н	-171988	-173868	1,1
$R^{p2r}_{y^0}$, Н	-1575	-1576	0,1

вычислительном кластере Центра коллективного пользования механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Проведена серия расчетов с использованием различного количества ядер (2, 6, 12, 24) для одной и той же КЭ сетки при одном и том же положении механизма. Минимальное количество использованных ядер, равное двум, обусловлено размерностью задачи и конфигурацией вычислительного кластера. Кластер состоит из 11 узлов, оснащенных двумя четырехядерными процессорами Intel Quad Core и 8 Гб оперативной памяти каждый. Данная задача

требовала порядка 10–11 Гб оперативной памяти, в связи с чем решение ее было возможным не менее, чем на двух узлах.

Согласно информационным файлам, генерируемым Abaqus в процессе работы, количество уравнений составляло порядка 1 370 000, на каждой итерации осуществлялось $(1...2)e12$ операций с плавающей запятой.

Время решения задач и загрузки узлов кластера сведены в табл. 4.

Эффект от использования различных количеств ядер оценивался по параметру Wallclock time для всего расчета и для одной итерации

Таблица 4

Результаты применения вычислительного кластера для решения задачи

Число использованных ядер / число узлов	Wallclock time, с, на задачу	Wallclock time, с, на одну итерацию, в среднем	Загрузка узла 1, % от макс. возможной / % от макс. разрешенной	Загрузка узла 2, % от макс. возможной / % от макс. разрешенной	Загрузка узла 3, % от макс. возможной / % от макс. разрешенной
2 / 2	137236	212	10 / 80	10 / 80	Не использовался
6 / 2	40820	50,4	30 / 80	30 / 80	Не использовался
12 / 2	38438	35,6	42 / 56	30 / 40	Не использовался
24 / 3	39836	40,7	50 / 50	45 / 45	45 / 45

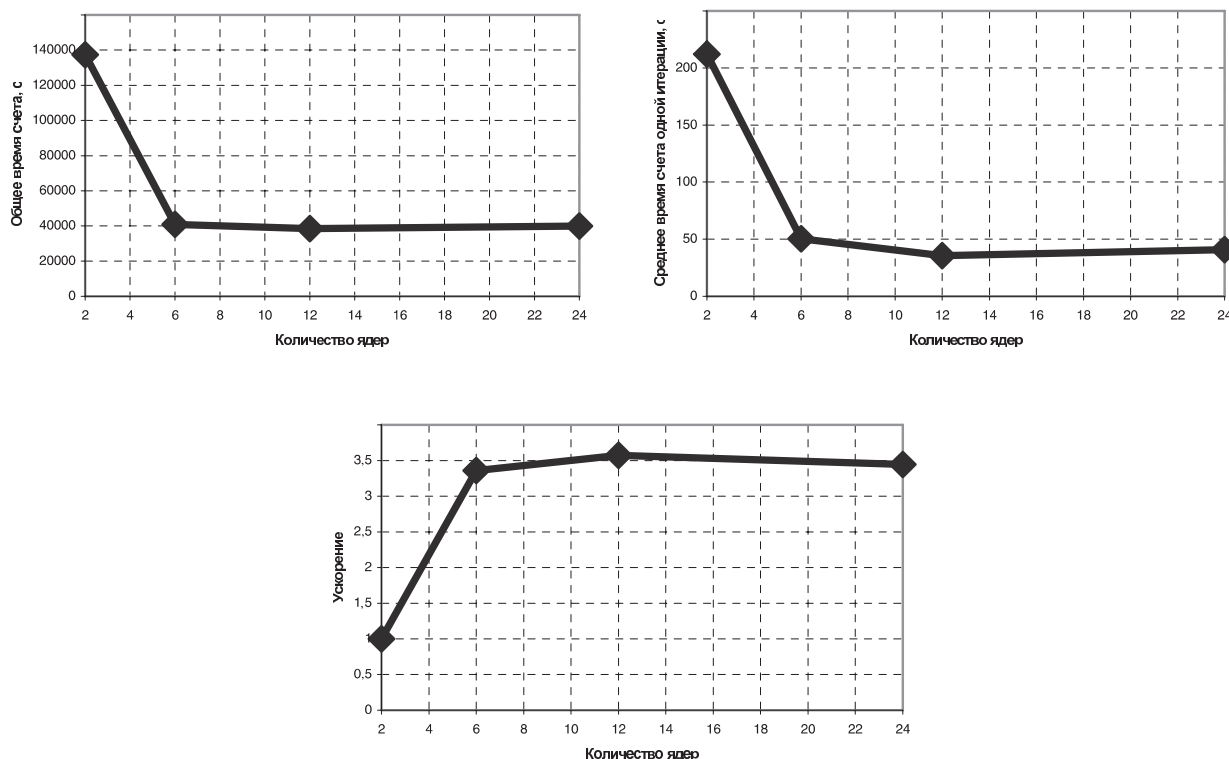


Рис. 9. Зависимость общего времени счета, среднего времени счета одной итерации и ускорения от числа использованных ядер

(в среднем). Представляется, что данный параметр лучше подходит для оценки с точки зрения пользователя, т. к. он является суммарным физическим временем, затраченным на решение задачи с учетом всех операций передачи данных – время между моментом старта задачи и моментом ее фактического завершения [6].

Максимально возможная загрузка узла соответствует загрузке всех восьми ядер. Максимально разрешенная загрузка узла определяется количеством ядер, которое задается пользователем в конфигурационном файле `abaqus_v6.env`, например, строка `mp_host_list=[['maple',4], ['pine',4]]` означает, что при решении задачи могут использоваться только узлы с именами `maple` и `pine`, на каждом может использоваться не более четырех ядер [1]. Оценка загрузки узлов произведена с помощью системы мониторинга высокопроизводительных вычислительных систем `Ganglia`.

Диаграммы зависимостей общего времени счета, среднего времени счета одной итерации и ускорения (определенного как отношения `Wallclock time` каждого варианта к первому),

построенные на основании табл. 4, приведены на рис. 9.

Диаграммы на рисунке показывают, что для решения подобной задачи целесообразно применять до 12 ядер. Дальнейшее увеличение числа ядер приводит к замедлению процесса, что может быть связано с увеличением времени, необходимого на обмен данными между ними.

В статье приведено решение задачи контактного взаимодействия деталей кривошипно-шатунного механизма звездообразного двигателя. Сопоставление результатов аналитического и численного решения задачи приводит к выводу о правильности обоих подходов, а также дает основание утверждать, что полученные поля распределения контактных давлений (рис. 8) пригодны для дальнейшего использования в качестве граничных условий при более подробном изучении конструкции прицепного шатуна.

Анализ эффективности применения вычислительного кластера позволяет получить представление о количестве ядер, которое целесообразно использовать для решения этой и подобных задач.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abaqus version 6.9 Documentation [Электронный ресурс]
2. **Биргер, И. А.** Авиационные поршневые двигатели [Текст] / И. А. Биргер [и др.] Под ред. И. Ш. Неймана. – М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1950.
3. **Василевский, Б. И.** Исследование напряженно-деформированного состояния шатунов двигателей внутреннего сгорания: Дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Б. И. Василевский. – Л., 1978.
4. **Ливенцев, Ф. Л.** Двигатели со сложными кинематическими схемами [Текст] / Ф. Л. Ливенцев. – Л., Машиностроение, 1973.
5. Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний [Текст]. – М.: Издат. центр Техинформ МАИ, 2009. – № 2.
6. **Шабров, Н. Н.** Программно-аппаратные комплексы виртуальной реальности предсказательного моделирования в научных и инженерных исследованиях [Текст] / Н. Н. Шабров // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – С. 183–189.
7. **Шабров, Н. Н.** Моделирование и визуализация в виртуальных и индуцированных средах [Текст] / Н. Н. Шабров, С. Г. Орлов, Н. Н. Куриков // Междунар. науч. конф. Параллельные вычислительные технологии. – 2010. – С. 640–642.

УДК 658.012.011.56

Е. В. Морозова

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Любая управленческая деятельность тесно связана с принятием соответствующих решений. Принятие решений возможно на основании знаний об объекте управления, о процессах, объективно в нем протекающих и могущих произойти с течением времени, иначе говоря, требуется наличие адекватной модели объекта, характеризующей эффективность (качество, оптимальность и т. д.) принятого решения.

Стеклотарное производство – одна из перспективных отраслей промышленности в России. Это производство является непрерывным, и его модификация либо модернизация должна занимать как можно меньше времени. Поэтому для успешной конкуренции российской стекольной промышленности на мировом рынке необходимо ускоренное внедрение инноваций в процесс производства стеклянной тары.

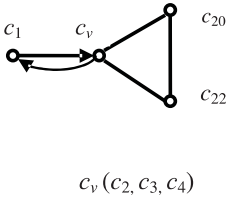
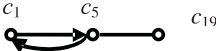
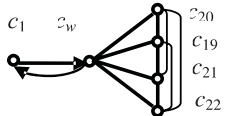
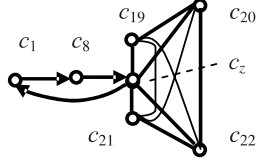
Один из основных сдерживающих факторов при решении этих задач – отсутствие развитого программно-методического обеспечения, позволяющего на основе современных информационных технологий оперативно осуществлять моделирование и проектирование производственных

линий, комплексов и агрегатов как сложных производственных систем. Существующее многообразие объектов сложных систем, стохастический и динамический характер их функционирования не всегда позволяют получать для них адекватные математические модели, сформулированные в виде различных аналитических соотношений. Применение имитационных моделей при решении этих задач позволит предприятию не снижать своих экономических показателей и повышать конкурентоспособность на рынке предметов массового спроса и потребления.

Комплексная стекольная наука, к сожалению, представлена только отдельными исследованиями; бюджетные ассигнования на НИР и новую технику (за исключением ряда специальных тем) отсутствуют [1].

Актуальность темы данной статьи состоит в выработке подхода к упрощению методов моделирования технологических процессов производства стеклотары как единой стохастической системы, основанного на декомпозиции системы на подсистемы – составляющие технологического процесса.

**Математические модели технико-технологических подсистем (ТПП)
на основе графов функциональных состояний оборудования стеклотарного производства**

ТПП	Графы	Математические модели: $C(t + \Delta t) =$
1	2	3
	 $c_v(c_2, c_3, c_4)$	$\begin{cases} C_1, \text{ если } [(C(t) = C_1) \cup (C(t) = C_v) \cap (N_v(t) > N_v)] \cap (\alpha(t) = 1 \cap \beta(t) = 0); \\ C_2, \text{ если } [(C(t) = C_v) \cap (N_v(t) \leq N_v) \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap \\ \cap (\beta(t) = 1) \cap N_v > 0; \\ C_{20}, \text{ если } [(C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_v) \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 0); \\ C_{22}, \text{ если } [(C(t) = C_{22}) \cup (C(t) = C_v) \cup (C(t) = C_{20})] \cap (N_v = 0) \cap (\alpha(t) = 1) \end{cases}$ где $C \in (C_1, C_2, C_3, C_4, C_{20}, C_{22})$; $C_v \in (C_2, C_3, C_4)$
T_2		$\begin{cases} C_1, \text{ если } [(C(t) = C_1) \cup (C(t) = C_5)] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0); \\ C_2, \text{ если } [(C(t) = C_1) \cup (C(t) = C_5)] \cap (t_{\text{вс}}(t) \leq T_{\text{вс}}) \cup (C(t) = C_{19}) \cap (t_{\text{вто}} > T_{\text{вто}})] \cap \\ \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 1); \\ C_{19}, \text{ если } [(C(t) = C_{19}) \cap (t_{\text{вто}} < T_{\text{вто}}) \cup (C(t) = C_5) \cap (t_{\text{пк}}(t) \geq T_{\text{пк}})] \cap (\beta(t) = 1) \end{cases}$ где $C \in (C_1, C_5, C_{19})$
T_3	 $c_w(c_6, c_7)$	$\begin{cases} C_1, \text{ если } [(C(t) = C_1) \cup (C(t) = C_w) \cap (N_w(t) > N_w)] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0); \\ C_w, \text{ если } [(C(t) = C_1) \cup (C(t) = C_w) \cap (N_w(t) \leq N_w) \cup (C(t) = C_{19}) \cap \\ \cap (t_{\text{вто}}(t) > T_{\text{вто}})] \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{21}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap \\ \cap (\beta(t) = 1) \cap (N_w > 0); \\ C_{19}, \text{ если } [(C(t) = C_{19}) \cap (t_{\text{вто}}(t) < T_{\text{вто}}) \cup ((C(t) = C_w) \cup (C(t) = C_{20}) \cup \\ \cup (C(t) = C_{21}) \cup (C(t) = C_{22})) \cap (t_{\text{пк}}(t) \geq T_{\text{пк}})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 1); \\ C_{20}, \text{ если } [(C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_w) \cup (C(t) = C_{19}) \cup (C(t) = C_{21}) \cup \\ \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 0); \\ C_{21}, \text{ если } [(C(t) = C_{21}) \cap (t_{\text{тп}}(t) < T_{\text{тп}}) \cup (C(t) = C_w) \cup (C(t) = C_{19}) \cup \\ \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0) \cap (N_w(t) \leq N_w) \cap (N_w > 0); \\ C_{22}, \text{ если } [(C(t) = C_{22}) \cup (C(t) = C_w) \cup (C(t) = C_{19}) \cup (C(t) = C_{20}) \cup \\ \cup (C(t) = C_{21})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0) \cap (N_w = 0) \end{cases}$ где $C \in (C_1, C_6, C_7, C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22})$; $C_w \in (C_6, C_7)$; $N_w \in (N_6, N_7)$
T_4	 $c_z(c_9, c_{10}, c_{11})$	$\begin{cases} C_1, \text{ если } [(C(t) = C_1) \cup (C(t) = C_z) \cap (N_{\text{тп}}(t) > N_{\text{тп}})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0); \\ C_8, \text{ если } [(C(t) = C_8) \cap (t_{\text{т}}(t) \leq T_{\text{т}}) \cup (C(t) = C_1)] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 1) \cap (N_{\text{тп}}(t) > 0); \\ C_z, \text{ если } [(C(t) = C_8) \cap (t_{\text{т}}(t) > T_{\text{т}}) \cup (C(t) = C_z) \cup (C(t) = C_{19}) \cap (t_{\text{вто}}(t) > T_{\text{вто}}) \cup \\ \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{21}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 1) \cap (N_z(t) \leq N_z) \cap \\ \cap (N_z > 0); \\ C_{19}, \text{ если } [(C(t) = C_{19}) \cap (t_{\text{вто}}(t) < T_{\text{вто}}) \cup ((C(t) = C_z) \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{21}) \cup \\ \cup (C(t) = C_{22})) \cap (t_{\text{пк}}(t) \geq T_{\text{пк}})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 1); \\ C_{20}, \text{ если } [(C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_z) \cup (C(t) = C_{19}) \cup (C(t) = C_{21}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap \\ \cap (\alpha(t) = 0); \\ C_{21}, \text{ если } [(C(t) = C_{21}) \cap (t_{\text{тп}}(t) < T_{\text{тп}}) \cup (C(t) = C_z) \cup (C(t) = C_{19}) \cup (C(t) = C_{20}) \cup \\ \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0) \cap (N_z(t) \leq N_z) \cap (N_z > 0); \\ C_{22}, \text{ если } [(C(t) = C_{22}) \cup (C(t) = C_z) \cup (C(t) = C_{19}) \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{21})] \cap \\ \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0) \cap (N_z = 0) \end{cases}$ где $C \in (C_1, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22})$; $C_z \in (C_9, C_{10}, C_{11})$; $N_z \in (N_9, N_{10}, N_{11})$

1	2	3
T_5		$\left\{ \begin{array}{l} C_1, \text{ если } [(C(t) = C_1) \cup (C(t) = C_{13}) \cap (N_{\text{кк}}(t) > N_{\text{кк}})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0); \\ C_{12}, \text{ если } [(C(t) = C_{12}) \cup (C(t) = C_1) \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap (N_{\text{сопр}}(t) \leq N_{\text{сопр}}) \cap \\ \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 1) \cap (N_{\text{сопр}} > 0); \\ C_{13}, \text{ если } [(C(t) = C_{13}) \cup (C(t) = C_{12}) \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap (N_{\text{сопр}}(t) > N_{\text{сопр}}) \cap \\ \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 1) \cap (N_{\text{кк}}(t) \leq N_{\text{кк}}) \cap (N_{\text{кк}} > 0); \\ C_{20}, \text{ если } [(C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{12}) \cup (C(t) = C_{13}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 0); \\ C_{22}, \text{ если } [(C(t) = C_{22}) \cup (C(t) = C_{20})] \cap (N_{\text{сопр}} = 0) \cap (N_{\text{кк}} = 0) \cup [(C(t) = C_{12}) \cap \\ \cap (N_{\text{сопр}} = 0) \cup (C(t) = C_{13}) \cap (N_{\text{кк}} = 0)] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0) \end{array} \right.$ где $C \in (C_1, C_{12}, C_{13}, C_{20}, C_{22})$
T_6		$\left\{ \begin{array}{l} C_1, \text{ если } [(C(t) = C_1) \cup (C(t) = C_{18}) \cap (N_{\text{пк}}(t) = 0)] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 0); \\ C_{14}, \text{ если } [(C(t) = C_{14}) \cap (t_{\text{тм}}(t) \leq T_{\text{тм}}) \cup (C(t) = C_1)] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 1); \\ C_{15}, \text{ если } [(C(t) = C_{14}) \cap (t_{\text{тм}}(t) > T_{\text{тм}}) \cup (C(t) = C_{15}) \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap \\ \cap (\beta(t) = 1) \cap (N_{\text{зн}}(t) \leq N_{\text{зн}}) \cap (N_{\text{зн}} > 0); \\ C_{16}, \text{ если } [(C(t) = C_{15}) \cap (N_{\text{зн}}(t) > N_{\text{зн}}) \cup ((C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{16}) \cup (C(t) = C_{22})) \cap \\ \cap (t_{\text{пв}}(t) \leq T_{\text{пв}})] \cap (\alpha(t) = 1) \cap (\beta(t) = 1); \\ C_{17}, \text{ если } [(C(t) = C_{16}) \cap (t_{\text{пв}}(t) > T_{\text{пв}}) \cup (C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{17}) \cup (C(t) = C_{22})] \cap \\ \cap (N_{\text{зн}}(t) \leq N_{\text{зн}}) \cap (\beta(t) = 1) \cap (\alpha(t) = 1) \cap (N_{\text{зн}} > 0); \\ C_{18}, \text{ если } [(C(t) = C_{17}) \cap (N_{\text{зн}}(t) > N_{\text{зн}}) \cup ((C(t) = C_{18}) \cap (\beta(t) = 1) \cap (\alpha(t) = 1) \cap (N_{\text{зн}}(t) > 0)); \\ C_{20}, \text{ если } [(C(t) = C_{20}) \cup (C(t) = C_{14}) \cup (C(t) = C_{15}) \cup (C(t) = C_{16}) \cup (C(t) = C_{17}) \cup \\ \cup (C(t) = C_{22})] \cap (\alpha(t) = 0); \\ C_{21}, \text{ если } [(C(t) = C_{21}) \cap (t_{\text{пв}}(t) < T_{\text{пв}}) \cup (C(t) = C_{17})] \cap (N_{\text{зн}}(t) \leq N_{\text{зн}}) \cap (N_{\text{зн}} > 0) \cap \\ \cap (\beta(t) = 0) \cap (\alpha(t) = 1); \\ C_{22}, \text{ если } [(C(t) = C_{22}) \cup (C(t) = C_{14}) \cup (N_{\text{зн}} = 0) \cup (C(t) = C_{15}) \cap (N_{\text{зн}} = 0) \cup ((C(t) = C_{16}) \cup \\ \cup (C(t) = C_{17})) \cap (N_{\text{зн}} = 0)] \cap (\beta(t) = 0) \cap (\alpha(t) = 1). \end{array} \right.$ где $C \in (C_1, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22})$

Большое количество стеклотарных заводов требует оптимизации производственных процессов и модернизации.

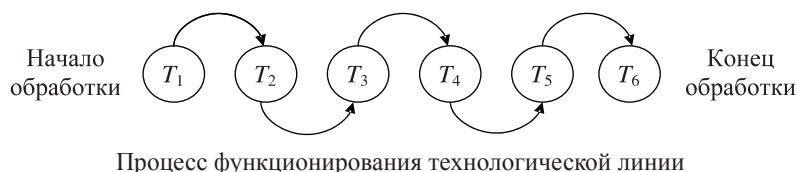
Исходя из опыта имитации сложных систем, описанного в трудах И.В. Максimea, В.Н. Бусленко, Б.Я. Советова, С.А. Яковлева, в качестве реализации модели стеклотарного производства предлагается имитационная модель технологического процесса изготовления стеклотары [2, 4].

В основе этой модели лежат разработанные математические модели функционирования технологического оборудования производства стеклотары (см. табл.).

На основе проведенного анализа технологического процесса производства стеклотары и опи-

санный ранее вербальной модели стеклотарного производства [3, 5] процесс функционирования технологической линии стеклотарного производства можно представить на уровне структурных элементов в виде ряда взаимосвязанных технико-технологических подсистем стеклообработки: T_1 – Загрузка шихты и стеклобоя в стекловаренные печи; T_2 – Стекловарение; T_3 – Выработка стеклоизделий; T_4 – Отжиг; T_5 – Сортировка; T_6 – Упаковка стеклоизделий. Тогда формально процесс функционирования такой линии можно представить в виде графа, вершинами которого являются названные подсистемы (см. рисунок).

Дальнейшая декомпозиция технико-технологических подсистем позволила выделить подсистемы низшего уровня: $T_{1,1}$ – Подача сте-



клобо в расходный бункер; $T_{1,2}$ – Подача шихты и стеклобоя в бункер загрузчиков шихты; $T_{1,3}$ – Подача смеси в загрузочные карманы печей; $T_{4,1}$ – Перегрузка стеклоизделий в печь отжига; $T_{4,2}$ – Отжиг стеклоизделий; $T_{4,3}$ – Транспортирование стеклоизделий в рабочем туннеле печи. Также были выделены наиболее важные технологические операции, выполняемые стеклообрабатывающим оборудованием в рамках этих подсистем: C_1 – подготовительно-заключительная операция; C_2 – подача стеклобоя в расходный бункер; C_3 – подача шихты и стеклобоя в бункер загрузчиков шихты; C_4 – подача смеси шихты и стеклобоя в загрузочные карманы печей; C_5 – получение жидкой стекломассы (варка стекла); C_6 – оформление и выдача капель стекломассы; C_7 – формование стеклоизделий; C_8 – транспортирование стеклоизделий до печи отжига; C_9 – перегрузка стеклоизделий в печь отжига; C_{10} – Отжиг стеклоизделий; C_{11} – транспортирование стеклоизделий в рабочем туннеле печи; C_{12} – сортировка стеклоизделий; C_{13} – контроль качества; C_{14} – транспортирование стеклоизделий до упаковочной машины; C_{15} – упаковка стеклоизделий в пакет; C_{16} – транспортирование пакета в термоусадочную печь; C_{17} – термоусадка пакета; C_{18} – транспортирование пакета на склад готовой продукции; C_{19} – вспомогательные технологические операции; C_{20} – отказ по техническим причинам; C_{21} – отказ по технологическим причинам; C_{22} – простой оборудования из-за отсутствия фронта работ.

В математических моделях, приведенных в таблице, t и Δt – произвольный момент и шаг приращения времени моделирования; $t_{\text{вс}}(t)$, $t_{\text{пк}}(t)$, $t_{\text{вто}}(t)$, $t_{\text{тпп}}(t)$, $t_{\text{т}}(t)$, $t_{\text{тм}}(t)$, $t_{\text{тпу}}(t)$ – случайные функции времени, соответственно, варки стекла, наработки между двумя вспомогательными технологическими операциями, выполнения вспомогательной технологической операции, устранения отказа по технологическим причинам, транспортирования стеклоизделий до печи отжига, транспортирования стеклоизделий до упаковочной машины, транспортирования пакета в термоусадочную печь; $T_{\text{вс}}$, $T_{\text{пк}}$, $T_{\text{вто}}$, $T_{\text{тпп}}$, $T_{\text{тм}}(t)$, $T_{\text{тпу}}(t)$ – регламентированное значение времени, соответственно, варки стекла, наработки между двумя вспомогательными технологическими операциями, выполнения вспомогательной технологической операции, устранения отказа по технологическим причинам, транспортирования стеклоизделий до

печи отжига, транспортирования стеклоизделий до упаковочной машины, транспортирования пакета в термоусадочную печь; $\alpha(t)$ – случайная функция, характеризующая работоспособность оборудования (0 – не работает, 1 – работает); $\beta(t)$ – случайная функция, характеризующая выполнение технологической операции (0 – не выполняется, 1 – выполняется);

для модели T_1 : $N_2(t) = N_{\text{псб}}(t)$, $N_3(t) = N_{\text{пшсб}}(t)$, $N_4(t) = N_{\text{пс}}(t)$ – случайная функция, соответственно, количества поданного стеклобоя в расходный бункер, шихты и стеклобоя – в бункер загрузчиков шихты, смеси – в загрузочные карманы печей; $N_{\text{псб}}$, $N_{\text{пшсб}}$, $N_{\text{пс}}$ – соответственно, необходимое количество стеклобоя для подачи в расходный бункер, шихты и стеклобоя – в бункер загрузчиков шихты, смеси – в загрузочные карманы печей;

для модели T_3 : $N_6(t) = N_{\text{кап}}(t)$, $N_7(t) = N_{\text{ф}}(t)$ – случайные функции, соответственно, количества полученных капель, формованных изделий; $N_6 = N_{\text{кап}}$, $N_7 = N_{\text{ф}}$ – необходимое количество, соответственно, капель; формованных изделий;

для модели T_4 : $N_9(t) = N_{\text{н}}(t)$, $N_{10}(t) = N_{\text{о}}(t)$, $N_{11}(t) = N_{\text{тн}}(t)$ – случайные функции количества, соответственно, изделий, перегруженных в печь отжига; изделий, прошедших отжиг; изделий, транспортированных в рабочем туннеле печи; $N_9 = N_{\text{н}}$, $N_{10} = N_{\text{о}}$, $N_{11} = N_{\text{тн}}$ – необходимое количество, соответственно, изделий для перегрузки в печь отжига, для отжига, для транспортировки в рабочем туннеле печи;

для модели T_5 : $N_{\text{сорт}}(t)$, $N_{\text{кк}}(t)$ – случайные функции количества, соответственно, сортированных изделий; изделий, прошедших контроль качества; $N_{\text{сорт}}$, $N_{\text{кк}}$ – количество изделий, которые, соответственно, необходимо отсортировать, проверить качество;

для модели T_6 : $N_{\text{уп}}(t)$, $N_{\text{уп}}(t)$, $N_{\text{тп}}(t)$ – случайные функции количества, соответственно, упакованных изделий, пакетов, прошедших термоусадку, и пакетов, транспортированных на склад; $N_{\text{уп}}$, $N_{\text{уп}}$, $N_{\text{тп}}$ – необходимое количество, соответственно, изделий для упаковки, пакетов для термоусадки и готовых пакетов;

Экспериментальной основой создания моделей послужило исследование статистических закономерностей распределения случайных величин протекания основных и вспомогательных процессов: времени наработки на отказ, ликви-



дации технологических и технических отказов для различных видов и типов оборудования технологических линий изготовления стеклотары. Полученные данные статистических исследований используются для определения констант переменных, случайных и индикаторных функций. Значения перечисленных величин применяются для выбора направления процесса имитации в соответствии с его математическим представ-

лением и реализованного в блоках логического сравнения.

На основе изложенного выше построена обобщенная математическая модель функционирования механизированной линии стеклотарного производства, которая интерпретируется системой логических уравнений, описывающих условия перехода одной технико-технологической подсистемы в другую:

$$T(t + \Delta t) = \begin{cases} T_1(T_{1.1}), \text{ если } (T(t) = T_{1.1}) \cap (N_{\text{псб}}(t) < N_{\text{псб}}); \\ T_1(T_{1.2}), \text{ если } (T(t) = T_{1.2}) \cap (N_{\text{пшсб}}(t) < N_{\text{пшсб}}) \cup (T(t) = T_{1.1}) \cap (N_{\text{псб}}(t) \geq N_{\text{псб}}); \\ T_1(T_{1.3}), \text{ если } (T(t) = T_{1.3}) \cap (N_{\text{пс}}(t) < N_{\text{пс}}) \cup (T(t) = T_{1.2}) \cap (N_{\text{пшсб}}(t) \geq N_{\text{пшсб}}); \\ T_2, \text{ если } (T(t) = T_2) \cap (N_{\text{с}}(t) < N_{\text{с}}) \cup (T(t) = T_{1.3}) \cap (N_{\text{пс}}(t) \geq N_{\text{пс}}); \\ T_3, \text{ если } (T(t) = T_3) \cap (N_{\text{ф}}(t) < N_{\text{ф}}) \cup (T(t) = T_2) \cap (N_{\text{с}}(t) \geq N_{\text{с}}); \\ T_4(T_{4.1}), \text{ если } (T(t) = T_{4.1}) \cap (N_{\text{п}}(t) < N_{\text{п}}) \cup (T(t) = T_3) \cap (N_{\text{ф}}(t) \geq N_{\text{ф}}); \\ T_4(T_{4.2}), \text{ если } (T(t) = T_{4.2}) \cap (N_{\text{о}}(t) < N_{\text{о}}) \cup (T(t) = T_{4.1}) \cap (N_{\text{п}}(t) \geq N_{\text{п}}); \\ T_4(T_{4.3}), \text{ если } (T(t) = T_{4.3}) \cap (N_{\text{ти}}(t) < N_{\text{ти}}) \cup (T(t) = T_{4.2}) \cap (N_{\text{о}}(t) \geq N_{\text{о}}); \\ T_5, \text{ если } (T(t) = T_5) \cap (N_{\text{кк}}(t) < N_{\text{кк}}) \cup (T(t) = T_{4.3}) \cap (N_{\text{ти}}(t) \geq N_{\text{ти}}); \\ T_6, \text{ если } (T(t) = T_6) \cap (N_{\text{тп}}(t) < N_{\text{тп}}) \cup (T(t) = T_5) \cap (N_{\text{кк}}(t) \geq N_{\text{кк}}). \end{cases}$$

При синтезе математической модели системы учитывались логические взаимосвязи подсистем, выделенные на этапе формализации (см. рисунок).

Полученная модель процесса изготовления стеклотары легла в основу имитационной модели стеклотарного производства, успешно внедренной на одном из крупных стеклотарных заводов страны.

Практическая ценность результатов исследования заключается в разработке автоматизиро-

ванного инструментария в виде имитационных моделей, позволяющих производить оптимизацию параметров функционирования оборудования стеклотарного производства. На этой основе устанавливать пропускную способность отдельных технологических звеньев, плановые нагрузки на производственные линии, комплексы и агрегаты, обосновывать условия достижения и поддержания требуемой интенсивности производства и необходимого для этого парка оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин, В.Н. Антикризисный автопробег стеклозаводчиков СНГ. Предварительные выводы [Текст]/ В.Н.Болотин //Стекло мира. – 2010. –№ 4–5. –С.65–67.
2. Математическое моделирование: Методы описания и исследования сложных систем [Текст]/ Под ред. А.А. Самарского. – М.: Наука, 1989. –271 с.
3. Редько, С.Г. Особенности имитационного моделирования стеклотарного производства [Текст]/ С.Г. Редько, Е.В. Морозова // Современные проблемы науки

и образования. – 2009. – №5. –С.121–126.

4. Советов, Б.Я. Моделирование систем [Текст]/ Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2005. –343 с.

5. Эпов, А.А. Декомпозиция процесса изготовления стеклотары как сложной производственной системы [Текст]/А.А.Эпов, Е.В. Морозова// Матер. III Всерос. конф. – Камышин: Изд-во КТИ ВолгГТУ, 2005. – Т. 1. –С. 111–114.

РАЗБИЕНИЕ ГРАФА С МИНИМИЗАЦИЕЙ СРЕДНИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Задача массового обслуживания в некоторых случаях ставится в распределенно-территориальном виде – это означает, что, прежде чем выполнить обслуживание заявки, требуется произвести физическое перемещение или заявки к обслуживающему прибору, или прибора к заявке. В этом случае обслуживаемая территория, как и в транспортной логистике, моделируется в виде взвешенного графа. Узлам, из которых поступают заявки на обслуживание, и узлам, в которых находятся обслуживающие приборы, соответствуют вершины графа. Тогда вес ребра представляет собой расход на перемещение (заявки или обслуживающего прибора) между связанными узлами.

Одна из основных задач – взаимное попарное распределение заявок и приборов, таким образом, чтобы уменьшить затраты на перемещение.

Очевидное решение заключается в том, чтобы каждую новую заявку назначать на ближайший к ней прибор. Однако на практике при достаточно больших объемах обслуживания решение оказывается неудачным, т. к. приводит к большим избыточным перемещениям.

Перемещения можно значительно сократить, если создавать буфер (или очередь) из ожидающих заявок, а дальнейшее распределение проводить через решение транспортной задачи и задачи коммивояжера. Проблема заключается в том, что обе указанные подзадачи имеют комбинаторную сложность и при большом числе узлов крайне сложны для решения, тем более, не могут быть решены качественно и оперативно (в режиме реального времени).

Популярный и широко известный способ решения заключается в следующем. Территория разбивается на части (сектора), обслуживающие приборы распределяются между секторами, новая заявка может быть обслужена только приборами, принадлежащими тому же сектору, в котором заявка появилась. Этот способ показал высокую эффективность, т. к. даже при неудачном выборе секторов позволяет значительно сократить перемещения. Кроме того, малое количество узлов в секторах позволяет применять

для них способ с буфером ожидающих заявок, приведенный выше. Способ настолько очевиден, прост и эффективен, что получил массовое применение. Разбиение территории при этом обычно происходит вручную, наобум, без применения каких-либо математических методов. Соответственно, основной недостаток этого способа в некачественном ручном разбиении, приводящем к неравномерной нагрузке на приборы, в дополнительных перемещениях, которых можно было бы избежать, разбив территорию правильнее.

В данной статье рассматривается один из возможных алгоритмов разбиения графа на части.

Постановка задачи

Поставим следующее условие: граф должен быть разбит на сектора таким образом, чтобы получить минимум перемещений в каждом из полученных секторов (минимаксный критерий – требуется добиться минимума перемещений в том секторе, перемещения в котором максимальны). Для оценки объема перемещений внутри выбранного сектора предлагается использовать понятие среднего перемещения, под которым будем понимать среднеарифметический размер всех возможных перемещений (матожидание размера случайного перемещения). В этой работе оценка среднего перемещения сделана при следующих условиях:

появление заявки равновероятно для всех узлов;

прибор перемещается между заявками;

обслуживание заявок происходит в порядке их появления.

Количество возможных вариантов перемещения S_z из одной вершины в другую в подграфе G_z , с учетом перемещения из вершины в себя же, равно квадрату количества вершин в подграфе $S_z = |V_z|^2$. Для определения длины каждого перемещения используем матрицу достижимости $\mathbf{M}$ с элементами m_{ij} . Тогда, с учетом равной вероятности перемещений между вершинами, среднее перемещений A_z по подграфу G_z будет равно

$$A_z = \sum_{i,j \in V_z} m_{ij} / |V_z|^2.$$

В результате, задача получает следующий вид. Дан взвешенный граф $G = (V, E, w)$, $w: E \rightarrow \mathbb{R}$, $k \in \mathbb{N}$, требуется найти разбиение множества вершин графа $V_1, V_2, \dots, V_k: V_i \cap V_j = \emptyset \forall i \neq j, \bigcup_{i=1}^k V_i = V$ с критерием оптимальности $A = \max_{i=1, k} A_i \rightarrow \min$, где

$$A_z = \frac{\sum_{i, j \in V_z} m_{ij}}{|V_z|^2}, \quad (1)$$

m_{ij} – элементы матрицы достижимости $\mathbf{M}$.

Решение

Многоуровневый алгоритм разбиения. Для решения задачи используется многоуровневый алгоритм разбиения [1]. Алгоритм состоит из трех основных этапов.

1. Огрубление. Из исходного графа $G^0 = (V^0, E^0)$ строится последовательность графов меньшей размерности $G^1, G^2, \dots, G^m: |V^i| > |V^j| \forall i < j$.

2. Разбиение. Производится разбиение на меньшем графе G^m из полученной последовательности.

3. Уточнение. Разбиение меньшего графа G^m проектируется через все графы полученной последовательности обратно на исходный граф G^0 . Использование многоуровневого алгоритма позволяет получать хорошие решения на графах большой размерности за приемлемое время.

Огрубление графа. Для сокращения числа итерации алгоритма на этапе проектирования и улучшения разбиения желательно, чтобы огрубленные графы были близки к исходному по интересующим, при данной задаче разбиения, характеристикам. Для достижения этой цели изменяется модель и постановка задачи. Для каждой вершины v_i графа G вводятся два числа. Вес вершины – a_i и степень вершины – b_i . Элементы матрицы достижимости $\mathbf{M}^{i+1}$ меньшего графа G^{i+1} полагаются равными $m_{kl}^{i+1} = \sum_{h, l} m_{hl}^i, h \in V^{i, k}, l \in V^{i, j}$. Здесь $V^{i, j}$ – множество вершин графа G^i , объединенных в вершину v_j графа G^{i+1} . Характеристики вершин нового меньшего графа G^{i+1} вычисляются по формулам $a_j^{i+1} = \sum_{h, l} m_{hl}^i + a_h^i + a_l^i, h, l \in V^{i, j}$ и $b_j^{i+1} = \sum_{k \in V^{i, j}} b_k^i$. Формула расчета средних перемещений по подграфу (1) изменяется следующим образом:

$$A_z = \frac{\sum_{i, j \in V_z} m_{ij} + \sum_{i \in V_z} a_i}{\left(\sum_{i \in V_z} b_i \right)^2}, \quad (2)$$

m_{ij} – элементы матрицы достижимости $\mathbf{M}$.

Для исходного графа G^0 величины a_i и b_i полагаются равными $a_i = 0, b_i = 1, \forall v_i \in V^0$. При такой постановке величины (2) совпадают с величинами (1) из начальной постановки задачи.

Для получения графа меньшей размерности на каждом шаге ищется максимальное паросочетание и пары смежных вершин объединяются. Ребра паросочетания определяются последовательно. Каждый раз к паросочетанию добавляется ребро, пара вершин которого обладает минимумом величины $\frac{m_{ij} + m_{ji} + a_i + a_j}{(b_i + b_j)^2}$. Вершины, не вошедшие в паросочетание, просто переносятся в меньший граф без объединения.

Разбиение графа. Этап разбиения графа наименьшей размерности состоит из двух основных стадий: первоначального разбиения и улучшения разбиения.

Для получения первоначального разбиения используется метод роста регионов с неслучайным выбором начальных вершин. Выбор начальных k вершин осуществляется по максимальной удаленности от уже выбранных l вершин, определяемой по формуле $\max_{i \in V_1, \dots, V_l} (\min_{j \in V_{i+1}, \dots, V_l} (m_{ij}))$. Остальные $n - k$ вершин приращиваются к подграфам, образованным начальными вершинами. К подграфу приращивается вершина, добавление которой к нему даст наименьшее увеличение величины целевой функции. Для этого для каждой неприсоединенной вершины рассчитывается выигрыш $g_i = \max_{j=1, k} (A_j) - \max_{j=1, k} (A_j^i)$ для подграфов V_j , таких, что добавление вершины v_i не нарушит связность. A_j^i здесь – значение (2) для подграфа G_j после добавления к нему вершины v_i . Вершина с максимальным выигрышем g_i приращивается к подграфу, на котором этот максимум достигается. Процесс продолжается до распределения всех вершин по подграфам.

Для улучшения разбиения используется модификация FM-алгоритма [2]. Одна итерация модифицированного алгоритма для бисекции выглядит следующим образом. Для всех вершин вычисляются выигрыши при перемещении в другой

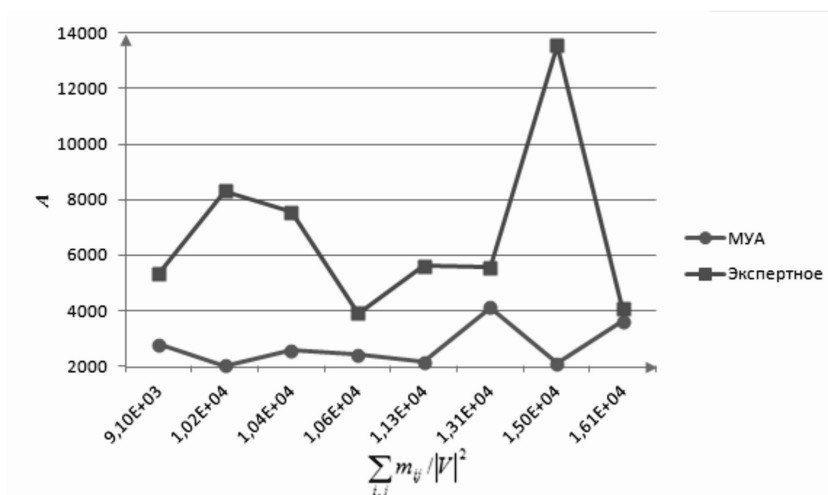


Рис. 1. Сравнение экспертных разбиений с разбиениями разработанным алгоритмом (МУА)

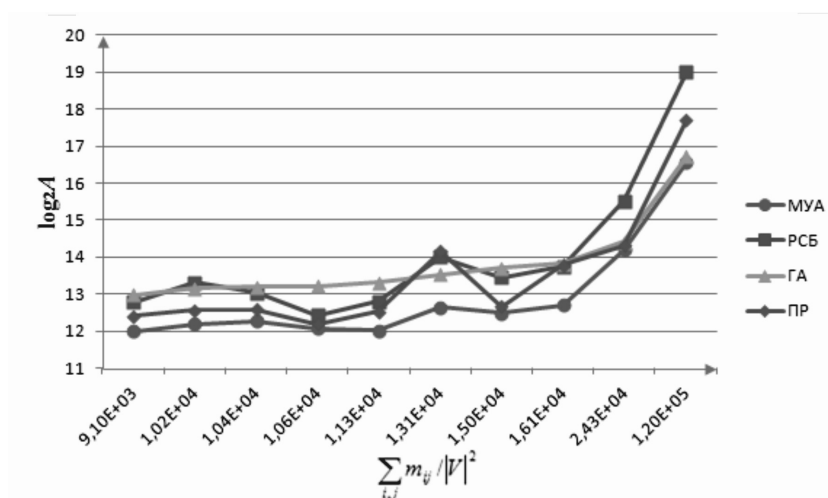


Рис. 2. Результаты разбиения на 8 подграфов

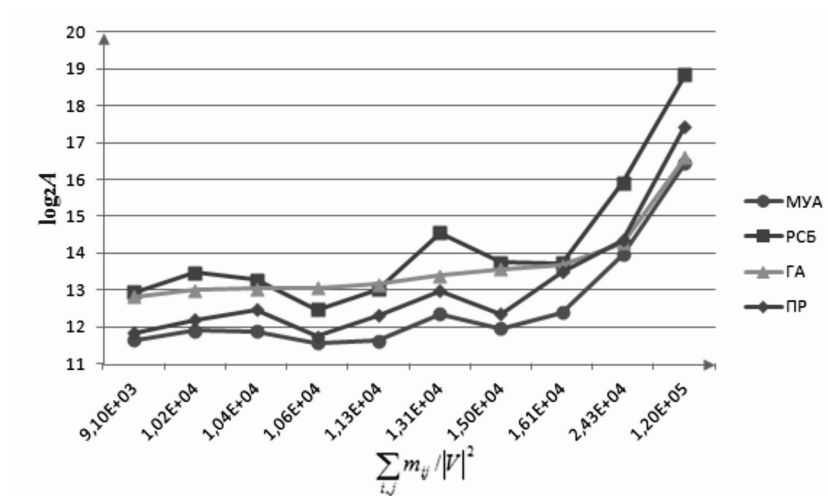


Рис. 3. Результаты разбиения на 16 подграфов



подграф $g_i = \max(A_1, A_2) - \max(A'_1, A'_2)$. A'_j – значение (2) для G_j после перемещения вершины v_i . Вершина v_e с максимальным выигрышем $g_e = \max_{i=1,k}(g_i)$ перемещается, для неподвижных вершин выполняется пересчет выигрышей. После перемещения всех вершин определяется последовательность перемещений $s_1, s_2, \dots, s_k$, при которой достигается минимум величины $A' = \max(A'_1, A'_2)$. Если эта величина меньше значения целевой функции до начала итерации $A' \leq A^0$, то разбиение с последовательностью перемещений $s_1, s_2, \dots, s_k$ принимается на следующей итерации за исходное. В противном случае достигнут локальный минимум и дальнейшее улучшение невозможно.

Уточнение разбиения. На каждом шаге этого этапа выполняется проектирование разбиения более грубого графа G^m на более точный G^{m+1} . Проектирование производится путем назначения вершинам $v_j : j \in V^{i,k}$ графа G^i , образующим вершину v_k графа G^{i+1} , подграфа вершины v_k , $P_i(j) = P_{i+1}(k)$. После каждого проектирования выполняется процедура улучшения разбиения, описанная выше.

Результаты. Эффективность разработанного алгоритма (МУА) оценена сравнением с экспертными разбиениями, произведенными в ходе

эксплуатации на графах реальных дорожных сетей. На рис. 1 изображена зависимость A от $\sum_{i,j} m_{ij} / |V|^2$ для этого сравнения. Разбиения разработанным алгоритмом обладают значением целевой функции A меньшим от 11 до 84 %, чем экспертные разбиения.

МУА также был сравнен с алгоритмом рекурсивной спектральной бисекции (РСБ), генетическим алгоритмом (ГА) и алгоритмом приращения регионов (ПР). Зависимость $\log_2(A)$ от $\sum_{i,j} m_{ij} / |V|^2$ при разбиении на 8 и 16 подграфов представлена на рис. 2 и 3 соответственно. Разбиения, полученные разработанным алгоритмом, обладают в среднем на 30 % меньшим значением целевой функции, чем лучший из сравниваемых алгоритмов.

В статье предложен алгоритм разбиения графа с минимизацией средних перемещений на основе многоуровневой структуры процесса разбиения. Многоуровневая основа алгоритма позволяет получать разбиения графов большой размерности за приемлемое время. Предлагаемый алгоритм делает возможным разбиения графов со значением целевой функции в среднем на 41 % меньшим, чем экспертные разбиения, и на 30 % меньшим, чем разбиения лучшим из рассматриваемых алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karypis, G. A Fast and High Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs [Текст] / G. Karypis, V. Kumar // SIAM J. on Scientific Computing. –1999. –Vol. 20 (1). –P. 359–392.

2. Fiduccia, C.M. A Linear-Time Heuristic for Improving Network Partitions [Текст] / C.M. Fiduccia, R.M. Mattheyses // Design Automation. 19th Conf. –1982. –P. 175–181.

УДК 681.3

Ч.Ф. Ахатова

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ И ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ

Во многих предметных областях человеческой деятельности для решения важных практических задач используются экспертные системы, основным элементом которых является база знаний. Правила, составляющие базу знаний, формулируются экспертом или формируются на осно-

ве методов интеллектуального анализа данных. В первом случае требуется большая аналитическая работа эксперта. Во втором – меньшая работа, т. к. эксперт лишь участвует на этапах выдвижения гипотез и оценки сформированных правил и закономерностей. Очевидно, что в настоящее

время, в связи с наличием больших накопленных массивов данных и имеющимся инструментарием для их интеллектуального анализа, целесообразнее использование второго подхода к построению баз знаний экспертных систем.

Исследованием вопросов разработки экспертных систем и формированием их баз знаний занимались многие российские и зарубежные ученые, внесшие значительный вклад в развитие данного направления искусственного интеллекта. Тем не менее многие вопросы повышения эффективности процессов формирования баз знаний экспертных систем до сих пор остаются не до конца изученными.

В ряде работ по искусственному интеллекту [3, 4, 6, 10] для формирования баз знаний экспертных систем рекомендуется использовать нечеткие нейронные сети (ННС). Однако авторы, как правило, предлагают для их обучения использовать алгоритм обратного распространения ошибки, основанный на методе градиентного спуска. Известные недостатки данного алгоритма, связанные с длительностью процесса обучения и сложностью нахождения оптимального решения, заставляют задуматься о его эффективности применительно к обучению нечеткой нейронной сети при формировании базы знаний экспертной системы.

При этом в практике разработки интеллектуальных систем существует тенденция использования гибридных моделей для решения различных практических задач. Так, применительно к обучению нечетких нейронных сетей и настройке параметров функций принадлежности antecedентов нечетких правил, некоторые авторы, наряду с традиционными методами оптимизации, используют генетический алгоритм [1, 2, 8]. Экспериментальные исследования показали, что использование данного подхода позволяет добиться лучших результатов по повышению скорости и точности решаемых задач.

Таким образом, применительно к проблеме формирования баз знаний экспертных систем актуальна задача разработки эффективного алгоритма обучения нечеткой нейронной сети на основе интеллектуальных методов и эффективных эвристических алгоритмов.

Постановка задачи исследования. Как известно, нечеткие нейронные сети представляют собой гибридные модели, сочетающие в себе достоинства нейронных сетей (возможность

адаптивного самообучения) и нечетких систем (хорошая интерпретируемость получаемого с их помощью результата). При этом нечеткая нейронная сеть в результате обучения формирует систему правил, составляющих базу знаний экспертной системы.

Среди множества моделей представления знаний в настоящее время большое распространение получили правила продукции из-за их гибкости и простоты описания закономерностей предметной области. Однако большинство задач в различных областях человеческой деятельности приходится решать в условиях нечеткости, неполноты и недовосточности исходных данных. В рамках использования обычных продукционных правил решение многих задач становится затруднительным. Для их решения необходимо применять нечеткие продукции и системы нечеткого логического вывода.

Таким образом, задача настоящего исследования сводится к выбору гибкой нечетко-продукционной модели представления знаний и разработке нечеткой нейронной сети, позволяющей в результате обучения формировать базу знаний экспертной системы правилами, представленными в форме нечетких продукций.

Нечетко-продукционная модель представления знаний. В [5] на примере задачи планирования геолого-технических мероприятий на нефтяных месторождениях показано, что зависимость между значениями входных параметров (условиями) и назначаемым результатом может быть эффективно описана экспертом в виде следующей нечетко-продукционной модели представления знаний:

«ЕСЛИ	P_1^j есть $\tilde{A}_1^j (w_1^j)$	И
	P_2^j есть $\tilde{A}_2^j (w_2^j)$	И
	...	И
	P_n^j есть $\tilde{A}_n^j (w_n^j)$	
ТО	Возможно применение технологии T_j » $[CF^j]$,	

где $P^j = \{P_i^j\}$ – множество входных параметров правила; $\tilde{A}^j = \{\tilde{A}_i^j\}$ – множество нечетких ограничений на параметры P^j ; $w^j = \{w_i^j\}$ – веса нечетких ограничений, определяющие их важность; $CF^j \in [0, 1]$ – степень достоверности сформированного правила – степень уверенности эксперта в его универсальности; $T_j \in T$ – технология, рекомендуемая к применению.

При этом существует алгоритм нечеткого логического вывода на правилах данной модели [5],

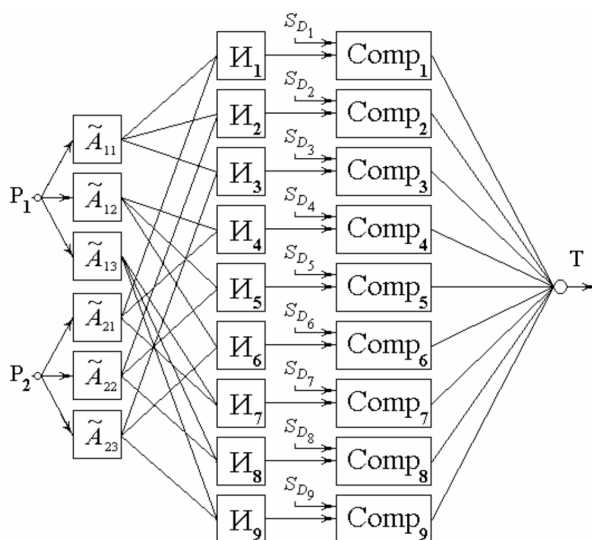


Рис. 1. Пример структуры нечеткой нейронной сети

на основе которого разработана нейронечеткая модель формирования баз знаний экспертных систем [6].

Нейронечеткая модель формирования баз знаний экспертных систем. Разработанная модель в виде ННС реализует алгоритм нечеткого логического вывода на нечетко-продукционной модели представления знаний [5], что определяет число слоев сети и их функциональность. Количество нейронов в слоях ННС зависит от числа входных, выходных параметров, а также от числа градаций входных нейронов.

В качестве примера рассмотрим нечеткую нейронную сеть, имеющую один выход и два входа с тремя нечеткими градациями (рис. 1).

В нулевом слое ННС содержится два Р-нейрона, выполняющих функцию распределения входных сигналов по нейронам первого слоя. В первом слое сети содержится $2 \cdot 3 = 6$ А-нейронов, моделирующих нечеткие условия вида «Р есть $\tilde{A}_i$ ». Выход А-нейронов равен значениям функций принадлежности $\tilde{A}_i$ (степень срабатывания условий) при соответствующих значениях входных нейронов. Второй слой содержит $3^2 = 9$ И-нейронов, задающих нечеткие продукции в виде «ЕСЛИ P_1 есть $\tilde{A}_i$ И P_2 есть $\tilde{A}_j$ ТО T_j ». Выход И-нейронов определяет оценку срабатывания соответствующего правила S_R . Третий слой сети состоит из девяти Сомп-нейронов, на выходе которых рассчитываются комплексные оценки срабатывания правил, равные произведению значений соответствующих оценок доверия к принятому решению S_D на оценки S_R . Веса

связи Сомп-нейронов с выходом ННС определяют степени достоверности сформированных правил CF. Произведения выходов Сомп-нейронов на их веса образуют общий коэффициент достоверности решений. В четвертом слое содержится Т-нейрон, на выходе которого вычисляются взвешенные нормированные оценки достоверности принимаемого решения.

Для получения системы правил, формирующей базу знаний экспертной системы, необходимо произвести обучение нечеткой нейронной сети, заключающееся в настройке значений соответствующих параметров ее функций принадлежности $\tilde{A}_i$.

Проблемы обучения нечеткой нейронной сети. В [6] для решения задачи обучения ННС использован алгоритм обратного распространения ошибки. В [7] для устранения недостатков данного алгоритма предложен специально разработанный генетический алгоритм. Однако при его реализации была выявлена проблема выбора лучшего хромосомного набора, определяющего параметры функций принадлежности ННС. Попытки решения данной проблемы привели к необходимости введения вспомогательных операций композиции и декомпозиции хромосом [7], что повлияло на увеличение времени обучения. Для повышения эффективности процесса обучения ННС разработан гибридный алгоритм, сочетающий в себе достоинства генетических алгоритмов с принципами градиентного метода обучения.

Гибридный алгоритм обучения нечеткой нейронной сети. Рассмотрим этапы работы гибридного алгоритма обучения ННС.

1. Задается начальное значение адаптивного шага обучения α ($0 < \alpha < 1$), желаемая ошибка выхода нейронной сети E_m , а также минимальный порог изменения ошибки при обучении $\Delta E_{\min}$.

2. На вход сети подаются i -е образы из обучающей выборки, для каждого из которых:

производится фаза прямого распространения сигнала по нейронной сети, определяется взвешенная активность выходного нейрона (значение выхода y_T^i);

вычисляется среднеквадратичная ошибка выхода нейронной сети для i -го входного образа $E_T^i = \frac{1}{2}(\Delta y_T^i)^2$, где $\Delta y_T^i = y_T^i - t_T$ – абсолютная ошибка выхода; t_T – требуемое значение выхода;

для минимизации ошибки E_T^i последовательно настраиваются выходы Сомп-нейронов x_{ic}^i на

основе генетического алгоритма *GAMT* (*Genetic Algorithm for Minimized T-error*);

вычисляются требуемые значения выходов

И-нейронов $(S_{R_{II}}^i)_{\text{треб}} = \frac{x_c^i(t+1)}{S_{D_{II}}^i}$, где t – момент

времени;

рассчитываются среднеквадратичные ошибки выходов И-нейронов $(E_{II}^i) = \frac{1}{2}(S_{R_{II}}^i)^2$, где $\Delta S_{R_{II}}^i = S_{R_{II}}^i - (S_{R_{II}}^i)_{\text{треб}}$ – абсолютная ошибка выхода, $(S_{R_{II}}^i)_{\text{треб}}$ – требуемое значение выхода;

для минимизации ошибки E_{II}^i последовательно модифицируются параметры функций принадлежности соответствующих А-нейронов на основе генетического алгоритма *GAMI* (*Genetic Algorithm for Minimized II-error*).

3. Вычисляется среднее значение ошибки выхода для всех входных образов: $E_T^{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_T^i$.

4. Рассчитывается изменение ошибки выхода: $\Delta E_T^{\text{cp}} = E_T^{\text{cp}}(t-1) - E_T^{\text{cp}}(t)$.

5. Если $0 \leq \Delta E_T^{\text{cp}} \leq \Delta E_{\min}$, то процесс обучения заканчивается.

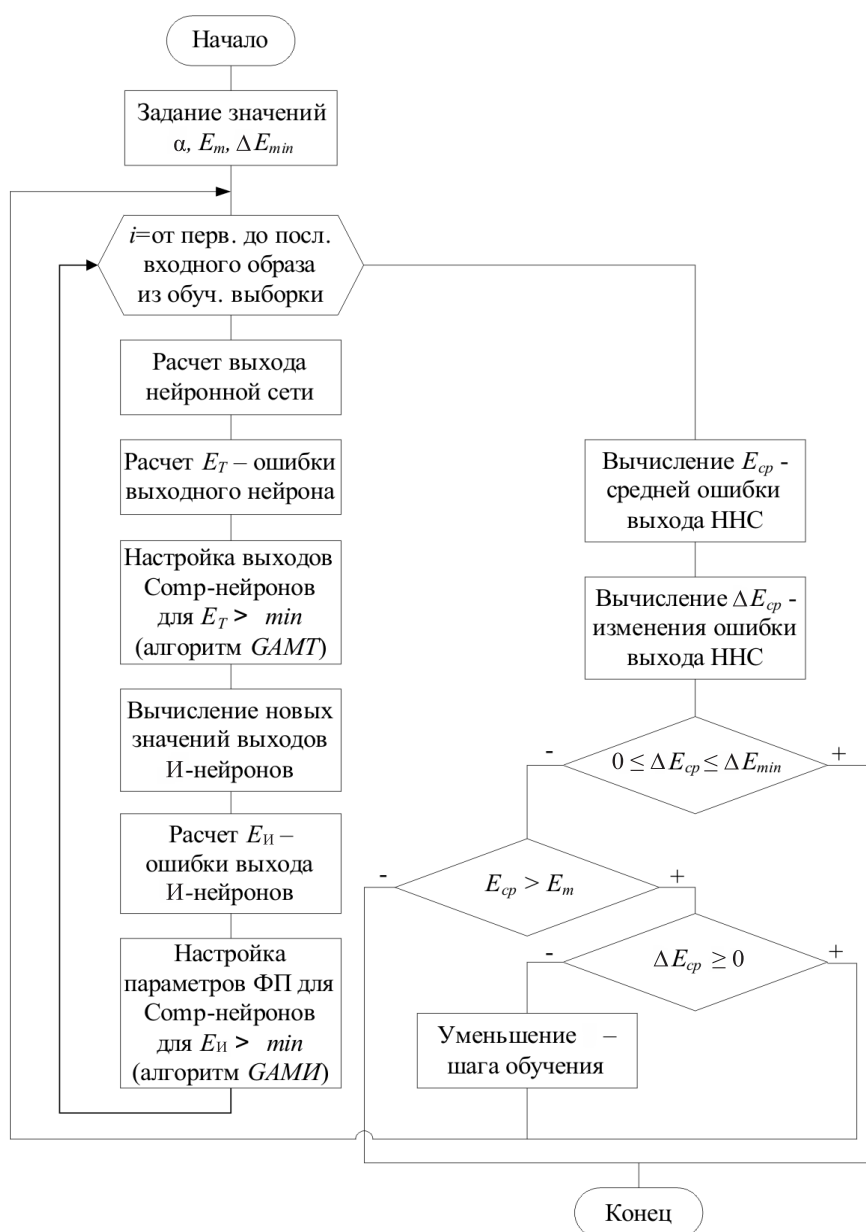


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обучения нечеткой нейронной сети

6. Если $E_T^{cp} > E_m$, то происходит переход к шагу 7 алгоритма, иначе процесс обучения нечеткой нейронной сети заканчивается.

7. Проверяется условие не возрастания ошибки выхода нейронной сети: если $\Delta E_T^{cp} < 0$, то уменьшается адаптивный шаг обучения и происходит переход ко второму шагу алгоритма.

На рис. 2 представлена блок-схема данного алгоритма.

Данный алгоритм функционирует до тех пор, пока средняя ошибка выхода нейронной сети не станет меньше заданной ($E_T^{cp} \leq E_m$), либо изменение ошибки выхода ΔE_T^{cp} не будет превышать минимально допустимый уровень ΔE_{min} .

В рамках соответствующих генетических алгоритмов происходит настройка выходов Сомп-нейронов, а также искоемых значений параметров соответствующих функций принадлежности А-нейронов. Рассмотрим этапы работы данных алгоритмов.

Этапы работы генетических алгоритмов.

Общим в работе каждого из алгоритмов является то, что они соответствуют принципам работы классического генетического алгоритма [7]. Таким образом, для практического применения алгоритмов необходимо задать способ кодирования и декодирования параметров задачи, определить правило создания начальной популяции хромосом, ввести оценку приспособленности хромосом в популяции, разработать правила селекции хромосом, применения генетических операторов скрещивания и мутации, а также формирования новой популяции.

Кодирование и декодирование параметров задачи. Рассмотрим способ кодирования параметров задачи для генетического алгоритма ГАМИ. Как было сказано выше, его работа заключается в настройке соответствующих параметров функций принадлежности ННС, которые задаются некоторой параметризованной функцией формы (треугольной, трапецеидальной, гауссовой и др.) с вектором параметров u_k . Так, для треугольной функции принадлежности $u_k = (u_{1k}, u_{2k}, u_{3k})$, где u_{1k} – левое основание, u_{2k} – центр (мода), u_{3k} – правое основание.

Настройка параметров u_{ik} функций принадлежности осуществляется в окрестности $\Delta = [u_{ik_{min}}, u_{ik_{max}}]$, ширина которой определяется индивидуально для каждого параметра и может составлять до 30 % ширины ее основания.

Разобьем данную окрестность на 2^n интервалов, где n – целое число, например, 10. Тогда параметр u_{ik} сможет принимать одно из 2^{10} значений, которые будут кодироваться хромосомой $\{u_{ik}\}$ длиной 10 бит. При этом хромосома, состоящая из нулей, будет соответствовать значению параметра $u_{ik_{min}}$, а состоящая из единиц – значению $u_{ik_{max}}$. Таким образом, мощность хромосомного набора для каждого параметра u_{ik} функции принадлежности равна числу 2^n .

Во время работы алгоритма ГАМТ происходит настройка выходов Сомп-нейронов x_{ic}^i , область значений которых постоянна и равна $[0, 1]$. Способ разбиения данного отрезка и кодирование значений выходов Сомп-нейронов аналогичны алгоритму ГАМИ. При этом мощность хромосомного набора для каждого параметра x_{ic}^i также равна числу 2^n .

Во время обучения нечеткой нейронной сети возникает необходимость перехода от хромосомного набора к десятичным значениям параметров. Для этого необходимо выполнить процедуру декодирования, являющуюся инверсной по отношению к операции кодирования хромосом.

Создание начальной популяции хромосом. Функционирование генетических алгоритмов начинается с создания начальных популяций хромосом для всех параметров ННС, участвующих в обучении. При задании значения числа n мощность хромосомного набора для любого параметра постоянна и равна 2^n , где n – длина хромосомы. Объем начальной популяции хромосом N рекомендуется выбирать на порядок меньше числа 2^n . Однако при малых значениях n ($n < 10$) данный объем должен быть сравним с числом $\frac{2^n}{n}$.

Так, например, при $n = 10$ для создания начальной популяции случайным образом выбираются $N = 100$ хромосом ch_i ($i = 1..N$) из общего хромосомного набора мощностью 1024.

Следует отметить, что значения $n < 10$ выбирать не рекомендуется. Это приводит к малой вариативности параметров, что в дальнейшем может негативно отразиться на результатах обучения нечеткой нейронной сети.

Оценка приспособленности хромосом в популяции. Когда соответствующие параметры ННС закодированы и сформированы начальные популяции хромосом, необходимо оценить приспособленность каждой хромосомы ch_i в популяции.

В генетическом алгоритме ГАМТ в роли

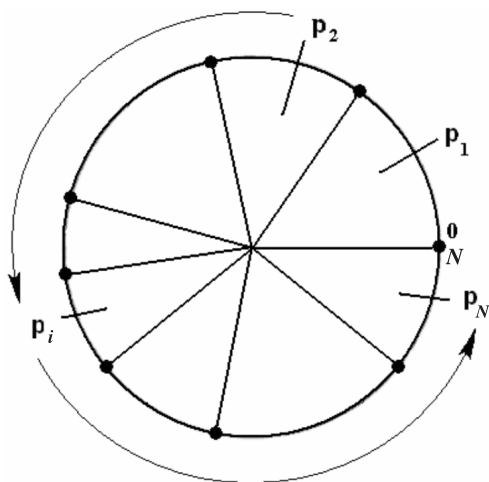


Рис. 3. Колесо рулетки для селекции хромосом

функции приспособленности выступает средне-квадратичная ошибка выхода нейронной сети E_T^i . Соответственно, в алгоритме *GAMI* функцией приспособленности является ошибка выхода И-нейрона E_{in}^i .

Для оценки приспособленности хромосом ch_i производится расчет значений соответствующих функций приспособленности, на вход которых подаются декодированные значения хромосом. При этом каждой хромосоме ch_i из общего хромосомного набора ставится в соответствие величина ее приспособленности $E(ch_i)$.

Селекция хромосом. Селекция хромосом заключается в выборе по рассчитанным значениям функции приспособленности тех хромосом, которые будут участвовать в создании особей следующего поколения. Такой выбор производится согласно принципу естественного отбора, по которому наибольшие шансы на участие в создании потомков имеют хромосомы с наименьшими значениями функции приспособленности (исходя из требования минимизации среднеквадратичной ошибки).

Оператор селекции реализуется на основе метода рулетки [9]. Для каждой хромосомы текущей популяции формируется сектор на колесе рулетки, площадь которого пропорциональна значению инверсной вероятности селекции данной хромосомы $p_i = \frac{1-E(ch_i)}{\sum_i (1-E(ch_i))}$ (рис. 3).

Розыгрыш с помощью колеса рулетки сводится к случайному выбору числа из интервала $[0, M]$, указывающего на сектор колеса, которому соответствует конкретная хромосома. Таким способом из текущей популяции выбираются два кандидата-родителя, к которым в дальнейшем применяются генетические операторы для порождения потомков.

Применение генетических операторов. Основные операторы описываемых генетических алгоритмов – операторы скрещивания и мутации, применяющиеся к хромосомному набору соответствующих параметров нечеткой нейронной сети. Рассмотрим пример работы оператора скрещивания (табл. 1).

Здесь X и Y – исходные решения (родители); Z , Q – новые решения (потомки).

Как видно из таблицы, в исходных хромосомах случайным образом выбирается точка скрещивания (в данном случае в i -й позиции хромосом), после чего происходит обмен противоположными частями родителей. Так происходит рождение новых потомков. Отметим, что процесс скрещивания носит случайный характер и производится с вероятностью $p_c \in [0,5, 1]$.

Оператор мутации, применяемый к потомкам после скрещивания, также производится случайно с вероятностью $p_m \in [0, 0,05]$. Сам процесс мутации заключается в инверсии одного из битов строки дочерних хромосом, выбираемого по равномерному закону.

Таким образом, в результате выполнения

Таблица 1

Пример работы оператора скрещивания

Позиции генов Хромосомы	1	...	i	$i+1$	...	n
X	α_1	...	α_i	α_{i+1}	...	α_n
Y	β_1	...	β_i	β_{i+1}	...	β_n
			↓			
Z	α_1	...	α_i	β_{i+1}	...	β_n
Q	β_1	...	β_i	α_{i+1}	...	α_n

генетических операторов исходная популяция хромосом за счет порожденных новых потомков увеличилась на два члена. Однако размер следующего поколения хромосом должен оставаться постоянным. Рассмотрим, каким образом решается задача сокращения размерности хромосомного набора на этапе формирования новой популяции.

Формирование новой популяции. Для сокращения размера популяции до исходного числа особей применяется оператор редукции. Для этого оценивается приспособленность каждой хромосомы, после чего из популяции исключаются две хромосомы с максимальным значением целевой функции.

Таким образом, с каждым циклом работы генетических алгоритмов в популяциях остаются только наиболее приспособленные хромосомы, уменьшающие значение среднеквадратичной ошибки выхода нейронной сети. Это значит, что после останова работы алгоритмов получим обу-

ченную нечеткую нейронную сеть с функциями принадлежности и правилами, позволяющими с заданной точностью аппроксимировать данные из обучающей выборки.

Апробация нейронечеткой системы и анализ эффективности алгоритмов обучения нечеткой нейронной сети. На базе описанной модели формирования баз знаний экспертных систем реализована нейронечеткая система. В качестве примера ее практического использования рассмотрим процесс анализа медицинских данных. Пусть необходимо выявить зависимость между временными параметрами пациента и риском возникновения у него заболевания.

В качестве входов нейронной сети примем параметры «возраст пациента», «стаж заболевания» и «стаж физических нагрузок», а в качестве выхода – «протрузия межпозвонкового диска». В результате обучения нечеткой нейронной сети получим правила следующего вида:

ЕСЛИ «Возраст пациента»=«средний» ($w = 0,47$) И
«Стаж заболевания»=«большой» ($w = 0,59$) И
«Стаж физических нагрузок»=«большой» ($w = 0,61$)
ТО «Возможно наличие протрузии диска» ($CF = 0,63$).

Особенности формирования базы знаний с использованием нечеткой нейронной сети изучались при разработке экспертной системы диагностики клинических проявлений остеохондроза поясничного отдела позвоночника [9].

Для получения системы правил и их параметров измерено более 500 тыс. значений признаков течения поясничного остеохондроза по 822 признакам. В результате применения нейронечеткой

системы на более чем 100 обучающих выборках получено более 500 правил, значимость которых подтверждена экспертами – специалистами-вертеброневрологами.

Результаты проведенного исследования подтвердили возможность и эффективность применения нейронечеткой системы для диагностического процесса в вертеброневрологии.

Для анализа эффективности алгоритмов обу-

Таблица 2

Результаты сравнения эффективности алгоритмов

Наименование алгоритма	Значение параметра	Оцениваемые параметры			
		Значение выхода	Ошибка выхода	Время обучения	Число эпох
Обратного распространения ошибки	Лучшее	0,7	0,05	00:01:48	96247
	Среднее	0,63	0,07	00:02:11	114247
	Худшее	0,3	0,25	00:10:27	547195
Генетический алгоритм	Лучшее	0,62	0,07	00:00:58	517
	Среднее	0,57	0,09	00:01:25	736
	Худшее	0,43	0,16	00:02:46	1461
Гибридный алгоритм	Лучшее	0,83	0,01	00:00:16	93
	Среднее	0,75	0,03	00:00:42	248
	Худшее	0,59	0,08	00:01:07	371

чения нечеткой нейронной сети произведено сравнение результатов применения гибридного алгоритма обучения нейронной сети с результатами, полученными в предыдущих исследованиях на базе алгоритма обратного распространения ошибки [6] и генетического алгоритма [7]. Проведен ряд численно-параметрических исследований сравнения эффективности работы описанных алгоритмов по критериям «скорость обучения» и «точность аппроксимации» на множестве обучающих выборок.

В табл. 2 представлены основные результаты сравнения эффективности различных алгоритмов обучения ННС.

Как видно из таблицы, результаты работы гибридного алгоритма обучения ННС по всем критериям лучше соответствующих результатов работы других алгоритмов. В некоторых случаях эффективность гибридного алгоритма сравнима с эффективностью простого генетического алгорит-

ма. При этом эффективность алгоритма обратного распространения ошибки оказалось самой низкой.

Практическое значение нейронечеткой модели заключается в возможности эффективного формирования баз знаний экспертных систем. Обученная нейронная сеть – адаптивная система нечеткого логического вывода. Она может использоваться как инструмент эксперта в составе мягкой или партнерской экспертной системы и позволяет заменить (или дополнить) эвристический процесс построения базы знаний на процесс автоматизированного ее формирования, извлекая продукционные закономерности из статистических выборок данных.

Таким образом, предложенная в данной статье нейронечеткая система с гибридным алгоритмом обучения вносит определенный вклад в развитие технологий интеллектуального анализа данных и формирования баз знаний экспертных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Arotaritei, D.** Genetic Algorithm for Fuzzy Neural Networks using Locally Crossover [Text] / D. Arotaritei // International J. of Computers Communications & Control. –2011. –№ 6(1). –Р.8–20.
2. **Banakar, Ahmad.** Wavelet Neuro-Fuzzy Model With Hybrid Learning Algorithm Of Gradient Descent And Genetic Algorithm [Text] / Ahmad Banakar, Azeem, Mohammad Fazle // International J. of Wavelets Multi-resolution And Information Proc. –2011. –Vol.9. –№ 2. –Р. 333–359.
3. **Klawonn, F.** Generation Rules from Data by Fuzzy and Neuro-Fuzzy Methods [Text] / F. Klawonn, D. Nauck, R. Kruse // Proc. of the Third German Workshop Fuzzy-Neuro-Systeme. –1995.
4. **Глова, В.И.** Формирование базы знаний медицинской диагностической экспертной системы на основе нечеткой нейронной сети [Текст] / В.И. Глова, И.В. Аникин, А.С. Катасёв [и др.] // Исследования по информатике. – Казань: Отечество, 2007. –Вып. 12. –С. 31–46.
5. **Глова, В.И.** Методы многокритериального принятия решений в условиях неопределённости в задачах нефтедобычи [Текст] / В.И. Глова, И.В. Аникин, М.Р. Шагиахметов. –Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. –31 с.
6. **Катасёв, А.С.** Нейронечеткая модель и программный комплекс формирования баз знаний экспертных систем: Дисс. ... канд. техн. наук [Текст] / А.С. Катасёв. –Казань, 2006. –20 с.
7. **Катасёв, А.С.** Нейронечеткая модель формирования баз знаний экспертных систем с генетическим алгоритмом обучения [Текст] / А.С. Катасёв, Ч.Ф. Ахатова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Межд. конф. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2010. –С. 615–621.
8. **Лавыгина, А.В.** Гибридный алгоритм настройки параметров нечетких моделей [Текст] / А.В. Лавыгина, И.А. Ходашинский // XII национальная конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием КИИ-2010; Тр. конф. Т. 4. –М.: Физматлит, 2010. –С. 112–115.
9. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с польск. И.Д. Рудинского. –М.: Горячая линия. –Телеком, 2006. –452 с.
10. **Ярушкина, Н.Г.** Основы теории нечётких и гибридных систем: Учеб. пособие [Текст] / Н.Г. Ярушкина. –М.: Финансы и статистика, 2004. –320 с.

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ НЕЦЕНТРАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ В ОДНОТОЧЕЧНОМ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ С ЕМКОСТНЫМ ДАТЧИКОМ СИЛЫ

Цифровые весы с верхним расположением грузоприемной платформы применяются в торговле, промышленности, медицине, спорте и в быту. Показания таких весов зависят в той или иной степени от расположения измеряемой массы на грузоприемной платформе весов. Наиболее радикальный способ снижения упомянутой погрешности измерения массы, называемой также *дополнительной погрешностью нецентрального нагружения*, – использование нескольких датчиков силы, на которые опирается грузоприемная платформа весов. Однако этот путь ведет к усложнению и удорожанию конструкции весов. Поэтому более широкое распространение получили так называемые *одноточечные весовые устройства*, в которых грузоприемная платформа крепится на одном датчике силы, в качестве которых используются преимущественно тензорезисторные датчики силы с упругим элементом (УЭ) типа двойной консольной балки [1].

В последнее время на рынке появляются емкостные датчики силы [2, 3], обеспечивающие более высокую точность и меньшую стоимость по сравнению с тензорезистивными. Однако одноточечные конструкции весовых устройств с емкостными датчиками на рынке отсутствуют. В связи с этим представляет интерес исследование дополнительных погрешностей подобных весовых устройств и разработка рекомендаций по снижению этих погрешностей до уровня, обеспечивающего их конкурентоспособность с тензорезисторными.

Устройство одноточечного весового устройства с емкостным датчиком силы приведено на рис. 1 и 2.

На рис. 1 введены следующие обозначения: 1 – упругий элемент рамочного типа, левый конец

которого жестко зашпелен, а на свободном конце которого закреплена грузоприемная платформа 2; неподвижный 3 и подвижный 4 электроды емкостного преобразователя (ЕП) жестко связаны с зашпеленным и свободным концами УЭ соответственно. На рис. 1 и 2 – l_x и l_y координаты центра тяжести измеряемой массы, наложенной на платформу (на рисунках не показана).

При центральном нагружении ($l_x = l_y = 0$) электрическая емкость между электродами ЕП составит:

$$C_m = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{H_m},$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; S – площадь подвижного электрода ЕП. Расстояние между центром подвижного электрода и неподвижным электродом в этом случае составит

$$H_m = H_0 + kF = H_0 + k \cdot g \cdot m,$$

где H_0 – величина воздушного зазора при отсутствии нагрузки; k – чувствительность УЭ; g – ускорение силы тяжести; m – измеряемая масса.

Под воздействием момента $M_1 = mgl_x$, возникающего при смещении массы от центра платформы вдоль оси X на величину l_x , происходит дополнительное смещение и поворот свободного конца УЭ, а, следовательно, изменение величины воздушного зазора и угла наклона между электродами 3 и 4 ЕП. В частности, величина воздушного зазора между электродами изменится на величину $\Delta_x \cdot \alpha$, где α – приращение угла поворота свободного конца УЭ в плоскости XZ , а Δ_x – расстояние от центра подвижного электрода до оси кручения. Электрическая емкость между электродами ЕП с учетом упомянутых возмущений станет равной:

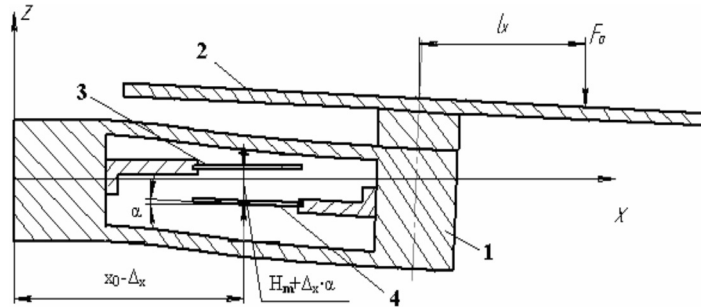


Рис. 1. Продольное сечение весового устройства с емкостным датчиком

$$C_{m1} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{H_m + \Delta_x \cdot \alpha} \left(1 + \frac{1}{12} \frac{a^2}{(H_m + \Delta_x \cdot \alpha)^2} \alpha^2 \right), \quad (1)$$

где a — длина подвижного электрода.

Дополнительная погрешность весового устройства (см. рис. 1), обусловленная смещением измеряемой массы от центра платформы вдоль оси X , представляет сумму двух составляющих:

$$\gamma_x = \frac{C_{m1} - C_m}{C_m} = \gamma_{1x} + \gamma_{2x}.$$

В последнем выражении с учетом малости угла α из (1) можно получить для первой составляющей дополнительной погрешности, обусловленной несовпадением Δ_x центра подвижного электрода с осью вращения свободного конца УЭ:

$$\gamma_{1x} \approx \frac{\Delta_x \cdot \alpha}{H_m}. \quad (2)$$

Для второй составляющей дополнительной погрешности, обусловленной простым поворотом подвижного электрода (поворотом вокруг его центра) в плоскости YZ на малый угол α :

$$\gamma_{2x} \approx \frac{(a \cdot \alpha)^2}{12 \cdot H_m^2}. \quad (3)$$

Аналогичным образом зависимость емкости между электродами ЕП от угла поворота β в поперечном сечении (плоскости YZ), возникающего при смещении измеряемой массы от центра платформы вдоль оси Y , будет иметь вид:

$$C_{m2} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{H_m + \Delta_y \cdot \beta} \left(1 + \frac{1}{12} \frac{b^2}{(H_m + \Delta_y \cdot \beta)^2} \beta^2 \right), \quad (4)$$

где b — ширина подвижного электрода, Δ_y — расстояние между центром подвижного электрода ЕП и осью кручения упругого элемента, которой в данном случае является ось X .

Дополнительная погрешность весового устройства (рис. 2), обусловленная смещением измеряемой массы от центра платформы вдоль оси Y , представляет сумму двух составляющих:

$$\gamma_y = \frac{C_{m2} - C_m}{C_m} = \gamma_{1y} + \gamma_{2y}.$$

Для первой составляющей дополнительной погрешности, обусловленной несовпадением Δ_y центра подвижного электрода с осью X , с учетом малости угла β из (4) можно получить:

$$\gamma_{1y} \approx \frac{\Delta_y \cdot \beta}{H_m}. \quad (5)$$

Для второй составляющей дополнительной погрешности, обусловленной простым поворотом подвижного электрода (поворотом вокруг его центра) в плоскости YZ на малый угол β , можно написать:

$$\gamma_{2y} \approx \frac{(b \cdot \beta)^2}{12 \cdot H_m^2}. \quad (6)$$

Для оценки упомянутой погрешности (2) необходимо знать координаты (x_0, z) точки, через которую проходит ось продольного кручения свободного конца УЭ.

При отсутствии нагрузки центр подвижного электрода расположен в точке A с координатами $(x_0, 0)$ (рис. 3). При наложении на грузоприемную платформу измеряемой массы центр подвижного электрода перемещается в точку A' с координатами (x_0, z) , где координата z пропорциональна измеряемой массе:

$$z = k \cdot g \cdot m.$$

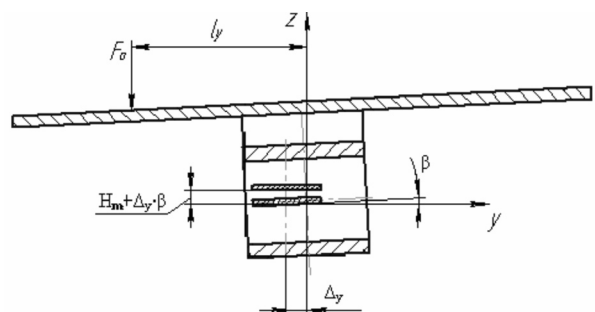


Рис. 2. Поперечное сечение весового устройства с емкостным датчиком

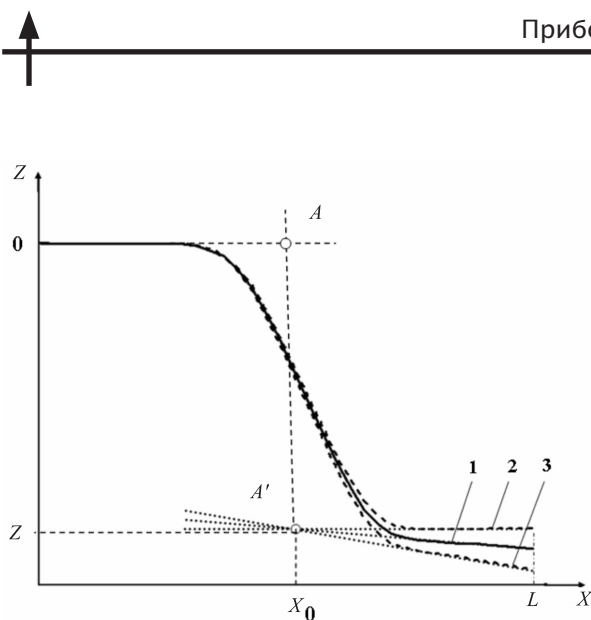


Рис. 3. Расчет точки кручения упругого элемента

Для определения координаты x_0 , зависящей от геометрических размеров и физических свойств материала УЭ, необходимо выполнить расчеты упругих линий (рис. 3) при различных способах нагружения весового устройства. На рис. 3 прямая 1 описывает перемещение свободного конца УЭ при центральном расположении массы на грузоприемной платформе, прямая 2 — при воздействии положительного момента (смещение массы вдоль оси X на величину l_x), прямая 3 — при воздействии отрицательного момента (смещение массы вдоль оси X на величину $-l_x$).

Расчет упомянутых кривых не может быть выполнен аналитически из-за сложности геометрии и условий закрепления и нагружения конструкции. Поэтому расчеты выполнены путем численного моделирования с применением широко известного метода конечных элементов. Объемная задача решается в плоском виде в предположении, что упругая линия во всех продольных сечениях одинакова. Погрешность этого допущения невелика, а преимущества в простоте реализации существенные.

Координату x_0 оси, относительно которой происходит закручивание, можно получить как точки пересечения прямых 1, 2 и 1, 3:

$$x_{01} = \frac{B_2 - B_1}{A_1 - A_2} \quad x_{02} = \frac{B_3 - B_1}{A_1 - A_3} \quad (7)$$

A_i и B_i — коэффициенты прямых $Z_i = A_i x + B_i$ (i — номер прямой), аппроксимирующих точки перемещения свободного конца упругого элемента при различных способах нагружения.

Коэффициенты A_i и B_i найдены методом наименьших квадратов в матричной форме:

$$K = (N^T \cdot N)^{-1} (N^T Z),$$

где N — матрица, состоящая из двух столбцов, первый из которых содержит единицы, а второй — массив координаты узлов конечно-элементной сетки свободного конца УЭ, Z — массив перемещений свободного конца упругого элемента в названных узлах.

Рассмотрим пример нахождения координаты точки кручения свободного конца в продольной плоскости рамочного упругого элемента, изображенного на рис. 4.

При отмеченных на рисунке конструктивных параметрах упругий элемент, изготовленный из стали марки 35ХГСА (модуль Юнга $E = 2,1 \times 10^{11}$ Па), рассчитан на номинальное значение измеряемой массы 15 кг. Размер грузоприемной платформы, изображенной на рис. 1, составляет 20×20 см.

При моделировании УЭ, представленного на рис. 4, количество узлов сетки превышало 500 тыс., при этом количество строк массива N и длина массива Z составляла 20 тыс. элементов. При этих условиях погрешность аппроксимации прямых 1, 2, 3 составила 0,02 %, а средняя квадратичная погрешность оценки коэффициентов A и B не превышала $2 \cdot 10^{-8}$ и $1,6 \cdot 10^{-9}$ м соответственно, что обеспечивало погрешность определения координат X_{01} и X_{02} по формуле (7) не более $\pm 0,01$ мм.

Оказалось, что координаты X_{01} и X_{02} точек пересечения прямых 1, 2 и 1, 3 не совпадают. При этом разность $X_{01} - X_{02}$ существенно превышает упомянутую погрешность определения координат. Поэтому были проведены дополнительные исследования для выявления причин расхождения точек пересечения прямых. Результаты исследований показаны на рис. 5.

На рисунке отмечены положения точек пересечения прямых 1, 2 и 1, 3 для случая закрепления грузоприемной платформы в точках УЭ с координатами $X_p = 85, 90, 95$ мм.

Из рис. 5 следует, что при $X_p = 90$ мм упомянутые точки совпадают, при этом достигается

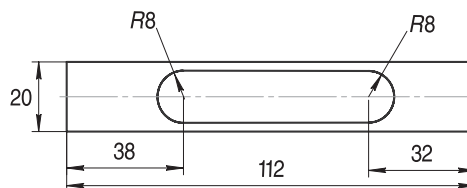


Рис. 4. Эскиз упругого элемента

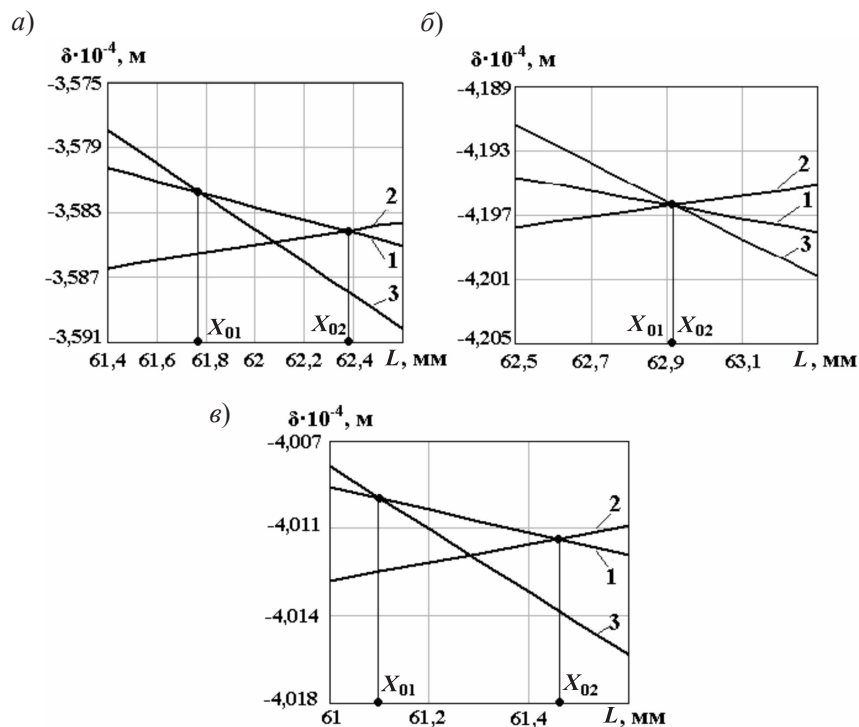


Рис. 5. Фрагменты аппроксимирующих прямых в окрестностях их пересечения

равенство между углами поворота свободного конца УЭ при положительном и отрицательном моментах. Поэтому в качестве координаты точки крепления грузоприемной платформы целесообразно устанавливать $X_p = 90$ мм. В этом случае координата точки, через которую проходит ось кручения в плоскости XZ , оказывается равной $x_0 = (62,92 \pm 0,01)$ мм.

Для данной конструкции упругого элемента нетрудно рассчитать дополнительные погрешности, вызванные нецентральной позицией массы на грузоприемной платформе.

Угол закручивания α численно равняется углу между прямыми 1, 2 и 1, 3, и принимает значение $4,4 \cdot 10^{-4}$ рад при максимальном моменте. Дополнительные погрешности от перемещения массы от центра платформы на ее края в направлении оси X оказываются равны $\gamma_{1x} = 4 \cdot 10^{-4} \%$ и $\gamma_{2x} = 10^{-3} \%$.

Оценим дополнительную погрешность при влиянии поперечного момента. Угол закручивания β определяется аналитическим методом [4] и составляет $5,4 \cdot 10^{-3}$ рад. Тогда погрешности от перемещения массы от центра платформы на ее края в направлении оси Y оказываются равны $\gamma_{1y} = 5 \cdot 10^{-2} \%$, $\gamma_{2y} = 10^{-2} \%$. Погрешность чистого поворота γ_{1y} , пропорциональная квадрату угла поворота β , может быть легко снижена до 0,005 % известными способами, например, путем использования ЕП дифференциальной конструкции.

Таким образом, дополнительная погрешность от нецентрального нагружения может быть снижена до уровня $\pm 0,01 \%$, что существенно меньше значений, реализуемых в настоящее время в одноточечных весовых устройствах с тензорезисторными датчиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Весоизмерительные технологии HBM [Текст] / Листок-каталог: разработчик и изготовитель HBM. – М., 2011. – 15 с.
2. iLoad Digital USB Integrated Load Cell [Текст] / Листок-каталог: разработчик и изготовитель Loadstar Sensors. – CA, USA, 2008. – 2 с.
3. Патент RU 2152010 C1 G01L 1/14. Емкостный силоизмерительный датчик [Текст].
4. Справочник машиностроителя: В 3 т. [Текст] / Пред. ред. совета Е.А. Чудаков. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит., 1950.

АЛГОРИТМ ТРАССИРОВКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СБИС

Перед производителями компьютерных комплектов стоят задачи увеличения производительности компьютеров и уменьшения их размеров (мобильные устройства). Так, производители компьютерных микросхем (в т. ч. и процессоров) настолько развили свои технологии, что близко подошли к теоретическому пределу уменьшения размеров кристалла. В связи с этим встает проблема увеличения плотности размещения элементов на кристалле, оптимизация соединений между ними, минимизация площади кристалла.

Проектирование СБИС включает три этапа [1]: разбиение функциональной схемы на элементы; планирование размещения элементов на кристалле; физическое соединение элементов на кристалле (трассировка).

Данная статья посвящена физическому соединению элементов на кристалле (*трассировке*), в ней рассматривается плоская задача однослойной трассировки при проектировании фрагмента однокристалльной специализированной цифровой СБИС для вычислительной техники (ВТ). Проведен эксперимент на основе библиотечного набора элементов (модулей)*.

Цель исследования – разработка эффективного алгоритма для решения задачи трассировки СБИС с применением процедур генетического алгоритма.

Методы решения задач при проектировании СБИС

Задачам проектирования СБИС посвящено много работ. Например, в [2] задача детальной

трассировки решена с помощью *волнового* алгоритма, в [3] задача трассировки решена с помощью деревьев Штейнера, в [4] решена задача канальной трассировки с помощью алгоритма «имитация отжига». Для решения задачи проектирования СБИС используются также генетические алгоритмы [4].

В [5] рассмотрена задача трассировки. Для соединения использовано прямолинейное дерево Штейнера и сетка Хэнана, являющаяся пересечением горизонтальных и вертикальных проекций терминалов.

В [6] в рамках единого алгоритма совмещена оптимизация сразу нескольких критериев: суммарная длина соединений, суммарное нарушение ограничений на тактовую частоту и равномерность распределения элементов по площади кристалла. Для этого был применен классический метод оптимизации – метод множителей Лагранжа (метод Лагранжевых релаксаций).

Недостаток алгоритма Штейнера – неприемлемая временная сложность. В волновом алгоритме при построении трассы требуется большой объем памяти. Недостаток алгоритма «имитация отжига» – медленная работа алгоритма в случае большой размерности целевой функции. В генетическом алгоритме велико время исполнения функции оценки. Метод множителей Лагранжа требует значительных временных затрат.

В настоящее время из-за высокого уровня сложности современных микросхем (особенно БИС и СБИС) перешли от неавтоматизированного их проектирования к автоматизированному. Продукты компании Mentor Graphics и Cadence позволяют решать сколь угодно сложные задачи. Все они интегрированы в сквозной маршрут,

* Набор элементов взят из библиотеки <http://www.cse.ucse.edu/research/surf/GSRS/MCNCbench.html>

верифицированный и поддерживаемый множеством технологических библиотек от ведущих изготовителей СБИС (UMC, TSMC, Chartered, IBM, STMicroelectronics, AMS и др.). Все продукты Mentor Graphics основаны на общепринятых стандартах, поэтому легко интегрируются в маршруты проектирования других поставщиков. Отдельные пакеты, например, Calibre, Seamless, ModelSim, TestKompress, занимают доминирующие позиции на мировом рынке. На российском рынке продукция Mentor Graphics широко используется с 1991 г.

Однако смещение акцента с последовательной бесконфликтной прокладки проводников сперва на стопроцентную разводку с конфликтами, затем – на оптимизирующуюся для уменьшения количества конфликтов, перевело алгоритмы, лежащие в основе пакетов проектирования, из класса последовательных в класс оптимизационных, что, как выяснилось, оказывает колоссальное влияние на качество разводки [2].

Следовательно, задача автоматической трассировки на сегодняшний день не решена полностью, т. к. эта задача оптимизационная и построить универсальный алгоритм невозможно.

В рамках данной статьи к поставленной задаче адаптирован алгоритм проверки планарности графа [7], а также разработан декодер. Алгоритм проверки планарности графа на базе процедур генетического алгоритма (PGA) является наилучшим с точки зрения простоты реализации и эффективности полученных решений.

Введем адаптацию этого алгоритма к задаче трассировки.

Структурную схему интерпретируем плоским неориентированным графом $G = (V, E)$, где V – число вершин графа, E – число ребер. Вершинами в графе G являются модули, ребрами – соединения между модулями.

Постановка задачи трассировки

Рассматривается следующая задача трассировки.

Дан план с размещенными модулями по его «комнатам» (рис. 1), полученный в [1]; структурная схема, на которой показано взаимное расположение модулей и соединения между ними (рис. 2).

Требуется соединить модули на кристалле проводниками таким образом, чтобы площадь кристалла была минимальной.

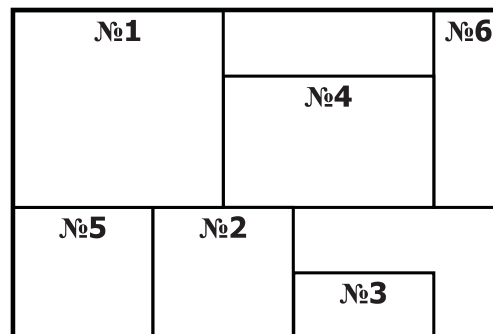


Рис. 1. План с размещенными модулями

При этом должны выполняться следующие ограничения [8]:

- 1) соединения не должны пересекаться и накладываться друг на друга, т. к. при изготовлении микросхем печатным способом электрические цепи наносятся на плоскую поверхность изоляционного материала и не изолированы;
- 2) длина соединительных проводников должна быть минимальной;
- 3) простота конфигурации соединений;
- 4) проводник, привязанный к модулю, может идти вдоль границы этого модуля, но не может оборачиваться вокруг угла;
- 5) допустимое расстояние между проводниками 3–4 мкм;
- 6) минимально допустимая длина проводника 4 мкм.

Общая схема алгоритма PGA для решения задачи трассировки на кристалле

Вход: план P с размещенными по «комнатам» модулями (прямоугольниками), полученный на базе алгоритма «поиск с запретами»;

структурная схема соединений модулей

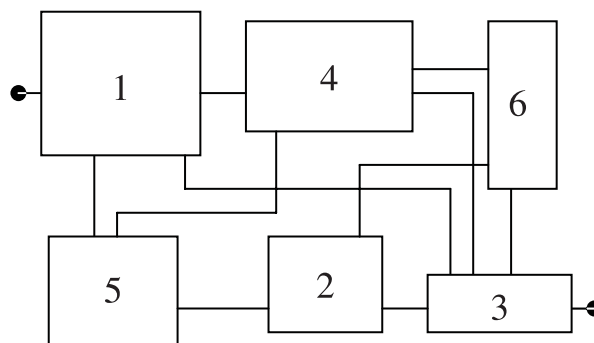


Рис. 2. Структурная схема, на которой показано взаимное расположение модулей и соединения между ними

в виде графа, заданного списком смежности.

Выход: план P' , удовлетворяющий ограничениям (1–6) с модулями, соединенными проводниками, в соответствии со структурной схемой.

Шаг 1. Соединение модулей плана (рис. 6) проводниками в соответствии со структурной схемой.

Шаг 2. Построение графа $G = (V, E)$, соответствующего схеме, в котором вершины V – модули, а ребра E – проводники, соединяющие модули.

Шаг 3. Если имеются пересечения проводников, то применяем алгоритм проверки планарности графа на базе процедур генетического алгоритма, который строит базис циклов B_p .

Если граф G – планарный, то формируем приоритетный список ребер (соединений) по базису циклов, соответствующему плоской укладке графа, и переходим к шагу 4.

Если граф G – непланарный, то формируем приоритетный список ребер (соединений) по базису циклов, соответствующему укладке максимальной планарной части графа, и переходим к шагу 4.

Шаг 4. Выполняем процедуру «декодер», осуществляющую размещение модулей по полученному приоритетному списку и их соединение с учетом условий 1–6.

Шаг 5. Конец алгоритма трассировки.

Процедура «декодер» позволяет получить размещение модулей на кристалле с учетом технологических ограничений для выполнения последующего соединения модулей (трассировки).

Рассмотрим подробнее выполнение алгоритма PGA на примере.

Пусть дана структурная схема (рис. 3) и план с размещенными модулями по его комнатам (рис. 4).

Соединим модули плана проводниками в соответствии со структурной схемой (рис. 5).

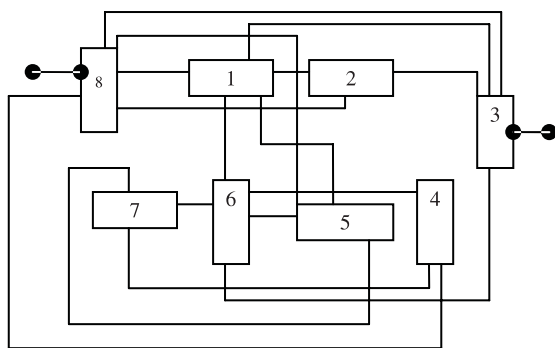


Рис. 3. Структурная схема

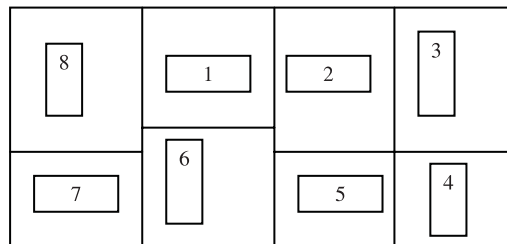


Рис. 4. План с размещенными модулями, полученный в [1]

Как видно из рис. 5, имеются пересечения проводников, что недопустимо. В связи с этим применяем алгоритм проверки планарности графа на базе процедур алгоритма PGA.

Вход:

Входом алгоритма PGA является граф $G = (V, E)$ (рис. 6), соответствующий структурной схеме на рис. 3.

Представим граф G в виде списков смежности.

$Lx_i = \{N(M_i, M_j)\}$, где N – номер ребра, M_i, M_j – вершины графа, которые соединяет между собой ребро N .

$Lx_1 = \{1(1,2), 2(1,3), 3(1,5), 4(1,6), 5(1,8)\};$

$Lx_2 = \{6(2,3), 7(2,8)\};$

$Lx_3 = \{8(3,6), 9(3,8)\};$

$Lx_4 = \{10(4,6), 11(4,7), 12(4,8)\};$

$Lx_5 = \{13(5,6), 14(5,7), 15(5,8)\};$

$Lx_6 = \{16(6,7)\}.$

Схема алгоритма PGA. Исходными данными для алгоритма PGA является множество циклов – популяция, из которых выбирается базис циклов B_p , где $p=m-n+2$; m – число ребер графа G ; n – число вершин графа G .

Базис B_p представляет собой хромосому (рис. 7), состоящую из p разрядов, каждый из ко-

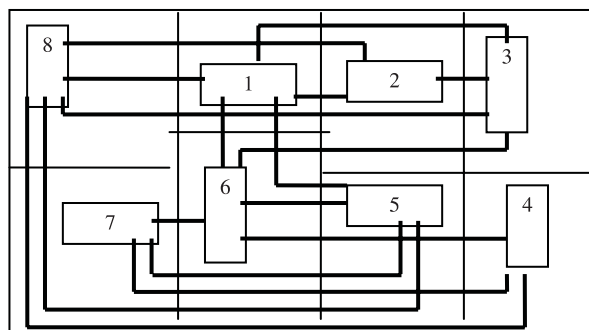


Рис. 5. План с размещенными и соединенными между собой модулями в соответствии со структурной схемой на рис. 3

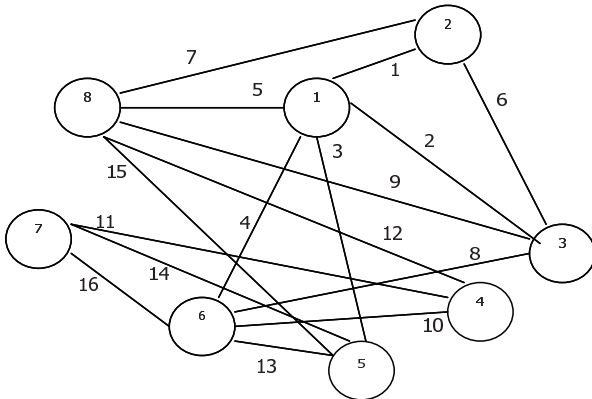


Рис. 6. Исходный граф $G(V, E)$

торых соответствует номеру цикла из B_p . Таким образом, под хромосомой понимается комбинация из p циклов, являющаяся одновременно вариантом плоской укладки графа $G(V, E)$.

Последние три разряда хромосомы используются для оценки полученного решения. Для этого в [8] вводится оценочная функция $\delta(m) = (2 \times N_{m_{p+3}} + N_{m_{p+2}}) / 2m$, где $N_{m_{p+3}}$ – число элементов в $p+3$ разряде хромосомы, а $N_{m_{p+2}}$ – соответственно число элементов в $p+2$ разряде. Значения оценочной функции $\delta(m)$ находятся в интервале $[0, 1]$, причем качество решения будет тем выше, чем большее число ребер (прежде всего ребер, встречающихся дважды) будет задействовано в решении.

Левая часть хромосомы (p разрядов) может содержать как значащую, так и незначащую части. Разряды значащей части заполняются номерами циклов, а незначащей L_0 – нулями. Для оптимального решения $L_0 = 0$. Таким образом, целевая функция хромосомы полученного решения $f(H) = (\delta(m); L_0)$.

В ходе построения планарного графа могут быть получены недопустимые решения, когда в выбранной комбинации циклов имеются ребра, повторяющиеся более двух раз. Если такие ребра обнаруживаются, то из комбинации удаляется минимально возможное число циклов, содержащих «лишние» ребра, а полученная комбинация преобразуется в хромосому.

Условие планарности графа: в полученном решении – хромосоме – все разряды с первого по p -й являются значащими, а разряды $p+1$ и $p+2$ – пустыми.

В основу алгоритма PGA положен критерий Мак-Лейна для проверки планарности графа [9].

Алгоритм Мак-Лейна для проверки планарности графа

Шаг 1. Генерируем циклы длины $k = 3$ в графе G . Цикл представляет собой замкнутый контур, состоящий из номеров ребер графа.

$C_1 = (1-6-2)$; $C_2 = (1-7-5)$; $C_3 = (2-8-4)$;
 $C_4 = (2-9-5)$; $C_5 = (3-13-4)$; $C_6 = (3-15-5)$;
 $C_7 = (6-9-7)$; $C_8 = (10-16-11)$; $C_9 = (13-16-14)$.

Шаг 1.1. Подсчитываем число циклов $N = |C_k|$; $N_{C_3} = 9$, где N_{C_3} – число циклов длины 3.

Шаг 1.2. Если выполняется условие $N \geq m - n + 2$, где n – число вершин графа G , m – число ребер графа G , то переходим к следующему шагу; если – нет, то возвращаемся к шагу 1 и начинаем генерацию циклов длины $k + 1$.

Необходимое число циклов $p = m - n + 2 = 16 - 8 + 2 = 10$.

Поскольку $N_{C_3} < p$, то необходимо вернуться к шагу 1 и начать генерацию циклов длины 4.

$C_{10} = (1-6-8-4)$; $C_{11} = (1-6-9-5)$;
 $C_{12} = (1-7-9-2)$; $C_{13} = (1-7-15-3)$;
 $C_{14} = (2-6-7-5)$; $C_{15} = (2-8-13-3)$;
 $C_{16} = (2-9-15-3)$; $C_{17} = (3-14-16-4)$;
 $C_{18} = (4-8-9-5)$; $C_{19} = (4-10-12-5)$;
 $C_{20} = (4-13-15-5)$; $C_{21} = (8-10-12-9)$;
 $C_{22} = (8-13-15-9)$; $C_{23} = (10-13-14-11)$;
 $C_{24} = (10-13-15-12)$; $C_{25} = (11-14-15-12)$.

Общее число циклов стало равным 25 ($N_c = 9 + 16 = 25$), т. е. $N_c > p$.

Шаг 1.3. Из множества циклов N выбираем первые $(m - n + 2)$ цикла и подсчитываем общее число ребер N_j , принадлежащих этим циклам:

$$N_j = \sum_{k=3}^K k \times |C_k|,$$

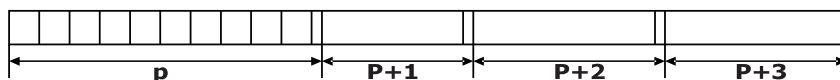


Рис. 7. Общий вид хромосомы

p – номера циклов; $p+1$ – номера ребер, не содержащихся во множестве циклов;
 $p+2$ – номера ребер, встречающихся в выделенном множестве циклов один раз;
 $p+3$ – номера ребер, встречающихся в выделенном множестве циклов два раза

где k – длина цикла; $|C_k|$ – мощность множества циклов длины k ; K – длина самого длинного из сгенерированных циклов.

Поскольку $p = 10$, то для первых десяти циклов подсчитываем число ребер: $N_m = 3 \times 9 + 4 \times 1 = 27 + 4 = 31$.

Шаг 1.4. Полученное значение N_j сравниваем с удвоенным числом ребер исходного графа G . Если $N_j > 2m$, то рассматриваемый граф является непланарным и для решения задачи трассировки необходимо использовать алгоритм, описанный в [7].

Шаг 1.5. Если полученное значение $N_j < 2m$, то делается замена циклов длины k на циклы большей длины $(k + 1)$. Если циклы длины $(k + 1)$ отсутствуют, то возвращаемся к шагу 1 и генерируем циклы длины $(k + 1)$, в противном случае – переходим к шагу 1.7.

Поскольку $N_j < 2m$ ($31 < 2 \times 16$), то заменяем один из циклов длины 3 на цикл длины 4 для достижения выполнения условия $N_m = 2m$.

Шаг 1.6. Если $N_j = 2m$, то получаем множество циклов C_k .

После проведения замены условие $N_m = 2m$ выполнено

$$N_m = 3 \times 8 + 4 \times 2 = 24 + 8 = 32 \Rightarrow N_m = 2m.$$

Вывод: исходя из полученного выражения для N_m , требуется восемь циклов длины $k = 3$ и два цикла длины $k = 4$.

Шаг 2. Конец работы по генерации циклов.

Шаг 3. Построение планарного графа.

Шаг 3.1. В имеющемся множестве циклов N выбираем ребра, повторяющиеся точно два раза. Если это не удается сделать, то просматриваем только первые p циклов.

В результате поиска выясняется, что таких ребер четыре. Это ребра: 3, 7, 13, 16.

Шаг 3.2. Объединяем все циклы, включающие указанные ребра.

Получаем комбинацию циклов $\{C_2, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9\}$, а затем проверяем, не создает ли полученная комбинация недопустимых решений.

Шаг 3.3. Кодлируем полученную комбинацию хромосомой.

Поскольку ни в одном из столбцов сумма единиц не превышает двух, данная комбинация является начальным базовым решением и будет закодирована следующей хромосомой:

Xp_1 2567890000 {2,8,12} {1,4,6,9,10,11,14,15} {3,5,7,13,16}

Хромосома Xp_1 является первым родителем.

Шаг 3.4. Посчитаем целевую функцию хромосомы:

$$f(Xp) = (\delta(m), L_0),$$

где $\delta(m) = (2 \times N_{m_{p+3}} + N_{m_{p+2}}) / 2m$ – функция оценки.

Подсчитаем целевую функцию хромосомы Xp_1 .

Функция оценки:

$$\delta(m) = 0,5625; L_0 = 4; f(Xp_1) = (0,5625; 4).$$

Шаг 3.5. Путем попарного объединения циклов формируем множество промежуточных решений – популяцию, из числа которых будет выбран второй родитель для операции скрещивания.

Для рассматриваемого примера множество промежуточных решений формируется случайным образом, путем попарного объединения циклов, включающих ребра 2, 8, 12.

Размер начальной популяции примем равным трем (по одной хромосоме для каждого ребра):

Xp_2 1300000000 {3,5,7,9,10,11,12,13,14,15,16} {1,4,6,8} {2}

Xp_3 15 18 00000000 {1,6,7,10,11,12,14,15} {2,3,4,5,9,13,16} {8}

Xp_4 19 21 00000000 {1,2,3,6,7,13,14,15,16} {4,5,8,9,11} {10,12}

Шаг 3.6. Селекция множества промежуточных решений.

Шаг 3.6.1. Подсчитаем значения функций пригодности относительно базового решения:

$$f(Xp) = (\delta'_m, N'_c),$$

где $\delta'_m = 1 - [(2 \times Nd_1 + Nd_2 + Nd_3) / (2 \times Ns_1 + Ns_2 + Ns_3)]$ – относительное увеличение числа ребер.

$N'_c = 1 - (N_c / N_{c+})$ – относительное увеличение числа циклов.

$$\delta'_m(Xp_2) = 1; N'_c(2n) = 1; f'(H) = (1; 1).$$

$$\delta'_m(Xp_3) = 0,2; N'_c(3n) = 0; f'(H) = (0,2; 0);$$

$$\delta'_m(Xp_4) = 0,5; N'_c(4n) = 0; f'(H) = (0,5; 0).$$

Шаг 3.7. На основе полученных функций пригодности выбираем второго родителя – хромосому 2 – для участия в операции скрещивания.

В качестве второго родителя выбираем хромосому Xp_2 как имеющую наивысшую оценку пригодности.

Шаг 3.8. Выполняем операцию скрещивания двух родительских особей Xp_1 и Xp_2 .

Xp_1 2567890000 {2,8,12} {1,4,6,9,10,11,14,15} {3,5,7,13,16}

Xp_2 1300000000 {3,5,7,9,10,11,12,13,14,15,16} {1,4,6,8} {2}

После выполнения операции скрещивания получается новое решение:

$Xp_{1,2}$ 2567891300 {12} {8,9,10,11,14,15}
{1,2,3,4,5,6,7,13,16}

Шаг 3.9. Увеличиваем популяцию промежуточных решений за счет объединения циклов, содержащих ребра, которые имеются в разряде $p+1$ нового базового решения – хромосоме $Xp_{1,2}$.

Увеличиваем популяцию промежуточных решений за счет добавления хромосом, содержащих ребро 12, т. к. в разряде $p+1$ решения осталось только одно это ребро:

Xp_5 19 24 00000000 {1,2,3,6,7,8,9,11,14,16}
{4,5,13,15} {10,12}

Xp_6 21 25 00000000 {1,2,3,4,5,6,7,13,16}
{8,9,10,11,14,15} {12}

Xp_7 19 25 00000000 {1,2,3,6,7,8,9,13,16}
{4,5,10,11,14,15} {12}

Xp_8 21 24 00000000 {1,2,3,4,5,6,7,11,14,16}
{8,9,13,15} {10,12}

Шаг 3.10. Подсчитываем функции пригодности $f(H)$ каждого элемента популяции относительно нового базового решения – хромосомы $Xp_{1,2}$:

$\delta'_m(Xp_5) = 0,2$; $N'_c(Xp_5) = 0$; $f'(H) = (0,2; 0)$;
 $\delta'_m(Xp_6) = 1$; $N'_c(Xp_6) = 1$; $f'(H) = (1; 1)$;
 $\delta'_m(Xp_7) = 0,6667$; $N'_c(Xp_7) = 0$; $f'(H) =$
 $= (0,6667; 0)$;

$\delta'_m(Xp_8) = 0,6$; $N'_c(Xp_8) = 0$; $f'(H) = (0,6; 0)$.

Шаг 3.11. Выбираем второго родителя – хромосому, имеющую лучшую оценку пригодности, для участия в операции скрещивания с хромосомой $Xp_{1,2}$ – новым решением.

Лучшую оценку пригодности имеет хромосома Xp_6 , которую выбираем в качестве второго родителя для операции скрещивания.

Шаг 3.12. Выполняем операцию скрещивания:

$Xp_{1,2}$ 2567891300 {12} {8,9,10,11,14,15}
{1,2,3,4,5,6,7,13,16}

Xp_6 21 25 00000000 {1,2,3,4,5,6,7,13,16}
{8,9,10,11,14,15} {12}

$Xp_{1,2,6}$ 256789132125 {0} {0} {1,2,3,4,5,6,7,8,9,
10,11,12,13,14,15,16}

В полученной хромосоме $Xp_{1,2,6}$ все разряды с 1-го по p -й (т. е. с 1-го по 10-й) являются значащими, а разряды $(p+1)$ и $(p+2)$ – пустыми.

Следовательно, условие планарности графа выполнено. Таким образом, в результате выполнения оператора кроссинговера построено оптимальное базовое решение (хромосома $Xp_{1,2,6}$).

Шаг 4. Получаем базис циклов B_p , соответствующий плоской укладке графа.

Шаг 4.1. Формируем необходимый базис циклов.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C_1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_2	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C_3	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
C_5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
C_6	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
C_7	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
C_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
C_{21}	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0
C_{25}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0

Шаг 5. Формируем приоритетный список ребер по полученному базису циклов B_p .

Шаг 5.1. В базисе B_p последовательно выбираем цикл за циклом.

Выбираем первый цикл в подматрице p . Это цикл C_1 . На первом шаге цикл C_1 совпадает с внешним циклом $C_{вн1}$:

$C_{вн1} = \{1(1,2) - 6(2,3) - 2(3,1)\}$. Добавляем ребра из первого цикла в приоритетный список PL_p .

$PL1 = \{1, 6, 2\}$.

Затем выбираем следующий цикл в базисе B_p . Это цикл C_2 .

Шаг 5.2. Находим разность множеств:

$C'_{вн1} = C_{вн1} \setminus C_2 = \{6(2,3) - 2(3,1)\}$ и

$C'_2 = C_2 \setminus C_{вн1} = \{5(1,8) - 7(8,2)\}$.

Добавляем полученную разность в конец приоритетного списка PL_p : $PL2 = \{1, 6, 2; 5, 7\}$.

Шаг 5.3. Выполняем суммирование $C'_{вн1}$ и C'_2 . Получаем: $C_{вн2} = \{5(1,8) - 7(8,2) - 6(2,3) - 2(3,1)\}$.

Далее процесс продолжается аналогичным образом:

$C_{вн3} = \{5(1,8) - 7(8,2) - 6(2,3) - 8(3,6) - 4(6,1)\}$;

$PL3 = \{1, 6, 2; 5, 7; 8, 4\}$;

$C_{вн4} = \{5(1,8) - 7(8,2) - 6(2,3) - 8(3,6) - 13(6,5) - 3(5,1)\}$;

$PL4 = \{1, 6, 2; 5, 7; 8, 4; 13, 3\}$;

$C_{вн5} = \{7(8,2) - 6(2,3) - 8(3,6) - 13(6,5) - 15(5,8)\}$;

$PL5 = \{1, 6, 2; 5, 7; 8, 4; 13, 3; 15\}$;

$C_{вн6} = \{9(8,3) - 8(3,6) - 13(6,5) - 15(5,8)\}$;

$PL6 = \{1, 6, 2; 5, 7; 8, 4; 13, 3; 15; 9\}$.

На следующем шаге алгоритма должен быть выбран цикл C_8 , однако в нем нет ни одного ребра, принадлежащего внешнему циклу. Поэтому временно пропустим его и перейдем к циклу C_9 .

$C_{вн7} = \{9(8,3) - 8(3,6) - 16(6,7) - 14(7,5) - 15(5,8)\}$.

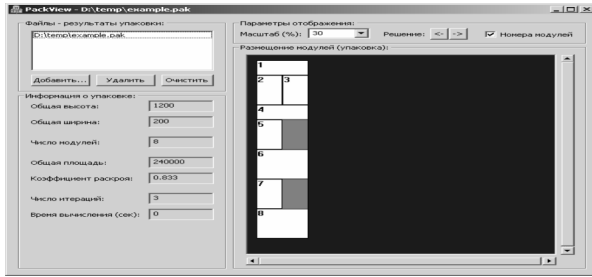


Рис. 8. План P , полученный на базе алгоритма «поиск с запретами», реализованного в [1]

$PL7 = \{1,6,2; 5,7; 8,4; 13,3; 15; 9; 16,14\}$.

Теперь во внешнем цикле появилось ребро 16 (6,7), возвращаемся к циклу C_8 :

$C_{вн8} = \{9(8,3) - 8(3,6) - 10(6,4) - 11(4,7) - 14(7,5) - 15(5,8)\}$;

$PL8 = \{1,6,2; 5,7; 8,4; 13,3; 15; 9; 16,14; 10,11\}$;

$C_{вн9} = \{12(8,4) - 11(4,7) - 14(7,5) - 15(5,8)\}$;

$PL9 = \{1,6,2; 5,7; 8,4; 13,3; 15; 9; 16,14; 10,11; 12\}$;

Шаг 6. Конец работы алгоритма.

Выход: приоритетный список: $PL9 = \{1(1,2), 6(2,3), 2(3,1); 5(1,8), 7(8,2); 8(3,6), 4(6,1); 13(6,5), 3(5,1); 15(5,8); 9(8,3); 16(6,7), 14(7,5); 10(6,4), 11(4,7); 12(8,4)\}$

Далее выполняем процедуру «декодер», осуществляющую размещение модулей по полученному приоритетному списку $PL9$ и их соединение с учетом условий 1–6.

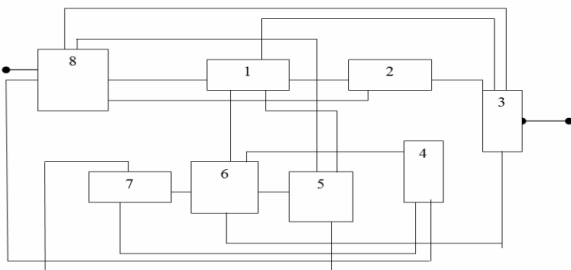


Рис. 9. Структурная схема

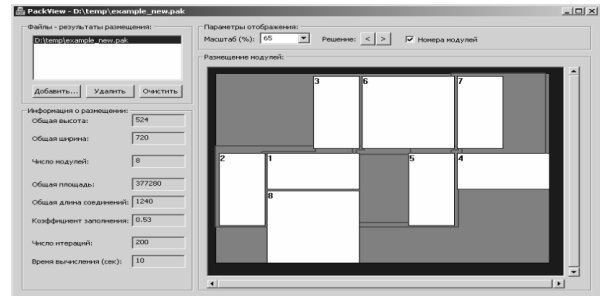


Рис. 10. План P' , удовлетворяющий ограничениям 1–6 с модулями, соединенными проводниками, в соответствии со структурной схемой на рис. 9

Данный алгоритм был реализован на языке Си. Рассмотрим результаты работы программы.

Вход: план P с размещенными по его «комнатам» модулями (рис. 8).

На рис. 9 приведена структурная схема, на которой показано взаимное расположение модулей и соединения между ними.

Выход: План P' (рис. 10) с модулями, соединенными проводниками, в соответствии со структурной схемой, изображенной на рис. 9.

Основные результаты работы заключаются в следующем: адаптирован алгоритм проверки планарности графа на базе процедур генетического алгоритма к задаче трассировки; разработан декодер, осуществляющий размещение модулей по комнатам плана и их соединение с учетом конструкторско-технологических ограничений; разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм проверки планарности графа на базе процедур генетического алгоритма и алгоритм декодера.

Разработанный алгоритм позволяет, в отличие от известных подходов, легко восстановить расположение модулей на кристалле таким образом, чтобы проводники, соединяющие модули, не пересекались, с учетом конструкторско-технологических ограничений.

Работа поддержана грантом РФФИ 10-07-91330_ННИО_а, 11-07-005-79-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zhuang, C.** An Enhanced Q-Sequence Augmented with Empty-Room-Insertion and Parenthesis Trees [Text] / C. Zhuang, K. Sakanushi, L. Jin [et al.] // The manual. Proc. of Design Automation. –2002. –P. 61–68.
2. **Burstein, M.** Channel routing, Layout Design and Verification [Text] / M. Burstein // Elsevier Science. –1986. –P. 133–167.
3. **Rautenbach, D.** Gate- and Wire-Sizing in VLSI

- Design [Text] / D.Rautenbach // The collection. Technics. –2006. –P. 58.
4. **Aurts, E.** Local Search in Combinatorial Optimization [Text] / E. Aurts, K. Lenstra // The collection. Technics. –1996. –P. 220.
5. **Koranne, S.** Practical Computing on the Cell Broadband Engine [Text] / S. Koranne // Springer Science. Technics. –2009. –P. 434.

6. **Корняков, К.В.** Алгоритм проектирования интегральных схем: Справ. издание [Текст] / К.В. Корняков. –М.: Наука, 2010. – С. 58.

7. **Емельянов, В.В.** Теория и практика эволюционного моделирования: Учеб. пособие [Текст] / В.В. Емельянов, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик. –М.: Физматлит, 2003. – С. 432.

8. **Пономарев, М.Ф.** Конструирование и расчет микросхем и микропроцессоров: Учеб. пособие для вузов [Текст] / М.Ф. Пономарев, Б.Г. Коноплев. –М.: Наука, 1986. – С. 142.

9. **Емеличев, В.А.** Лекции по теории графов: Справ. издание [Текст] / В.А. Емеличев, О.И. Мельников, В.И. Сарванов [и др.]. –М.: Наука, 1990. – С. 85.

УДК 614.8

Е.Л. Щесняк, И.П. Василюк, Ю.Г. Фоминых

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В системе образования уделяется пристальное внимание вопросам безопасности образовательных учреждений всех видов и уровней. Это обусловлено многочисленными фактами опасных происшествий в образовательных учреждениях: пожарами, правонарушениями, актами телефонного и политического терроризма. Таким образом, приоритетное направление деятельности любого образовательного учреждения – построение системы комплексной безопасности обучающихся и сотрудников [3, 4].

При проектировании и построении системы комплексной безопасности образовательного учреждения особое внимание следует уделить созданию системы пожарной безопасности и системы оповещения, базирующихся на современных вычислительных средствах и системах телекоммуникаций.

Главная задача, решаемая в рамках проектирования и создания системы комплексной безопасности – усиление контроля над действиями подразделений, задействованных в сфере обеспечения безопасности: сотрудников технических подразделений, управления контрольно-пропускного режима, частных охранных предприятий и пр.

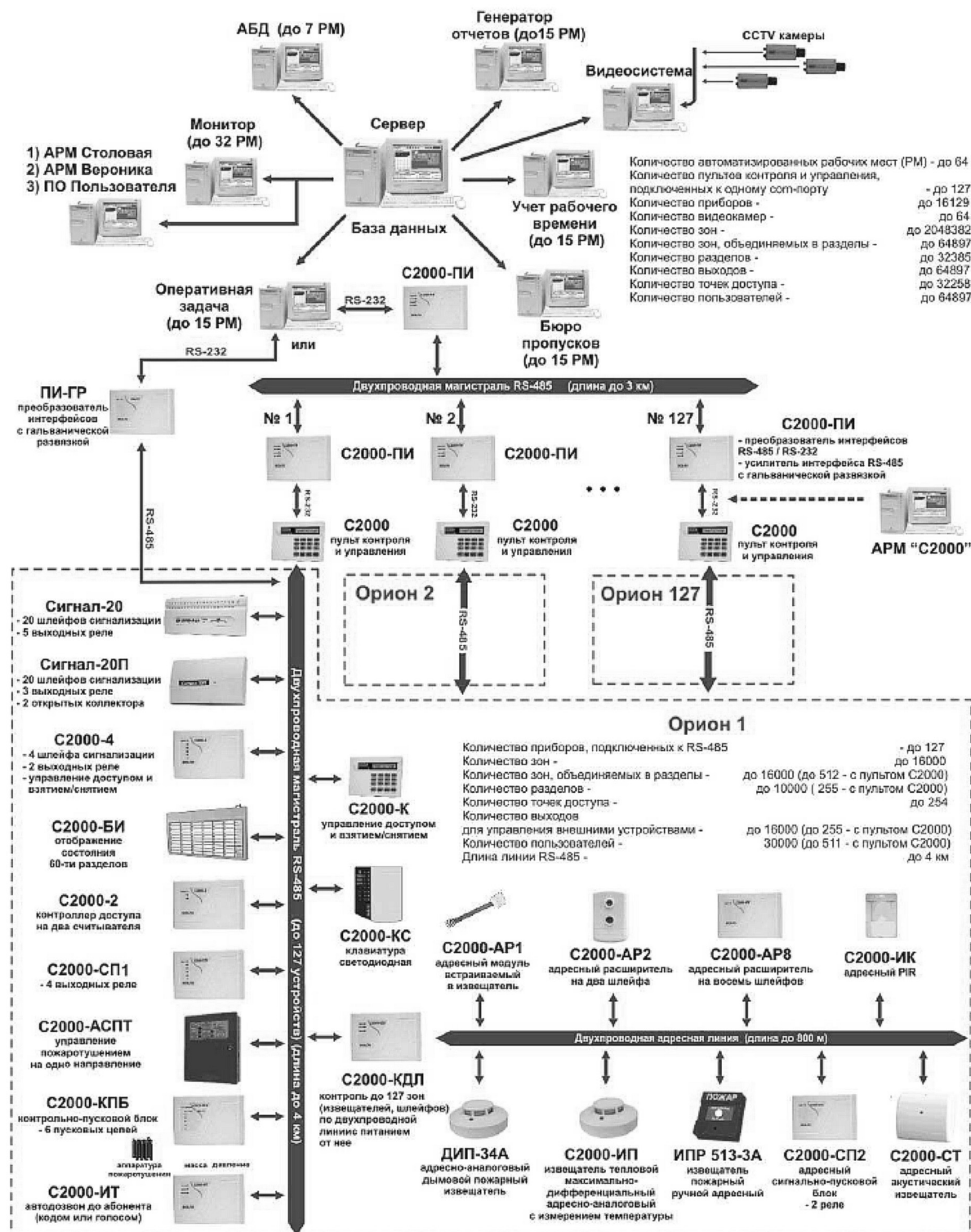
Рассмотрим формирование системы комплексной безопасности (СКБ) на примере одного из вузов – Российского университета дружбы народов.

Важнейшая техническая составляющая системы комплексной безопасности – автоматическая пожарная сигнализация (АПС). За последние восемь лет во всех зданиях общежитий и учебных корпусах Университета установлена АПС четвертого типа [1] и система оповещения о пожаре третьего типа [2].

Для решения задач по обеспечению комплексной безопасности (создания систем видеонаблюдения, контроля и управления доступом, охраны) построена многофункциональная телекоммуникационная сеть (на магистральных волоконно-оптических линиях связи), соединяющая все корпуса Университета, включая удаленные объекты.

С целью обеспечения мониторинга внештатных ситуаций в Университете создана центральная диспетчерская (ЦД – пункт центрального наблюдения и мониторинга), работающая в круглосуточном режиме. В основные функции ЦД входит дистанционный контроль состояния систем безопасности зданий Университета, принятие оперативных решений по возникающим нештатным ситуациям и сбор поступающей информации о нарушениях правопорядка, неполадках в системах жизнеобеспечения и безопасности и пр. Так, например, сигналы обо всех случаях срабатывания АПС передаются по сети в ЦД с обязательной фиксацией в электронном журнале оперативной информации; информация (согласно внутренней инструкции) в течение 2 мин передается в обслуживающее АПС подразделение для оперативного выяснения причин и исправления возникающих неисправностей. Указанные меры контроля дисциплинируют сотрудников, позволяют успешно бороться с проявлениями ненадлежащего исполнения своих обязанностей, небрежностью, халатностью и т. п.

Также в рамках решения задач по обеспечению комплексной безопасности в Университете созданы различные подразделения: отдел противопожарной профилактики, управление контрольно-пропускного режима, отделы, обе-



Интегрированная система охраны «Орион»
с использованием пультов «С2000» (v 1.20) и АРМ «Орион Про»



спечаивающие работу системы контроля и управления доступом, видеонаблюдения, охранной сигнализации, систем связи.

В качестве организационных мер по обеспечению комплексной безопасности разработан порядок реагирования служб и подразделений на возникающие нештатные ситуации различного характера. Например, при срабатывании датчика АПС, согласно должностной инструкции и инструкции о действии должностных лиц при возникновении опасных ситуаций, дежурный комендант и сотрудник охраны здания обязаны незамедлительно прибыть в помещение, в котором произошло срабатывание датчика, установить причину срабатывания и сообщить о ней в ЦД. Со своей стороны сотрудник ЦД в режиме on-line через систему видеонаблюдения контролирует действия сотрудников частного охранного предприятия. При срабатывании датчика АПС на мониторе ЦД в автоматическом режиме отражается информация с указанием точного места расположения датчика (конкретной комнаты, коридора, холла и т. д.). Также диспетчер имеет возможность просмотреть через систему видеонаблюдения подходы к месту расположения датчика, проконтролировать действия сотрудников по выяснению причин срабатывания.

Параллельно с монтажом автоматической пожарной сигнализации произведено подключение к центральному и локальным пультам управления АПС других средств и систем безопасности: электромагнитных замков, систем управления лифтами и средствами дымоудаления. В случае выдачи системой управления сигнала «Пожар» в здании происходит автоматическое открывание запасных эвакуационных выходов, оборудованных электромагнитными замками, автоматический спуск лифтов на первый этаж здания и их последующая блокировка, автоматическое открывание клапанов системы дымоудаления и запуск вентилятора дымоудаления.

С целью развития комплексной системы безопасности проведена интеграция различных систем безопасности. Так, при срабатывании датчика автоматической пожарной сигнализации на экран в ЦД автоматически выводятся изображения с видеокамер, находящихся в ближайшей зоне к датчику АПС.

Разработка и внедрение упомянутых выше

систем происходили в течение последних 10 лет. Для обеспечения надежности системы комплексной безопасности Университета, АПС, системы видеонаблюдения, контроля и управления доступом построены по принципу объединения локальных автономных подсистем зданий. Установлена интегрированная система охраны «Орион» – комплекс, предоставляющий возможность контроля и управления системами охранно-пожарной сигнализации автоматического пожаротушения, другими инженерными системами зданий. Схема системы приведена на рисунке.

Программное обеспечение системы регулярно обновляется: в настоящее время в зданиях внедрена новая версия программного обеспечения «Орион Про», обладающая более широким спектром настройки уже подключенных подсистем безопасности, а также более высоким уровнем отказоустойчивости. Важное отличие системы «Орион Про» от предыдущей системы «Орион» – возможность перехода на резервный сервер в случае возникновения сбоев в работе компьютера.

Выбранное направление поэтапного построения комплексной системы безопасности на единой телекоммуникационной основе представляется экономически целесообразным – построенная единая телекоммуникационная система позволяет предоставлять и другие необходимые вузу информационные услуги: обеспечивать работу административных, учебных компьютерных сетей, доступ в Интернет. Кроме того, мощная система обеспечения безопасности повышает привлекательность вуза для абитуриентов и их родителей, создает у учащихся чувство дополнительного психологического комфорта, реально повышает защищенность вуза от криминальных, террористических угроз и техногенных катастроф. Использование современных телекоммуникационных технологий для обеспечения комплексной безопасности образовательного учреждения – основное звено в информационных потоках, связанных с возможными чрезвычайными ситуациями в образовательном учреждении. Данные технологии позволяют в кратчайшие сроки осуществить сбор всех данных и, проанализировав их, принять верное решение.

Научно-исследовательская работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы пожарной безопасности 88-2001: Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования [Текст].
2. Нормы пожарной безопасности 104-03: Системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожарах в зданиях и сооружениях [Текст].
3. **Брушлинский, Н.Н.** Безопасность городов: имитационное моделирование городских процессов и систем [Текст] / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, П. Вагнер [и др.]. –М.: Фазис, 2004. –172 с.
4. Моделирование пожаров и взрывов [Текст] / Под ред. Н.Н. Брушлинского, А.Я. Корольченко. –М.: «Пожнаука», 2000 –482 с.

УДК 005

Д.Н. Верзилин, С.И. Шаныгин, Е.В. Черешнева

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Моделирование социальных систем — достаточно эффективный инструмент их исследования, особенно востребованный при необходимости количественной оценки устойчивости протекающих в них социальных (целевых) процессов (УСП). Любая социальная система (СС) с позиции управления ею может рассматриваться как организационная многофункциональная социально ориентированная система, существующая для достижения целей элементов социума, функционирующая по определенным законам и ограниченная во времени и пространстве. Соответственно такая система может исследоваться с помощью математических моделей.

Модельным исследованиям сложных систем посвящено большое количество научных работ отечественных и зарубежных авторов. В частности, в трудах Н.П. Бусленко, Е.Ф. Аврамчука, А.А. Вавилова, С.В. Емельянова [1, 6] рассматриваются в достаточно обобщенном виде методы моделирования систем. Вопросы системного анализа и моделирования систем изучены в работах Б.З. Мильнера, А.Д. Цвиркуна, В.К. Акинфиева [7–10]. В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, Н.А. Коргин, В.В. Кондратьев исследовали проблемы оптимального управления организационными системами [2, 3]. Монография Р.М. Юсупова, М.Ю. Охтилева, Б.В. Соколова [6] посвящена вопросам управления сложными системами различного назначения. В работе А.Н. Дорохова [4] обоснована целесообразность использования полиномиальных функций в качестве достаточно универсального инструмента математического моделирования сложных систем.

Вопрос о выборе вида и структуры модели сложной системы обсуждался и многими другими

авторами. Однако до настоящего времени обобщенная универсальная методика решения задачи отсутствует. В некоторых случаях представляется целесообразным проводить многофакторные исследования на УСП при построении моделей, но при этом обычно делаются предположения об известности вида и структуры системы аналитических соотношений и входящих в них функций, описывающих систему. Отсутствие универсальных методик построения математических моделей систем в виде таких соотношений и значительные сложности в создании формализованных моделей реальных систем существенно затрудняют разработку и использование моделей в практике моделирования сложных СС. Рассмотрим подходы к моделированию состояния и функционирования социальной системы как организационной системы, осуществляющей свою целенаправленную деятельность в условиях влияния существенно различных внешних и внутренних факторов социального, экономического и иного характера. С учетом этого используем часть положений, приведенных в [4].

В общем случае задачу построения математической модели СС целесообразнее решать в начале существования системы. На этом же этапе необходимо решать задачи оптимального синтеза СС, выбора управляемых параметров и прогнозирования развития. На этапе целевой деятельности возможно решение задач прогнозирования, идентификации моделей и определения величин управляющих воздействий. В настоящее время широкое распространение получили методы построения моделей сложных систем, основанные на результатах экспериментов (активных и пассивных), т. к. они, во-первых, позволяют ис-

пользовать для построения моделей реальные значения контролируемых показателей СС, а, во-вторых, дают возможность комплексно оценивать влияние различных факторов на систему без уточнения их природы. Наиболее простым путем получения информации о социальных целевых процессах, протекающих в исследуемой СС, является анализ этих процессов в ходе ее нормального функционирования (пассивный эксперимент). Ценность математических моделей, построенных по результатам такого эксперимента, несколько снижается их следующими отрицательными свойствами: малыми величинами интервалов варьирования внутренних параметров СС, коррелированностью параметров между собой; невозможностью гарантированного выбора величин управляющих воздействий для оптимизации внутренних параметров СС.

Указанные недостатки менее характерны для моделей, построенных по результатам активных экспериментов. В общем случае проведение активного эксперимента позволяет построить более корректную модель функционирования системы, однако в реальных социальных системах его применение сопряжено со значительными трудностями, а во многих случаях – невозможно. В связи с этим актуальна задача построения математической модели СС в виде функциональных зависимостей ее выходных параметров y_i ($i = 1, 2, \dots, m$) от внутренних x_j ($j = 1, 2, \dots, n$) и от времени t по результатам пассивного эксперимента:

$$y_i = F_i(t, x_{(n)}). \quad (1)$$

Решение такой задачи позволяет: построить модель, отражающую изменение внутренних и внешних параметров СС; определить внутренние параметры, в наибольшей степени влияющие на выходной параметр СС; определить текущее состояние системы; выбрать значения внутренних параметров СС, соответствующие экстремальному значению показателя УСП или другого выбранного показателя при нахождении выходного параметра в заданных пределах; выбрать величины управляющих воздействий, необходимые для поддержания выходного параметра СС в пределах допустимых значений и обеспечения экстремальной величины выбранного показателя [4]. Одно из решений данной задачи – представление функциональной зависимости (1) в виде многомерного нелинейного полинома. Полиномиальные модели рекурсивны и всегда вычислимы, с

помощью такой модели любая непрерывная по внутренним параметрам аналитическая функция может быть описана с практически любой заданной точностью.

Рациональное определение выходных и внутренних параметров СС при моделировании дает возможность построить адекватную модель и в то же время сократить затраты на экспериментальное исследование. Выбор выходных параметров СС определяется в каждом конкретном случае в соответствии с предъявляемыми к системе требованиями, выполняемыми ею социальными задачами и условиями ее целевой деятельности. В качестве выходных необходимо выбирать параметры, наиболее полно отражающие состояние такой системы. На выбор параметров влияют достижимая точность их определения, наличие методик измерений и анализа данных, стоимость и другие факторы. В качестве внутренних целесообразно выбирать существенные параметры моделируемой СС, изменение которых оказывает наибольшее влияние на ее состояние и выходные параметры.

При выборе контролируемых параметров СС обычно предполагается, что они независимы. Многие процессы в СС оказывают влияние на смежные с ними процессы, тем не менее, это предположение нельзя считать недопустимым: в любой СС существует значительное количество независимых параметров, достаточно полно характеризующих ее. В том случае, когда ряд параметров оказываются зависимыми, можно выбрать только один из них, что сократит размерность модели без ее существенного ухудшения. В больших системах, каковыми являются рассматриваемые СС, это допустимо. Общее свойство процессов изменения параметров во времени (в первую очередь – параметров структурных элементов СС) – отсутствие стационарности. В подавляющем большинстве социальные процессы имеют ярко выраженную тенденцию изменения среднего значения характеризующего их показателя во времени на достаточно больших интервалах наблюдения.

В СС некоторые факторы могут вызывать самовосстанавливающиеся без управляющих воздействий изменения, некоторые – невосстанавливающиеся. Последние считаются причиной существенного изменения параметров социальных процессов, требуют анализа и выработки управляющих воздействий. На практике такие



изменения протекают сравнительно медленно, интенсивность их зависит от многих управляемых и неуправляемых факторов, и математически хорошо описываются медленно меняющимися и монотонными функциями. Для формализации подхода можно считать, что подавляющее большинство изменений во времени внутренних и внешних параметров практически любой социальной системы в основном двух типов: случайные и детерминированные. Соответственно, для описываемого процесса характерно наличие двух аддитивных независимых составляющих:

$$\hat{x}_j(t) = x_{1j} + \hat{x}_{2j}(t); \hat{y}_i(t) = y_{1i} + \hat{y}_{2i}(t), \quad (2)$$

где $\hat{x}_j(t)$ и $\hat{y}_i(t)$ – нестационарные случайные процессы изменения j -го внутреннего и i -го выходного параметров СС; $x_{1j}(t)$ и $y_{1i}(t)$ – детерминированные составляющие случайного процесса; $\hat{x}_{2j}(t)$ и $\hat{y}_{2i}(t)$ – случайные составляющие этого процесса [4].

Для изучения свойств детерминированных составляющих можно заменить их приближающими алгебраическими многочленами. Для длительного социального процесса случайная компонента изменения параметров СС достаточно мала по сравнению с детерминированной. Можно допустить, что случайный процесс изменения j -го внутреннего параметра СС полностью характеризуется детерминированной составляющей $x_{1j}(t)$ и законом распределения случайной составляющей $\hat{x}_{2j}(t)$ в момент времени t . Средние значения изменений параметров таких процессов часто известны или могут быть получены в результате проведения исследования статистических характеристик внутреннего параметра. Как правило, протекающие в таких системах социальные процессы не являются абсолютно уникальными, и имеется возможность обеспечить достаточное число наблюдений за случайной величиной x_j в других аналогичных системах. Методики соответствующих статистических исследований известны.

Наилучшими с позиции информативности описания СС являются динамические модели, позволяющие отразить причинно-следственные связи в системе и охарактеризовать во времени процесс перехода системы из одного состояния в другое [4, 5]. Применительно к СС возможны два основных вида такой модели:

представляющие собой зависимость выходных параметров от наиболее важных внутренних и времени

$$\hat{y}_{\langle m \rangle}(t) = F_{\langle m \rangle}(\hat{x}_{\langle n \rangle}, t); \quad (3)$$

представляющие собой зависимость выходных параметров от законов изменения важных внутренних параметров во времени

$$\hat{y}_{\langle m \rangle}(t) = F_{\langle m \rangle}(\hat{x}_{\langle n \rangle}(t)). \quad (4)$$

Особенность социальной системы при построении модели вида (3) – учет времени как самостоятельного параметра. В общем случае для каждого момента времени t желательно проводить активный эксперимент по исследованию выходных параметров $\hat{y}_j$ как функций существенных внутренних параметров $x_{\langle n \rangle}$. Оценка детерминированной составляющей функции выходных параметров выполняется по данным наблюдений в ключевых точках пространства внутренних параметров СС. Поскольку время входит в модель (3) в качестве самостоятельного фактора, детерминированную составляющую функции можно заменить константой, являющейся оценкой ее в начальный момент времени t_0 . При построении модели вида (4) время не включается в категорию важных параметров, и определение коэффициентов модели проводится только по результатам наблюдений, осуществляемых в начальный момент времени t_0 . Коэффициенты при этом предполагаются постоянными величинами, что несколько огрубляет модель. Эта модель также может иметь детерминированную и случайную составляющие.

Теоретически оба вида динамических моделей могут быть использованы для исследования социальных систем. Однако большинство социальных систем имеют особенность: проведение в них активного эксперимента в процессе целевой деятельности практически невозможно, а информация об изменении внутренних параметров $\hat{x}_{\langle n \rangle}(t)$ во времени часто отсутствует. Поэтому использование моделей (3) и (4) затруднительно и для исследования таких систем целесообразно строить статическую модель вида [4]:

$$\hat{y}_{\langle m \rangle} = F_{\langle m \rangle}(\hat{x}_{\langle n \rangle}). \quad (5)$$

Учитывая, что для социальных систем применимы в основном только регламентные технологии управления, эта модель вполне применима для оптимального выбора номинальных значений внутренних параметров СС по критерию УСП. Модель строится путем обработки результатов пассивного эксперимента, заключающегося в наблюдении значений выходных параметров $\hat{y}_j$

в ключевых точках пространства внутренних параметров системы. Так как проведение активного эксперимента невозможно, то фактически осуществляется лишь регистрация значений $\hat{y}_j$ в заданные моменты времени, по результатам которых строится модель вида:

$$\hat{y}_{\langle m \rangle}(t) = \hat{F}_{\langle m \rangle}(t). \quad (6)$$

Такая модель достаточно удобна для прогнозирования и часто используется на практике. Она дает возможность учитывать суммарное воздействие на СС всех факторов, однако не позволяет выявлять причинно-следственные связи в исследуемой системе, и поэтому точность ее обычно меньше, чем у моделей (3) и (4).

Существенным при построении полиномиальной модели СС является и вопрос выбора степени аппроксимирующего полинома. Чем выше степень, тем точнее приближение, однако при этом увеличивается число ключевых точек пространства внутренних параметров и, следовательно, затраты и продолжительность исследования. А фактор времени существенно влияет на пригодность полученной модели для прогнозирования. Практика показывает, что большинство моделей, имеющих четко определенный перечень факторов и содержащих количественно заданные их весовые коэффициенты, через некоторое время становятся практически непригодными для выполнения прогноза. Объясняется это существенным изменением самой моделируемой системы и условий ее деятельности. Вопрос определения степени приближающего полинома для каждой конкретной модели должен решаться индивидуально в зависимости от ее назначения, условий создания и применения. Достаточно удобны в этом плане методы корреляционно-регрессионного анализа.

Одна из важных задач исследования социальной системы как организационной структуры – обеспечение уровня качества протекающих в ней социальных процессов путем поддержания оптимального ее состояния посредством управляющих воздействий. Состояние СС в таком случае оценивается по значениям контролируемых параметров, и задача обеспечения уровня качества сводится к поддержанию значений этих параметров в области допустимых значений (ОДЗ). В качестве критерия оптимизации состояния СС целесообразно выбрать вероятность устойчивости ее целевых (социальных) процессов.

Решение задачи обеспечения УСП в системе можно разделить на несколько формализованных этапов, аналогичных приведенным в [4].

Первый этап – разработка модели СС в виде зависимости ее выходных параметров от внутренних. Такая модель может быть описана отношением:

$$f = \langle X, \Sigma, T, T, Y, F \rangle, \quad (7)$$

где f – отображение из $X \times \Sigma \times T \times T$ в Y , сопоставляющее каждому кортежу $\langle x, \sigma, t_0, t \rangle \in X \times \Sigma \times T \times T$ элемент $y \in Y$; $Y = y_{\langle m \rangle}$ – множество выходных параметров СС; $\Sigma = \sigma_{\langle n \rangle}$ – множество допустимых отклонений внутренних параметров СС от среднего (оптимального) значения; $T = \{ \langle t \rangle \mid t \in (t_0, t_k] \}$ – множество моментов времени; F – график данного отображения; t_n – начальный момент времени, в который выполняются оценки параметров СС, на основании которых осуществляется построение модели; t_0 – момент начала целевой деятельности СС; t_k – конечный момент времени, соответствующий предполагаемому окончанию периода прогнозирования состояния (или целевой деятельности) СС.

Второй этап – построение модели социально-го процесса в виде отношения:

$$c = \langle X, \Sigma, T, T, Y, P, C \rangle, \quad (8)$$

где c – отображение из $X \times \Sigma \times T \times T \times Y$ в P ; $P = \{ p_{\langle l \rangle} \}$ – множество показателей УСП СС; C – график отображения.

Третий этап – оптимальный по заданному критерию выбор параметров структурных элементов СС на этапе ее создания (появления). Задача выбора при этом может быть описана следующим образом:

$$p(X \times \Sigma \times T \times T \times Y) \rightarrow \text{extr}_{\hat{x}_{\langle n \rangle} \in \{ \hat{x}_{\langle n \rangle}^A \}}, \quad (9)$$

где $p(\cdot)$ – выбранный показатель УСП.

На четвертом этапе осуществляется идентификация состояний СС в процессе ее фактической целевой деятельности, которая сводится к оцениванию степени близости наблюдаемых и спрогнозированных значений выходных параметров СС $y_{\langle m \rangle}$ и $\tilde{y}_{\langle m \rangle}$ через показатель $G(\cdot)$. При этом значения внутренних параметров $x_{\langle n \rangle}^*$ находятся решением оптимизационной задачи:

$$G(X \times \Sigma \times T \times T \times Y_1 \times F) \rightarrow \text{extr}_{x_{\langle n \rangle} \in \{ \hat{x}_{\langle n \rangle}^A \}}, \quad (10)$$

при ограничениях $t_n = t_0$; $t = t_n$; $t_n \in T$; $\hat{y}_{\langle m \rangle} \in \{ \hat{y}_{\langle m \rangle}^A \}$; $\sigma_{\langle \rangle}^* = \{ \sigma_{\langle \rangle}^A \}$,



где $\sigma_{\langle \rangle}^*$ – вектор допустимых (нормативных) отклонений параметров.

Тогда модель СС на этапе ее целевой деятельности можно представить как отношение:

$$f_1 = \langle X_1, \Sigma_1, T, T, Y, F_1 \rangle, \quad (11)$$

где f_1 – отображение из $X_1 \times \Sigma_1 \times T \times T \times Y$; $\Sigma_1 \subset \Sigma$ – множество ОДЗ внутренних параметров $x_{1\langle K \rangle} \in \hat{X}_1$; F_1 – график отображения; $\hat{X}_1 = \{\hat{x}_{1\langle K \rangle}^d\}$.

Последним этапом является выбор оптимальных по заданному критерию управляющих воздействий на внутренние параметры СС в процессе ее целевой деятельности. Эту задачу можно представить следующим образом:

$$P(X_1 \times \Sigma_1 \times T \times T \times Y \times F) \rightarrow \underset{\Delta x_{1\langle K \rangle} \in \{\Delta x_{1\langle K \rangle}^d\}}{\text{extr}}, \quad (12)$$

где $\Delta x_{1\langle K \rangle} = (x_{1\langle K \rangle}^* - \tilde{x}_{1\langle K \rangle})$ – вектор управляющих воздействий, такой, что $\Delta x_{1\langle K \rangle} \in \{\Delta x_{1\langle K \rangle}^d\}$; $\{\Delta x_{1\langle K \rangle}^d\}$ – множество допустимых управляющих воздействий; $x_{1\langle K \rangle}^*$ – вектор внутренних параметров СС, изменяемых на этапе ее целевой деятельности, значения компонентов которого определены при решении задачи (12); $\tilde{x}_{1\langle K \rangle}$ – вектор тех же параметров, значения компонентов которого определены на четвертом этапе в процессе измерения внутренних параметров СС или нахождения их значений при решении задачи (11).

Одной из особенностей является то, что границы ОДЗ выходных и внутренних параметров, определяющих дееспособность СС, можно однозначно выявить лишь проведением активных экспериментов в областях изменения внутренних и выходных параметров, существенно больших соответствующих при нормальных условиях функционирования СС. Поскольку искусственное доведение реальных СС до состояния прекращения целевых процессов невозможно, то указанные выше ОДЗ будут иметь случайные границы.

Для построения полиномиальных моделей целесообразно выделить в ОДЗ внутренних параметров значительное число ключевых точек, в которых определяются значения выходных параметров СС. Знание величин выходных параметров позволяет найти значение целевой функции в ключевых точках и использовать их в качестве исходных для выполнения локальной оптимизации. Это дает возможность применять известные методики поиска локального экстремума многопараметрических функций для определения опти-

мальных значений внутренних параметров СС по выбранному критерию УСП.

Значения показателей УСП СС позволяют судить о состоянии СС, характеризуют издержки ее функционирования и эффективность целевой деятельности, определяют периодичность проведения различных видов аудита. Показатели УСП применимы на всех этапах создания и целевой деятельности социальной системы как сложной организационной структуры и обеспечивают комплексный подход к проблеме улучшения параметров СС и ее целевых процессов, увеличения длительности периодов функционирования между смежными контрольными и корректирующими мероприятиями. С практических позиций УСП в большинстве случаев целесообразно оценивать вероятностным способом:

$$P(\Delta t) = P_1(\Delta t) \cdot P_2(\Delta t), \quad (13)$$

где $P_1(\Delta t)$ – вероятность УСП при внезапных существенных изменениях их характеристик в течение времени $\Delta t = (t - t_0)$; $P_2(\Delta t)$ – вероятность УСП при постепенных изменениях этих характеристик за время Δt , при условии, что внезапных существенных изменений не было.

Расчет $P_1(\Delta t)$ для СС сводится к вычислению итоговой вероятности:

$$P_1(\Delta t) = (1 - P_{11}(\Delta t) \cdot P_{12}(\Delta t) \cdot P_{13}(\Delta t)), \quad (14)$$

где $P_{11}(\Delta t)$ – вероятность возникновения неожиданных социальных, экономических и иных причин, обязательно провоцирующих существенные изменения в течении социальных процессов; $P_{12}(\Delta t)$ – вероятность восприимчивости внутреннего состояния СС к неожиданному воздействию дестабилизирующих факторов (отрицательной «готовности» к таким изменениям); $P_{13}(\Delta t)$ – вероятность чрезмерно чуткого изменения выходных параметров СС при колебаниях значений внутренних параметров.

Вычисление $P_2(\Delta t)$ для СС сводится к определению вероятности нахождения внутренних и выходных параметров СС в соответствующих ОДЗ. Известные результаты исследований изменений выходных характеристик обобщенных систем показывают, что при отсутствии внезапных существенных изменений значений их параметров, детерминированные составляющие, величины которых многократно превосходят значения случайных составляющих, являются медленно меняющимися и монотонными во времени. Поэтому

для определения $P_2(\Delta t)$ СС может быть применено следующее соотношение [4]:

$$P_2(\Delta t) = P(\hat{y}_{\langle m \rangle}(t) \in \{\hat{y}_{\langle m \rangle}^{\Delta}\} \cap \hat{x}_{\langle n \rangle}(t) \in \{\hat{x}_{\langle n \rangle}^{\Delta}\}), \quad (15) \\ \text{при } t \in [t_0, t_k].$$

Описанный подход к вычислению оценок показателей УСП дает возможность использовать известные статистические или экспертные данные об изменении законов распределения и значений параметров структурных элементов СС во времени с целью повышения точности и достоверности оценок показателей УСП, а также комплексно учитывать суммарное влияние большого количества различных параметров СС при оценке показателей УСП. Если известны статистические или вероятностные зависимости изменения характеристик социальных процессов (внутренних параметров) под воздействием дестабилизирующих факторов, возможно прогнозирование социальных последствий целевых процессов при предполагаемом законе изменения этих факторов.

Таким образом, в результате построения модели СС и решения задачи выбора номинальных значений внутренних параметров и их ОДЗ на этапе ее создания (появления), а также прогнозирования на ближайший период времени значений ее внутренних и выходных параметров, появляется возможность управления состоянием СС и УСП на этапе ее целевой деятельности. Значения выбранных показателей УСП СС зависят от нахождения ее выходных параметров в ОДЗ и, следовательно, от значений внутренних параметров в некоторый момент времени. Воздействуя на величины внутренних параметров СС, можно управлять значениями показателей УСП. Так как выбор номинальных значений внутренних параметров на этапах создания и начала целевой деятельности СС не гарантирует сохранения максимально возможных значений показателей УСП в дальнейшем, то очевидно, что УСП можно повышать, изменяя величины внутренних параметров в процессе функционирования СС.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, госконтракт № 02.740.11.0437, РФФИ (проект 11-06-00454-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бусленко, Н.П.** Моделирование сложных систем [Текст] / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
2. **Бурков, В.Н.** Введение в теорию управления организационными системами: Учебник [Текст] / В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков; Под ред. Д.А. Новикова. – М.: Либроком, 2009. – 264 с.
3. **Бурков, В.Н.** Механизмы функционирования организационных систем [Текст] / В.Н. Бурков, В.В. Кондратьев. – М.: Наука, 1981. – 384 с.
4. **Дорохов, А.Н.** Метод повышения надежности сложной системы [Текст] / А.Н. Дорохов. – Л.: ЛВИКА, 1984. – 242 с.
5. **Охтилев, М.Ю.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов [Текст] / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
6. **Аврамчук, Е.Ф.** Технология системного моделирования [Текст] / Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов [и др.]. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 520 с.
7. **Цвиркун, А.Д.** Основы синтеза структуры сложных систем [Текст] / А.Д. Цвиркун. – М.: Наука, 1982.
8. **Цвиркун, А.Д.** Структура многоуровневых и крупномасштабных систем: Синтез и планирование развития [Текст] / А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев. – М.: Наука, 1993.
9. **Мильнер, Б.З.** Организация программно-целевого управления [Текст] / Б.З. Мильнер. – М.: Наука, 1980.
10. **Мильнер, Б.З.** Теория организации: Учебник [Текст] / Б.З. Мильнер; 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2003. – 558 с.



ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Современный этап развития информационно-управляющих систем (ИУС) государственного управления характеризуется значительным повышением требований к оперативности управления. Производимая в настоящий момент модернизация ИУС не принесла ожидаемых результатов повышения эффективности управленческой деятельности должностных лиц. Значительные объемы информации, которые приходится обрабатывать должностным лицам ИУС в процессе поиска оптимальных решений, с одной стороны, и низкая производительность управленческого труда, с другой, создают серьезное противоречие, разрешение которого возможно только при интенсивном освоении инфокоммуникационных технологий (ИКТ) и организации их применения [1].

Информационно-технические средства (ИТС) вместо того, чтобы повысить оперативность функционирования ИУС, сами порождают новые трудности, а иногда даже влекут за собой увеличение штата обслуживающего персонала. Положение усугубляется тем, что выбор программного обеспечения и аппаратных средств, отличающихся своими техническими и стоимостными показателями, чрезвычайно широк, а научно подтвержденные методы сравнения и обоснования их применения требуют совершенствования. Эффективность использования таких систем в ИУС государственного управления крайне низкая. Поэтому попытки автоматизировать важнейшие функции управления часто приводят к неоправданно высоким временным и стоимостным затратам и не всегда обеспечивают ожидаемый положительный результат.

Развитие современных ИУС на основе ИКТ, применение новых систем связи, реализация модульного принципа построения, разнос комплекса информационно-технических средств (КИТС) на большой территории, увеличение связности объектов и команд управления приводят к значительному усложнению функций управления, увеличению интенсивности обра-

батываемой информации и уменьшению времени принятия решения должностными лицами ИУС [2].

Статистическая обработка данных информационного обследования ИУС свидетельствует о пяти–шестикратных превышениях допустимых значений информационной нагрузки должностных лиц. В связи с этим возникает чрезвычайно важная и актуальная задача поиска путей уменьшения напряженности управленческой деятельности должностных лиц ИУС с одновременным повышением оперативности управления, решение которой невозможно только за счет количественного наращивания ИКТ [1].

Первостепенное значение имеет задача оптимального сочетания средств ИКТ со средой их применения, в частности, в составе КИТС ИУС. Поэтому использование ИКТ с применением методов компьютерного моделирования в оптимизации структуры КИТС, обеспечивающее повышение оперативности сбора, обобщения, анализа информации о состоянии системы управления и своевременное принятие на ее основе обоснованных решений, – актуальная задача совершенствования ИУС.

Исследование оперативности функционирования ИУС является сложной задачей по целому ряду причин. Во-первых, из-за особенностей процесса управления, многообразия связей между самой ИУС и внешней средой, большого количества различных факторов, воздействующих на нее, не позволяющих использовать существующий или создать адекватный проблеме формальный аппарат. Во-вторых, из-за несоответствия временных характеристик получения и использования информации. Как следствие, не выполняются условия инвариантности информационных процессов. Действительно, все управляющие воздействия осуществляются на основе текущего представления информации, а оно, в свою очередь, определяется динамикой развития этих же управленческих процессов. Это та граница, которую невозможно

учесть с помощью существующих в настоящее время формальных методов оценки качества систем.

Структура КИТС ИУС государственного управления может быть представлена в виде [2]:

$$S_f = \{r_l, e_\xi, b_j, d_i, k_m, \|h_{j-1,j}\|\}. \quad (1)$$

В качестве критерия выбора рациональной структуры КТС предлагается использовать функцию ценности информации $G = G(S)$, поскольку она наиболее точно позволяет установить соответствие между управленческими функциями и функциями КТС. Вместе с тем, этот критерий позволяет количественно оценить различные варианты структур КТС и выбрать среди них наиболее предпочтительный.

Тогда задача оптимизации структуры КИТС ИУС будет состоять в том, чтобы из множества ИТС $D = (d_i)$, $i = \overline{1, I}$ обеспечивающего выполнение технологических операций $E = (e_\xi)$, $\xi = \overline{1, \Delta}$ и образующих законченный цикл преобразования информации $B = (b_j)$, $j = \overline{1, J}$ на множестве функций управления $R = (r_l)$, $l = \overline{1, L}$ и характеризующегося множеством параметров $K = (k_m)$, $m = \overline{1, M}$ и матрицей смежности $\|h_{j-1,j}\|$, найти такую структуру $S_0 \subset S$, которая максимизирует функцию ценности информации $G(S)$, т. е. требуется найти:

$$G(S_0) = \max_{S_0 \subset S} G(S\{r_l, e_\xi, b_j, d_i, k_m, \|h_{j-1,j}\|\}). \quad (2)$$

При условии выполнения следующих ограничений:

$$\sum_i \sum_j L_j Z_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_n L_n V_{ijn} \leq C_{\text{доп}},$$

где $C_{\text{доп}}$ – допустимые материальные затраты на КТС; L_j – затраты на разработку и эксплуатацию КТС j -й фазы; L_n – затраты на обработку n -го элемента информации из множества; $\Pi = \{\pi_n\}$, $n = \overline{1, N}$;

$$Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я фаза оборудована } i\text{-м ТС;} \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$V_{ijn} = \begin{cases} 1, & \text{если } n\text{-й элемент информации} \\ & \text{обрабатывается в } j\text{-й фазе } i\text{-м ТС;} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Для оценки оперативности функционирования ИУС используется коэффициент оперативности управления [2]:

$$K_w = 1 - \frac{T_p}{T_{\text{доп}}}, \quad (3)$$

где T_p – длительность цикла управления (время

технологического цикла преобразования информации в ИУС); $T_{\text{доп}}$ – допустимая длительность цикла управления (допустимое время преобразования информации управления, по истечении которого она теряет свое значение для ИУС, т. е. $1 > K_w \geq 0$).

В процессе информационного обмена в ИУС на оперативность ее функционирования оказывает влияние структура КИТС, непосредственно влияющая на производительность η_{pij} ИУС и степень автоматизации управленческой деятельности должностных лиц ИУС на каждой j -й фазе преобразования информации в зависимости от используемого i -го ИТС:

$$\eta_{pij} = \frac{V_{pij}}{T_{pij}}; \gamma_{ij} = \frac{V_{pij}^A}{V_{pj}}, \quad (4)$$

где V_{pj} – совокупный объем выполненных работ на j -й фазе; V_{pij}^A – объем работ, выполненных i -м ИТС на j -й фазе; γ_{ij} – коэффициент автоматизации управленческой деятельности должностных лиц ИУС с использованием i -го ИТС на j -й фазе.

Тогда с учетом выражений (1) и (4), выражение (3) можно записать в виде:

$$K_w(S_f) = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\tilde{T}_{pij}^H [\gamma_{ij} \cdot \xi_{ij} + (1 - \gamma_{ij})] \right)}{T_{\text{доп}}}, \quad (5)$$

$$\text{где } \tilde{T}_{pij}^H = \frac{K_{\Gamma ij} P_{\text{вб}pij} V_{pj}}{\eta_{pij}^H}; \xi_{ij} = \frac{\eta_{pij}^H}{\eta_{pij}^A},$$

$K_{\Gamma ij}$ – коэффициент готовности i -го ИТС на j -й фазе; $P_{\text{вб}pij}$ – вероятность безотказной работы i -го ИТС на j -й фазе; $\tilde{T}_{pij}^H$ – усредненное время преобразования информации i -м ИТС на j -й фазе; η_{pij}^A – производительность i -го ИТС на j -й фазе; η_{pij}^H – производительность должностных лиц без использования i -го ИТС на j -й фазе; ξ_{ij} – коэффициент относительной производительности i -го ИТС на j -й фазе, при условии выполнения следующих ограничений:

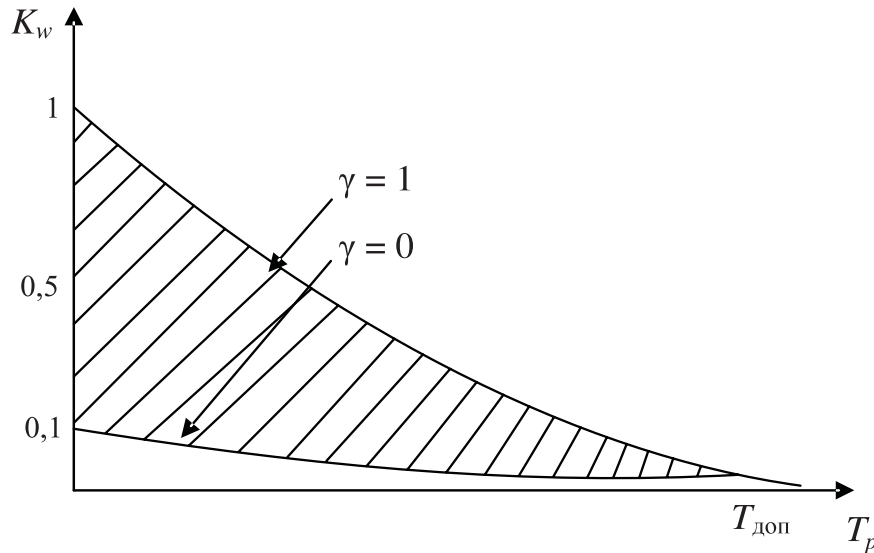


Рис. 1. График зависимости значения коэффициента оперативности от длительности цикла управления

$$1 \geq \gamma_{ij} \geq 0, \eta_{p_{ij}}^H \neq 0, \eta_{p_{ij}}^A \neq 0.$$

Полученное выражение (5) связывает основные качественные показатели ИУС государственного управления (объем передаваемой информации, производительность, коэффициент готовности, вероятность безотказной работы) со структурными особенностями КИТС и позволяет произвести количественную оценку коэффициента оперативности органов государственного управления.

Если допустить, что в некоторый момент времени степень автоматизации управленческой деятельности должностных лиц ИУС равна нулю или единице, что соответствует граничным условиям функционирования ИУС, то зависимость значения K_w от длительности цикла управления T_p (при $\xi = 0,1$) будет иметь следующий вид (рис. 1).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Повышение степени автоматизации управления способствует значительному увеличению оперативности ИУС государственного управления. Так, например, увеличение степени автоматизации ИУС с 0,5 до 0,69 повышает оперативность управления органов государственного управления в 1,38 раза.

Длительность цикла управления закономерно зависит от производительности ИУС. Действительно, с увеличением производительности ИУС длительность цикла управления уменьшается.

Так, например, с ростом относительной доли производительности ИТС ИУС с 0,13 до 0,31 цикл управления уменьшается в 1,48 раза.

Также разработан алгоритм оптимизации структуры комплекса информационно-технических средств информационно-управляющей системы, позволяющий существенно упростить решение поставленной выше задачи с помощью метода «вложенных отношений», основанного на идее последовательного уточнения модели предпочтений (принцип непротиворечивости и содержательности дополнительных допущений) [2, 3]. Применение данного метода, использующего различные математические методы и неформальные процедуры на разных этапах решения задачи, с учетом полученного выражения (5) позволило разработать алгоритм оптимизации структуры КИТС ИУС в реальном масштабе времени (рис. 2).

Данный алгоритм доведен до программной реализации, позволившей получить количественные оценки оперативности решения задач управления ИУС в реальном масштабе времени.

Полученные в работе выражение (5) и алгоритм оптимизации структуры КИТС ИУС государственного управления способствуют повышению оперативности функционирования автоматизированной системы управления в условиях применения инфокоммуникационных технологий за счет оптимизации структуры комплекса информационно-технических средств в реальном масштабе времени.

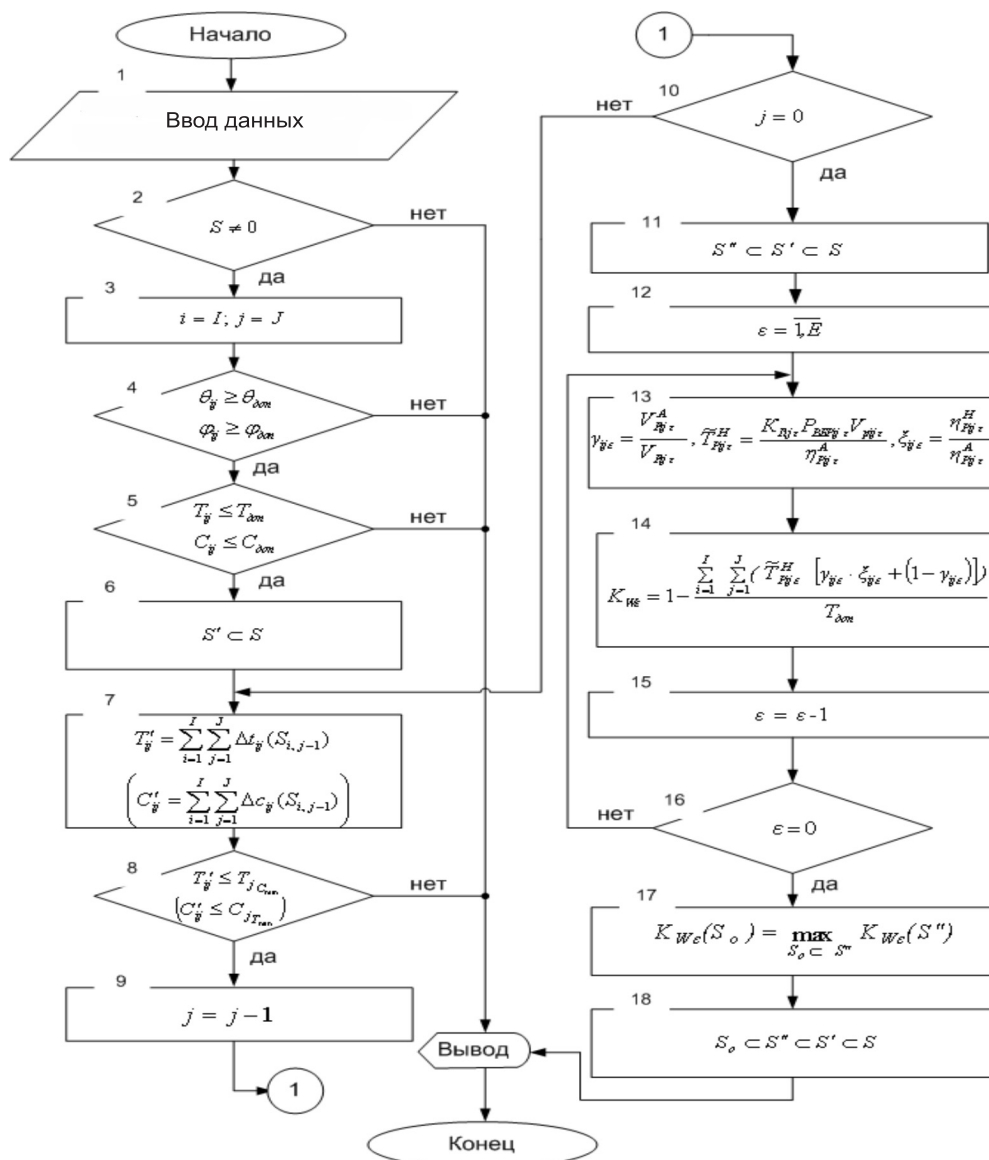


Рис. 2. Обобщенная блок-схема алгоритма оптимизации структуры комплекса информационно-технических средств автоматизированной системы управления

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радионов, В.В. Автоматизированные системы управления в условиях применения информационных технологий [Текст] / В.В. Радионов // Системы управления, навигации и связи. –2008. –№ 4. –С.152–154.
2. Малофей, О.П. Оптимизация структуры комплекса информационно-технических средств автоматизированной системы управления сетей связи специального назначения [Текст] / О.П. Малофей, В.В.

Радионов, С.А. Ряднов // Инфокоммуникационные технологии. –2007. –Т 5. –№ 3. –С.97–99.

3. Радионов, В.В. Программа «Выбор оптимальной структуры комплекса информационно-технических средств автоматизированной системы управления» [Текст] / В.В. Радионов // Св. о рег. программы для ЭВМ № 2008611776. –Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. –2008.



УДК 65.011

Б.Е. Большаков, Е.Ф. Шамаева

МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА НОВАЦИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ УСТОЙЧИВОГО ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИМЫХ ВЕЛИЧИН

В 1987 г. по рекомендации ООН большинство государств мира, в т. ч. и Россия, приняли базовый принцип устойчивого развития общества, в соответствии с которым гражданское общество и государство берут на себя ответственность обеспечить возможность удовлетворения потребностей как настоящего, так и будущих поколений.

В настоящее время Россия столкнулась с необходимостью обеспечения социально-экономической безопасности посредством перехода на устойчивый инновационный путь развития страны, опирающийся на эффективное управление с применением новых, более совершенных и приносящих больший доход проектов и технологий.

Проведенный анализ состояния проблемы показал, что международная и отечественная практика свидетельствует о низком качестве управления новациями, обнажает серьезные проблемы их мониторинга, оценки и практической реализации в целях повышения качества жизни общества [2, 5, 8].

Для решения этих проблем необходимо специальное методическое обеспечение, отвечающее требованиям устойчивого инновационного развития. В работах [3–8, 12] показано, что к их числу относятся, прежде всего, требования, дающие возможность:

- проектировать региональное устойчивое инновационное развитие с использованием новаций;
- осуществлять их мониторинг и оценку;
- определять социально-экономические последствия и интегральную эффективность новаций.

Постановка проблемы. В работах Научной школы устойчивого развития [2–5, 8, 12] показано, что основной недостаток существующих подходов – отсутствие обоснованной системы мер, дающей возможность соразмерять и соизмерять разноразличные новации с эффективностью проектируемых региональных объектов управления.

Этот недостаток порождает множество других. Анализ недостатков подробно представлен в работе [13]. Среди них:

крайняя сложность работы с разнородной информацией;

невозможность работы в условиях неопределенности, нелинейности и рисков;

невозможность оценки новаций по их вкладу в эффективность и устойчивость развития проектируемых региональных объектов управления.

Проблема заключается в том, что объект и предмет проектирования описывается в разноразличных, несопоставимых мерах.

Эффективность регионального объекта проектирования в рыночной экономике описывается, в основном, в денежных единицах (доход, рентабельность, прибыль и др.) [1, 10, 11], а эффективность предмета проектирования (новации) – в мощностных единицах (КПД, коэффициент совершенства технологий и др.) [2–5].

Возникает вопрос, каким образом совместить денежный язык описания объекта и мощностной язык описания предмета проектирования – новаций?

Теоретическая и методологическая база.

Для ответа на этот вопрос используется теория и методология проектирования устойчивого развития в системе «природа-общество-человек» с использованием измеримых величин¹. Фундаментальную основу исследования составили работы С.А. Подолинского, Н.А. Умова, Д.И. Менделеева, К.Э. Циолковского, В.И. Вернадского, Э. Бауэра, Р. Бартини, П.Г. Кузнецова, Г. Одума, Д. Робинсона, С. Шмидхейни, Б.Е. Большакова, О.Л. Кузнецова [1–5, 8, 12].

В основе теории устойчивого развития лежат фундаментальный закон сохранения мощности² (Ла Гранж, Дж. Максвелл, П.Г. Кузнецов) и его

¹ Особенность теоретической и методологической базы – не просто использование измеримых величин, а использование системы универсальных и устойчивых ЛТ-мер (ЛТ-система). Подробнее см. [8].

² В работах Научной школы устойчивого развития установлена связь закона сохранения мощности с другими известными законами социальных и экономических наук [14].

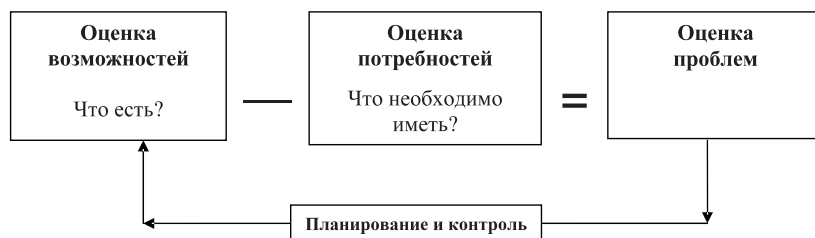


Рис. 1. Логика проектирования

проекция на общество и социально-экономические системы – принцип сохранения развития (С.А. Подолинский, В.И. Вернадский, Э. Бауэр, П.Г. Кузнецов, Б.Е. Большаков) [3, 8, 12].

Любая социально-экономическая система не может существовать без взаимодействия с окружающей ее природной средой и объединяет в себе два сопряженных процесса: активный поток воздействий на окружающую среду, определяющий возможности системы, и использование обществом потока ресурсов, полученного в результате этого воздействия, для удовлетворения материальных и духовных потребностей [3].

Между возможностями и потребностями социально-экономической системы существует взаимосвязь [8, 12]:

мерой возможности является мощность на заданное время;

мерой потребности – возросшая мощность, которой система в данное время не располагает, но которую необходимо иметь для перехода к устойчивому инновационному развитию [4, 6, 8].

Нельзя произвести ни одного продукта, товара, услуги, не затратив при этом времени и энергии или потока энергии, т. е. мощности³ [3, 4, 8].

Устойчивое инновационное развитие – это процесс роста возможностей удовлетворять неисчезающие потребности системы, выраженные в единицах мощности, за счет повышения качества управления и реализации новаций (перспективных идей, более совершенных технологий, прорывных проектов), обеспечивающие неубываю-

щий темп роста эффективности использования ресурсов и больший доход, уменьшение потерь в условиях негативных внешних и внутренних воздействий [3, 4, 8].

Определение новации. В словаре В.И. Даля «новация» рассматривается как появление нового; отмечается, что это слово появилось в русском языке в начале XVIII в. (впервые отмечено в 1704 г.). В словаре С.И. Ожегова «новация» – нечто новое или новшество – новый метод, новая система. Новация на этапе ее практической реализации в ценность (продукт, товар, услуга) носит название «инновация» (Шумпетер, 1982) [10, 11].

Однако не каждое новшество является новацией. Среди множества новшеств новацией является то, что повышает эффективность проектируемого регионального объекта. Новшество не является новацией, если его реализация не повышает эффективность проектируемого объекта в границах заданного времени.

Выделяются три формы новации [5]:

- 1) нематериализованная новация – идея, теория, метод, модель, методика, проект;
- 2) материализованная новация – техническое средство, технология;
- 3) ценности – продукт, товар, услуга (физические и духовные).

Методическое обеспечение мониторинга и оценки новаций включает:

- правила проектирования регионального устойчивого инновационного развития;
- правила мониторинга новаций;
- правила оценки новаций.

Основные правила проектирования регионального устойчивого инновационного развития включают [8, 6, 12] (рис. 1.):

- 1) правила оценки возможностей проектируемого объекта;
- 2) оценки потребностей проектируемого объекта;
- 3) оценки проблем регионального объекта;
- 4) планирования решения проблем;

³ Энергия в ед. времени есть мощность. Под потоком энергии понимается количество энергии в ед. времени. Размерность потока энергии (мощности) в ЛТ-системе $[L^5T^{-3}]$. Величина потока энергии в ед. объема в ЛТ-системе имеет размерность $[L^2T^{-3}]$ и называется *плотностью потока энергии* [3, 8, 12].



5) правила реализации и контроля исполнения плана посредством мониторинга и оценки новаций.

Правила оценки возможностей проектируемого объекта. В соответствии с теорией устойчивого развития [8, 6, 12] выделяются следующие типы возможностей:

- потенциальная;
- реальная или технологическая;
- реализованная или экономическая;
- упущенная (потери);
- интегральная.

Для оценки возможностей регионального объекта (страна, федеральный округ, область, район, муниципалитет) предложены следующие правила [8, 6].

- Правила определения потенциальной возможности N . Потенциальная возможность определяется как суммарное потребление за определенное время t (год, квартал, месяц и т. д.) всех видов продуктов питания, топлива, электроэнергии N_p , выраженных в ед. мощности (Вт, кВт, мВт, гВт и т. д.):

$$N(t) = \sum_{i=1}^{n=3} N_i(t), \quad (1)$$

где $N(t)$ – суммарное потребление ресурсов в ед. мощности; $N_1(t)$ – потребление продуктов питания в ед. мощности; $N_2(t)$ – потребление топлива в ед. мощности; $N_3(t)$ – потребление электроэнергии в ед. мощности.

- Правила определения реальной или технологической возможности P .

Реальная возможность – это совокупный произведенный продукт⁴ за время t , который определяется прямым суммированием произведений потребляемых за время t ресурсов N_p , выраженных в ед. мощности, на обобщенный коэффициент совершенства технологий η_i :

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n=3} N_i(t) \cdot \eta_i(t). \quad (2)$$

Обобщенный коэффициент совершенства технологий (КСТ), η_i – это отношение теоретического минимума затрат мощности к ее фактическому расходу на изготовление единицы j -го продукта за время t . В среднем по миру коэффициент совершенства технологий в производстве топлива

и электроэнергии (для машин и технологических процессов), а также продуктов питания (для растений и животных) на начальное время t_0 равен [3]:

для продуктов питания: $\eta_1(t_0) = 0,05$;

для топлива: $\eta_2(t_0) = 0,25$;

для электроэнергии: $\eta_3(t_0) = 0,8$.

- Правила определения реализованной или экономической возможности P .

Реализованная или экономическая возможность – это совокупный конечный (произведенный и реализованный) продукт за время t , который определяется произведением реальной (технологической) возможности в ед. мощности P на качество планирования ε :

$$\hat{P}(t) = P(t) \cdot \varepsilon(t), \quad (3)$$

где $\varepsilon(t) = \begin{cases} 1 - \text{есть потребитель;} \\ 0 - \text{нет потребителя.} \end{cases}$

Качество планирования ε – это доля произведенной продукции P за время t , обеспеченная потребителем.

Отношение реализованной возможности $\hat{P}$ к потенциальной возможности N определяет эффективность использования ресурсов ϕ :

$$\phi(t) = \hat{P}(t)/N(t). \quad (4)$$

При производстве вещественных и информационных продуктов эффективность использования ресурсов может быть определена отношением $\hat{P}/N$, где $\hat{P}$ – произведенный и реализованный за время t продукт, выраженный в принятых единицах (например, килограмм, метр, литр, байт и др.); N – фактическое потребление мощности (кВт) [4, 8].

- Правила определения упущенной возможности G . Упущенная возможность – это потери мощности, которые определяются разностью между потенциальной и реализованной возможностями:

$$G(t) = N(t) - \hat{P}(t). \quad (5)$$

- Правила определения интегральной возможности QL . Интегральная возможность – это социально-экономико-экологическая возможность регионального объекта, которая характеризует качество жизни (QL), выраженное в ед. мощности на человека (кВт/чел.), и определяется как прямое произведение основных социальных, экономических и экологических показателей:

$$QL(t) = T_A(t) \cdot U(t) \cdot q(t), \quad (6)$$

где $T_A(t) = \frac{T_{\text{ср}}(t)}{100 \text{ лет}}$ – средняя нормированная про-

⁴ Совокупный произведенный продукт P включает в себя все продукты, товары и услуги, произведенные за определенное время t , в т. ч. вещественные, энергетические и информационные [4, 8].

должительность жизни в регионе; $U(t) = \frac{\hat{P}(t)}{M(t)}$ – совокупный уровень жизни; M – численность населения; $q(t) = \frac{G(t)}{G(t-1)}$ – качество окружающей природной среды.

Для оценки возможностей проектируемого объекта в денежных ед. предусмотрена специальная методика, разработанная в Научной школе устойчивого развития, в основе которой система

$$W(t) = \frac{\hat{P}(t), \text{Вт}}{\text{ВП}(t), \text{ден.ед}} = \begin{cases} 1 - \text{полная обеспеченность валюты мощностью;} \\ > 1 - \text{запас обеспеченности валюты мощностью;} \\ < 1 - \text{необеспеченность валюты мощностью.} \end{cases} \quad (7)$$

Иллюстрация правил оценки возможностей различных региональных объектов представлена в табл. 1. Для оценки возможностей региональных объектов разного уровня управления использовалась специальная методика, позволяющая определять N , P , G в условиях неполно заданной статистической информации [5].

Правила оценки потребностей проектируемого объекта. Потребность – это возросшие возможности, которыми в данное время объект не располагает, но которые необходимы для достижения целей сохранения, роста и развития, устойчивого инновационного развития [8].

показателей: «мощность валюты», «единичная мощность валюты», «коэффициент конвертации», «реальные деньги», «номинальные деньги», «спекулятивный капитал» и др. [3].

Мощность валюты – отношение годового совокупного конечного продукта $\hat{P}$, выраженного в ед. мощности, к годовому валовому продукту ВП, выраженному в денежных ед., информация о котором содержится в официальных статистических источниках [3, 8, 12]:

Правила оценки потребностей включают: построение классификатора возможных типов целей (рис. 2.); анализ и сравнительную оценку вариантов целей;

фиксацию параметров цели (потребности).

Правила оценки проблем проектируемого объекта включают определение величины, состава проблем, последствий от их нерешения.

Величина проблемы – разность между целевым значением (т. е. потребностью) на определенное время и фактическим значением показателя (т. е. возможностью) [8].

Таблица 1

Возможности региональных объектов разного уровня управления, 2005 г.

Наименование показателя	Наименование региональных объектов			
	Россия	Северо-Западный ФО	Ленинградская область	Санкт-Петербург
Потенциальные возможности				
Годовое суммарное потребление ресурсов в ед. мощности, гВт	1061,15	105,9	12,09	39,21
Реальные возможности				
Годовой совокупный конечный продукт в ед. мощности, гВт	313,31	31,27	3,57	11,58
Годовой совокупный конечный продукт в денежных ед, обеспеченных реальной мощностью, млрд руб. ⁵	2 702,3	281,43	32,13	104,22
Упущенные возможности				
Годовые потери мощности, гВт	747,84	74,63	8,52	27,63
Интегральные возможности				
Качество жизни в ед. мощности, кВт/чел.	1,41	1,55	1,46	1,7
Качество жизни в денежных ед., обеспеченных реальной мощностью, руб./чел.	12 690	13 950	13 140	15 300

⁵ Для определения стоимости 1 Вт используется специальная методика, разработанная в Научной школе устойчивого развития [3].

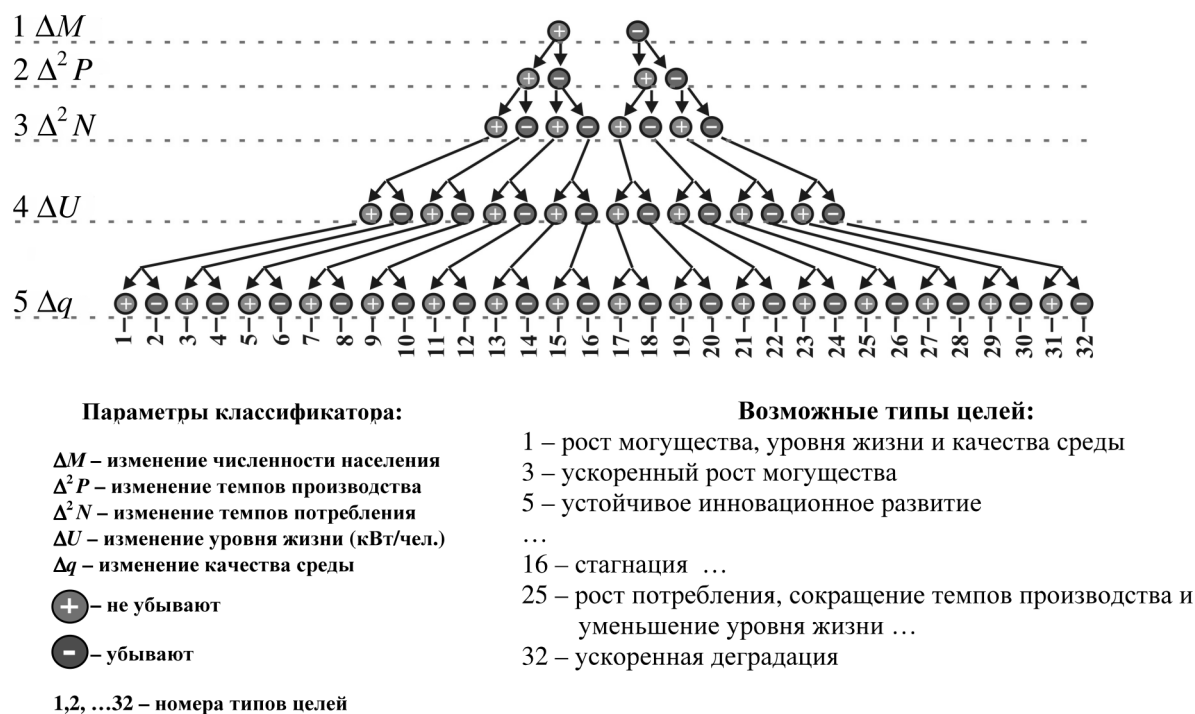


Рис. 2. Классификатор возможных типов целей (потребностей)

Состав проблем включает:

- сохранение и увеличение темпов роста производства P ;
- уменьшение потерь мощности G ;
- повышение эффективности использования энергоресурсов φ ;
- повышение качества окружающей природной среды q ;
- повышение уровня U и качества жизни QL .

Последствия от нерешения – это значения показателя при условии сохранения текущей динамики. В качестве примера на рис. 3 приводится оценка проблем для Ленинградской области.

Правила планирования решения проблем. Сформировать план решения проблем – значит разработать сеть работ (мероприятий), необходи-

мых и достаточных для достижения поставленной цели (удовлетворения потребностей). План – это сеть, в которой не должно быть лишних (нет потребителя) и забытых (нет источника) работ, результат которых – возросшие возможности. Реквизитами работ плана являются:

- кто – лица, выполняющие работу;
- что – содержание работы;
- где – место выполнения работы;
- когда – время начала и окончания работы;
- как – используемая технология;
- сколько – требуется времени и мощности на выполнение работы;
- зачем – какой прирост возможностей будет получен в результате выполнения работы.

Реквизиты плана могут быть представлены

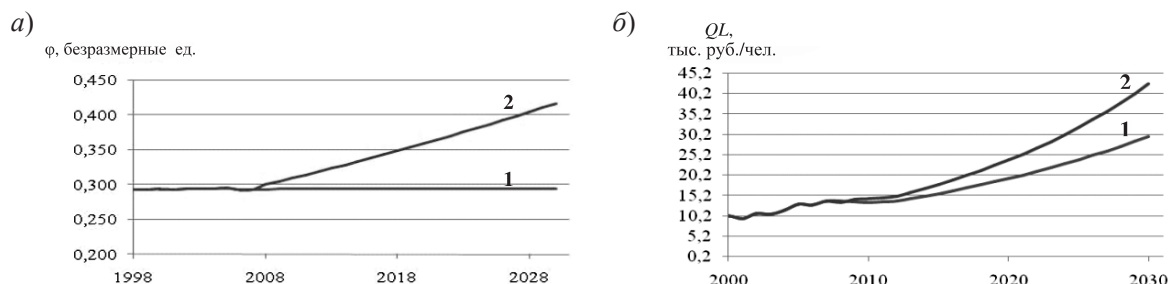


Рис. 3. Оценка проблем на примере Ленинградской области:
 а – проблема эффективности φ ; б – проблема качества жизни QL
 1 – сохранение текущей динамики; 2 – устойчивый рост эффективности

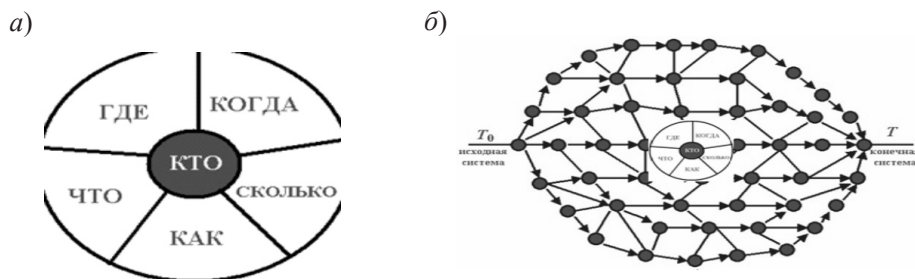


Рис. 4. Реквизиты плана:
а – портрет работы; б – план как сеть работ

в форме портрета работы, имеющего форму сети (рис. 4).

Для реализации плана решения проблем необходимо осуществлять мониторинг и оценку новых идей, проектов, технологий (новаций), уменьшающих величину проблем, т. е. разность между потребностями и возможностями проектируемого регионального объекта.

Правила мониторинга новаций включают:

сбор информации о новациях;

многоуровневую фильтрацию информации о новациях;

формирование банка семантико-параметрических портретов новаций.

Правила сбора информации о новациях.

Методика сбора информации о новациях предполагает поиск ответов на вопросы, формирующих семантический образ новаций:

1. Зачем? Цель вносимых новацией изменений.
2. Почему? Какие негативные тенденции явились причиной новации? Какие проблемы решает?
3. Кто? Автор(ы) новации.
4. Что? Что изменяет новация и в каком направлении?
5. Где? Производственные процессы, в которые вносит изменения. Где применяется новация?
6. Когда? На какой стадии находится новация? Сколько времени требуется для внедрения новации?
7. Как? За счет чего происходят изменения?
8. Сколько? Сколько и какие ресурсы необходимы для производства единицы продукции с использованием новации?

Результатом сбора информации о новациях, где входом служат разнообразные источники, в т. ч. Интернет-среда, является максимально заполненный семантический образ новации.

Правила многоуровневой фильтрации.

Информация о новациях представляет собой словесное описание (семантический образ). Для обработки такой нечеткой информации существуют разные подходы. Как правило, они связаны с методами нечеткой логики, цель которых заключается в том, чтобы определить количественное значение выходных переменных. Как показано в работах [3, 5, 6, 9], при таком подходе обычно не обеспечивается физическая соразмерность и соизмеримость, что может приводить к искажению смысла полученных результатов. По этой причине для работы с нечеткой информацией наиболее эффективно использовать методику многоуровневой семантико-параметрической фильтрации на основе алгебры n -матриц тензорного анализа Г. Крона с установлением качественно-количественной определенности (наименование величины, LT -размерности, единиц измерения, численного значения) по определенным правилам, обеспечивающих физическую соразмерность и соизмеримость параметров новаций и региональных объектов (табл. 2).

Банк семантико-параметрических портретов новаций. Точное качественно-количественное описание новаций осуществляется на языке алгебры n -матриц тензорного анализа Г. Крона. Матрица $(I_{\alpha\beta\delta})$, характеризующая новацию, состоит из n строк ($\alpha = 1, \dots, n$ – производственные процессы), m столбцов ($\beta = 1, \dots, m$ – расход энергии на производство единицы продукции с учетом существующих технологических возможностей), k слоев ($\delta = 1, \dots, k$ – расход энергии на производство единицы продукции с учетом технологических возможностей новации).

Таблица 2

Параметризация семантического образа новаций

Основные параметры семантического образа Параметры новаций и региональных объектов	Суммарное потребление ресурсов (расход энергии) на производство единицы j -й продукции с учетом существующих технологических возможностей b_{ji}	Суммарное потребление ресурсов на производство единицы j -й продукции с учетом технологических возможностей новации g_{ji}
Что: выбор производственного процесса	Изменяется ли суммарное потребление ресурсов на производство единицы продукции?	Изменяется ли суммарное потребление ресурсов на производство единицы продукции?
Когда: время на производство единицы j -й продукции	Изменяется ли время на производство единицы продукции?	Изменяется ли время на производство единицы продукции?
Как: характеристика единицы j -й продукции	Изменяются ли характеристики продукции?	Изменяются ли характеристики продукции?
Сколько: качественно-количественные определенности	Установление качественно-количественной определенности: наименование величин размерности единиц измерения численного значения	Установление качественно-количественной определенности: наименование величин размерности единиц измерения численного значения

Совокупность качественно-количественных и семантических описаний новаций представляет собой банк семантико-параметрических портретов новаций, в котором можно осуществлять поиск новаций по заданным характеристикам (в т. ч. нечетким).

Правилами оценки новаций предусмотрена:

- оценка стоимости новации;
- оценка вклада новации в рост эффективности использования ресурсов;
- оценка социально-экономических последствий и интегральной эффективности.

Правила оценки стоимости новации. Стоимость новации состоит из двух частей:

1) расходы на производство новации на всех стадиях ее существования – расходы на разработку идеи, НИР, НИОКР, опытное производство, серия;

2) расходы на реализацию новации (инновации) в производстве изделия (продукта, товара, услуги) в соответствии с планом потребления, производства и сбыта [7].

Суммарные расходы на производство и реализацию определяют себестоимость новации – $S(t)$.

Стоимость новации может быть выражена в денежных и мощностных ед. [3].

Стоимость новации в ед. мощности определяется как потребительная стоимость новации – $S_N(t)$.

Стоимость новации, выраженная в денежных ед., определяется в условиях рыночной экономики как меновая стоимость – $S_M(t)$.

Рентабельность новации – это отношение дополнительно полученного совокупного конечного продукта, по результатам внедрения новации, к себестоимости новации:

$$Rn(t) = \frac{\Delta \hat{P}(t)}{S(t)}, \quad (8)$$

где $Rn(t)$ – рентабельность новации; $\Delta \hat{P}(t)$ – последствия от реализации новации в терминах совокупного конечного продукта, выраженного в денежных ед. и мощности; $S(t)$ – себестоимость новации ();

Рентабельность новации на стадии реализации (инновация) – это рентабельность новации без учета расходов на производство новации.

Правилами оценки вклада новаций в рост эффективности использования ресурсов предусмотре-

трено определение эффективности использования ресурсов до и после внедрения новации. Для этого рассчитываются два параметра:

коэффициент технологической эффективности новации;

коэффициент роста эффективности использования ресурсов.

Коэффициент технологической эффективности новации (κ) определяется:

$$\kappa_i(t) = \frac{b_{ji}(t)}{g_{ji}(t)}, \quad (9)$$

где $b_{ji}(t)$ – расход энергии на производство единицы j -й продукции в ед. времени в i -м производственном процессе с учетом существующих технологических возможностей; $g_{ji}(t)$ – расход энергии на производство единицы j -й продукции в ед. времени в i -м производственном процессе с учетом технологических возможностей новации.

Рост эффективности использования ресурсов определяется:

$$\varphi_1(t_0 + t_1) = \varphi_0(t_0) + \frac{1}{n} \cdot \sum \eta_{i0}(t_0) \cdot (\kappa_i(t_0) - 1) \cdot \frac{l_i(t_0 + t_1)}{m_i(t_0 + t_1)}, \quad (10)$$

где $\varphi_1(t_0 + t_1)$ – эффективность использования ресурсов (технологические возможности системы) на время $(t_0 + t_1)$; $\varphi_0(t_0)$ – технологические возможности на начальное время t_0 ; i – производственные процессы в управляемой системе, $i = 1, 2, \dots, n$; $\eta_{i0}(t_0)$ – обобщенный коэффициент совершенства технологий (КСТ) в i -м производственном процессе на начальное время t_0 ; $\kappa_i(t_0)$ – коэффициент технологической эффективности новации в i -м производственном процессе на вре-

мя t_0 ; l_i – количество производственных объектов (предприятий) в i -м производственном процессе, на которых реализуется новация; m_i – общее количество производственных объектов в i -м производственном процессе; t_0 – начальное время (год, месяц); t_1 – время, необходимое для внедрения новации в i -й производственный процесс на l_i -производственных объектах.

Таким образом, коэффициент совершенства технологий (КСТ) в i -м производственном процессе (η_i) с учетом технологических возможностей новации равен произведению коэффициента технологической эффективности на фактическое значение КСТ.

Например, коэффициент технологической эффективности комбинированной силовой установки дизельного двигателя [8] по авторским расчетам равен двум ($\kappa \approx 2$), при этом КСТ дизельного двигателя до модернизации равен $\eta_i(t_0) = 0,3$; тогда КСТ дизельного двигателя с учетом технологических возможностей новации составит $\eta_i(t_0 + t_1) = 0,3 \cdot 2 = 0,6$.

Правила оценки социально-экономических последствий и интегральной эффективности. Социально-экономические последствия – это возможные изменения качества жизни в регионе как разность между одноименными параметрами качества жизни, наблюдаемые до и после реализации новации.

В качестве примера в табл. 3 представлены результаты оценки последствий от реализации рассмотренной новации в Ленинградской области, рассчитанные в следующих граничных условиях:

1) принято, что количество производственных процессов равно двадцати четырем. Среди

Таблица 3

Пример оценки последствий от реализации новаций, 2005 г.

Наименование показателя	До внедрения новации	После внедрения новации	Последствия (эффект)
Годовое суммарное потребление ресурсов в ед. мощности, гВт	12,09	12,09	-
Эффективность использования ресурсов, безразмерные ед.	0,3	0,312	+0,012
Годовой совокупный конечный продукт в ед. мощности, гВт	3,57	3,77	+0,2
Годовой совокупный конечный продукт в денежных ед., млрд руб.	32,13	33,93	+1,8
Качество жизни в ед. мощности, кВт/чел.	1,46	1,57	+0,11
Качество жизни в денежных ед., руб./чел.	13 140	14 130	+ 990



производственных процессов есть технологический процесс, в основном связанный с работой дизельного двигателя;

2) каждому производственному процессу соответствует один производственный объект;

3) начальные значения КСТ производственных процессов равны начальному значению – 0,3;

4) экстренная модернизация (время на реализацию меньше года).

Оценка последствий осуществляется в зависимости от качества планирования (наличие или отсутствие потребителя) и потребностей объекта по трем вариантам: сохранение, уменьшение или увеличение суммарного потребления ресурсов в ед. мощности. В рассмотренном примере приведена оценка последствий в соответствии с первым вариантом: сохранение суммарного потребления ресурсов при наличии потребителя на произведенный продукт.

Интегральная эффективность Ξ определяется отношением:

$$\Xi(t_0) = \frac{QL_1(t_0 + t_1)}{QL_2(t_0)}, \quad (11)$$

где QL_1 – качество жизни с учетом внедрения новации; QL_2 – качество жизни до внедрения новации.

В рассмотренном примере интегральная эффективность: $\Xi(2005) = 1,57$ (кВт/чел.) / 1,46 (кВт/чел.) = 1,08 (рост 8 % в год).

При этом рентабельность новации (себестоимость 1,4 млрд руб. при условии равенства расходов на производство и реализацию новации) составит:

рентабельность новации – 1,3;

рентабельность новации на стадии реализации без учета расходов на производство новации – 2,57.

На основе предложенного методического обеспечения разработаны рекомендации по интеллектуальной поддержке мониторинга и оценки новаций в проектном управлении устойчивым инновационным развитием с целью решения ряда задач:

подготовки кадров в области устойчивого инновационного развития [2] и создания обучающей (учебной) модели для самообразования;

формирования нормативной базы управления региональным устойчивым инновационным развитием;

мониторинга и контроля сбалансированности финансово-энергетических потоков регионально-го объекта управления;

создания базы региональной статистической информации в области устойчивого инновационного развития;

создания регионального банка новаций с оценкой их стоимости и эффективности;

создания информационно-аналитической системы управления новациями в среде региональных объектов;

защиты инвестиций от рисков реализации новаций и неэффективного планирования инновационного развития;

ведения региональной отчетности в области устойчивого развития на предприятии;

оплаты результатов труда с учетом внедрения новаций.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №11-06-06128-г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байзаков, С.Б. Вопросы и ответы: может ли энергия стать мерой валют [Текст] / С.Б. Байзаков // Экономика. Финансы. Исследования (ЭФИ). – Астана, 2010. – № 2(18).
2. Васильев, Ю.С. О подготовке кадров в системе высшего профессионального образования для устойчивого инновационного развития России [Электронный ресурс] / Ю.С. Васильев, К.А. Дубаренко, В.В. Ермаков // Междунар. электронный журнал. Устойчивое развитие: наука и практика. – 2010. – № 2 (5).
3. Большаков, Б.Е. Мощность как мера в экономике [Электронный ресурс] / Б.Е. Большаков // Междунар. электронный журнал. Устойчивое развитие: наука и практика. – 2010. – № 2 (5).
4. Большаков, Б.Е. Проблема измерения процесса труда: анализ критики Ф. Энгельсом взглядов С.А. По-

долинского [Текст] / Б.Е. Большаков // Вестник РАЕН: тематический номер (экономические науки). – М.: РАЕН, 2010. – Т. 10. – № 2.

5. Большаков, Б.Е. Управление новациями в интересах устойчивого инновационного развития [Текст] / Б.Е. Большаков, Е.Ф. Шамаева // Вестник РАЕН. – М.: РАЕН, 2011.

6. Большаков, Б.Е. Глобальная модель управления устойчивым развитием общества [Текст] / Б.Е. Большаков, Е.Ф. Шамаева // Матер. Междунар. науч. конгресса Глобалистика-2009: пути выхода из глобального кризиса и модели нового мироустройства. – М.: МАКС пресс, 2009. – Т. 1.

7. Денисова, А.А. Анализ влияния рыночного механизма на повышение конкурентоспособности продукции [Текст] / А.А. Денисова, И.Н. Филатов //

Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 1.

8. **Кузнецов, О.Л.** Устойчивое развитие: научные основы проектирования в системе «природа–общество–человек» [Текст] / О.Л. Кузнецов, Б.Е. Большаков. –СПб.: Гуманистика, 2002.

9. **Петров, А.Е.** Тензорный метод двойственных сетей [Текст] / А.Е. Петров. –М.: ЦИТвП, 2007.

10. **Мильтнер, Б.З.** Управление знаниями [Текст] / Б.З. Мильтнер. –М.: ИНФРА-М, 2003.

11. **Махлуп, Ф.** Производство и распространение знаний в США [Текст] / Ф. Махлуп; Пер. с англ. И.И. Дюмулен, У.И. Козлов, М.З. Штернгарц. –М.:

Прогресс, 1966.

12. **Kuznetsov, O.L.** Sustainable development: natural and scientific principles: Textbook [Текст] / O.L. Kuznetsov, B.E. Bolshakov. –SPb: Publishing house «Gumanistika», 2002.

13. **Большаков Б.Е.** Системный анализ методов управления знаниями в области устойчивого развития [Электронный ресурс] / Б.Е. Большаков, Е.Ф. Шамаева // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. –2009. –Т. 4.

14. **Большаков, Б.Е.** Наука устойчивого развития: Кн. I. Мера [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://lt-nur@uni-dubna.ru>



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АНТЫШЕВ Евгений Павлович – аспирант кафедры информатики Московского физико-технического института.

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. E-mail: eantyshev@gmail.com

АХАТОВА Чулпан Фаилевна – ассистент, аспирант кафедры систем информационной безопасности Казанского государственного технического университета имени А.Н. Туполева.

42011, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10. Тел. 8(843) 231-00-56, e-mail: akhatova_chulpan@mail.ru

БАЛАШОВ Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: balashov_ev@mail.ru

БОЛЬШАКОВ Борис Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой устойчивого инновационного развития Международного университета природы, общества и человека «Дубна», вице-президент Международной академии экологической безопасности и природопользования, соруководитель Научной школы устойчивого развития.

141982, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19. Тел. 8(49621) 907-76, e-mail: bb@uni-dubna.ru

БУРЛОВ Вячеслав Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры национальной безопасности факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ВАСИЛЮК Игорь Петрович – кандидат филологических наук, начальник управления Российского университета дружбы народов.

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

ВЕРЗИЛИН Дмитрий Николаевич – доктор экономических наук, профессор кафедры менеджмента Санкт-Петербургского торгово-экономического института.

194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50.

ГАЛИУЛЛИН Ленар Айратович – аспирант, ассистент кафедры прикладной информатики и управления Камской государственной инженерно-экономической академии.

423810, г. Набережные Челны, пр. Мира, д. 68/19. Тел. 8(8552) 32-18-49, e-mail: galilenar@yandex.ru

ГАППОЕВ Расул Солтанович – студент Ставропольского государственного университета.

355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1.

ГИЛЬМАНОВА Надежда Александровна – аспирант кафедры математики Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. 8(347) 223-77-53, e-mail: hopediesthelast@yahoo.com

ЕЛИСЕЕВ Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры компьютерных технологий в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

ЗУБКОВ Евгений Витальевич – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и управления Камской государственной инженерно-экономической академии.

423810, г. Набережные Челны, пр. Мира, д. 68/19. Тел. 8(8552) 32-18-49.

КАНУННИКОВА Елена Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры математического и программного обеспечения информационных систем Белгородского государственного университета – национального исследовательского университета.

308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85. E-mail: postgr@list.ru

КОРОТКОВ Александр Станиславович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: korotkov@trphf.spbstu.ru

КУДРЯШОВ Эдуард Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. 8 (812) 297-60-01, e-mail: ekudr@rambler.ru

КУЗИН Алексей Константинович – ассистент кафедры компьютерных технологий в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: kuzin_aleksei@mail.ru

КУРИКОВ Николай Николаевич – аспирант кафедры компьютерных технологий в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: kurikov_n@rambler.ru

ЛЕВИН Евгений Калманович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и радиосистем Владимирского государственного университета.

600000, г. Владимир, пр. Строителей, д. 3/7. E-mail: eklevi@gmail.com

ЛЕПЕШКИН Олег Михайлович – кандидат технических наук, доцент Ставропольского государственного университета, докторант Военной академии связи.

355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1. E-mail: lom@stavsu.ru

МАГУЛЯН Григорий Григорьевич – кандидат технических наук, докторант кафедры национальной безопасности факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: grigoriy_m@list.ru

МАТВЕЕВ Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры национальной безопасности факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: fcvega_10@mail.ru

МЕЛЕЩЕНКО Николай Геннадьевич – кандидат технических наук, ведущий конструктор ОАО «ЗВЕЗДА».

МОРОЗОВ Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: dvmorozov@inbox.ru

МОРОЗОВА Елена Васильевна – преподаватель кафедры высшей математики Камышинского технологического института, филиала ВолгГТУ.

403874, Волгоградская обл., г. Камышин, ул. Ленина, д. 6а. Тел. 8(844-57) 2-52-22, e-mail: konvvert@yandex.ru

МОЧАЛОВ Дмитрий Игоревич – главный специалист ООО «Набережночелнинский автоцентр КамАЗ».

423812, Республика Татарстан, г. Набережные Челны, Орловское кольцо, а/я-352

НЕЕЛОВА Наталия Валериевна – аспирант кафедры ЭВМ Тульского государственного университета.

300600, г. Тула, пр. Ленина, д. 92. Тел. 8(4872) 33-24-45, e-mail: neelova.natalia@gmail.com

НИЗАМУТДИНОВА Роксана Ильдаровна – младший научный сотрудник кафедры технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. 8(347) 273-78-35, e-mail: oxy_gen@mail.ru

ПИЛИПКО Михаил Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: m_m_pilipko@rambler.ru

ПОРШНЕВ Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики и информационных технологий Института радиотехники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. Тел. 8(343) 375-97-79, e-mail: sergey_porshnev@mail.ru



ПОТАПЕНКО Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и автоматики Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова.

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. Тел. 8(4722)55-63-03, e-mail: potapenko@intbel.ru

ПОТАПЕНКО Татьяна Анатольевна – аспирант Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова.

308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46. E-mail: ttwiggy@rambler.ru

ПЯТАК Иван Михайлович – студент кафедры прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: i.m.piatak@gmail.com

РАГУЗИН Петр Сергеевич – инженер ЗАО «Электрон».

600910, Владимирская обл., г. Радужный, квартал 17, д. 150. E-mail: pit-helldrumer@mail.ru

РИХТЕР Маргарита Робертовна – аспирант кафедры вычислительной математики и кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. E-mail: MargoRihter2009@mail.ru

РУМЯНЦЕВ Иван Александрович – студент кафедры прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

194356, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: i.a.rumyancev@gmail.com

САФИУЛЛИН Николай Тахирович – аспирант кафедры автоматики и информационных технологий Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. Тел. 8(343) 375-97-79, e-mail: safiullin.nikolai@ya.ru

СУШНИКОВ Виктор Александрович – аспирант кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. 8(812) 297-60-01, e-mail: sushnikov_v@mail.ru

ТАТАРНИКОВА Марина Юрьевна – старший научный сотрудник ООО «Центр речевых технологий».

196084, Санкт-Петербург, ул. Красуцкого, д. 4. E-mail: tatmar@speechpro.com

ТИМЕНКОВ Юрий Владимирович – аспирант кафедры информатики Московского физико-технического института.

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. E-mail: yuri@timenkov.ru

ТИМЕНКОВА Дарья Валериевна – аспирант кафедры информатики Московского физико-технического института.

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. E-mail: daria@timenkov.ru

ТИМЕРЯЕВ Тимофей Валерьевич – инженер кафедры компьютерной математики Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12 к. 1. E-mail: timeryaev@yandex.ru

УРАКОВ Айрат Ренатович – доцент кафедры компьютерной математики Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12 к. 1. E-mail: urakov@ufanet.ru

ФЕДОРОВА Наталья Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации проектирования информационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета.

450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. 8(347)273-78-35, e-mail: nf_2002@mail.ru

ФОМИНЫХ Юрий Геннадьевич – начальник отдела Российского университета дружбы народов.

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. E-mail: opp-rudn@mail.ru

ЧЕРЕШНЕВА Елена Валерьевна – аспирант кафедры статистики Санкт-Петербургского торгового-экономического института.

194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50. Тел. 8(812) 297-82-01

ШАБРОВ Николай Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий в машиностроении Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: shabrov@rwwws.ru

ШАМАЕВА Екатерина Федоровна – аспирант кафедры устойчивого инновационного развития, член Научной школы устойчивого развития.

141982, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, д. 19. Тел. 8(49621) 907-76, e-mail: shamef-kate@yandex.ru

ШАНЫГИН Сергей Иванович – кандидат экономических наук, доцент кафедры статистики Санкт-Петербургского торгово-экономического института.

194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50. Тел. 8(812) 297-82-01, e-mail: s_shanygin@rambler.ru

ШАРАПОВА Ольга Юрьевна – аспирант кафедры управления и системного анализа в теплоэнергетике Самарского государственного технического университета.

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244. Тел. 8(846) 332-42-34, e-mail: o_sharapova@mail.ru

ЩЕСНЯК Евгений Леонидович – доктор экономических наук, первый проректор Российского университета дружбы народов.

117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Левин Е.К., Рагузин П.С., Татарникова М.Ю. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ЛОЖНОГО СРАБАТЫВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД.

При разработке систем автоматического распознавания голосовых команд в речи возникает необходимость оценки качества этого распознавания. Наиболее распространенная оценка – число ложных срабатываний, – значительно зависит от степени созвучности искомым словам, присутствующим в речевом материале. Предложен подход, позволяющий учитывать эту зависимость.

ГОЛОСОВЫЕ КОМАНДЫ. ВЕРОЯТНОСТЬ ЛОЖНОЙ ТРЕВОГИ. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ СЛИТНОЙ РЕЧИ.

Неелова Н.В. МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО КОНТЕНТА СРЕДИ МНОЖЕСТВА WEB-ДОКУМЕНТОВ.

Рассмотрена проблема выявления авторской копии среди кластера web-документов. Предложен метод определения оригинального web-документа на основе расчета авторства, полноты тематики всего web-ресурса, учета принципа цитируемости и других дополнительных оценок ценности web-ресурса. Получена общая формула с рассчитанными коэффициентами, позволяющая определить оригинал в кластере дублей.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АВТОРСТВА. ПРИНЦИП ЦИТИРУЕМОСТИ. WEB-ДОКУМЕНТ. СЖАТИЕ ТЕКСТОВ. ПОЛНОТА ТЕМАТИКИ. IDF. ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД НЬЮТОНА.

Сафиуллин Н.Т., Поршнева С.В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТА МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ЧЕРЕЗ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГИЛЬБЕРТА И ПРЯМУЮ КВАДРАТУРУ.

Рассмотрены результаты сравнительного анализа двух методов расчета мгновенной частоты на модельных частотно-модулированных сигналах.

МГНОВЕННАЯ ЧАСТОТА. АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГИЛЬБЕРТА. ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫЕ СИГНАЛЫ. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЯДЫ. ПРЯМАЯ КВАДРАТУРА.

Балашов Е.В., Коротков А.С., Румянцев И.А. МЕТОДЫ ЛИНЕАРИЗАЦИИ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАТЧИКОВ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ – КРАТКИЙ ОБЗОР.

Представлены основные параметры современных ключевых микроэлектронных усилителей мощности, рассмотрены классификация и принципы построения систем линеаризации усилителей, в т. ч. систем предварительной коррекции, описаны основные методы предварительной коррекции.

МЕТОДЫ ЛИНЕАРИЗАЦИИ. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ. УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ.

Шарапова О.Ю. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МНОГОМЕРНЫМИ МОДЕЛЯМИ ПРОЦЕССА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА.

Сформулированы и решены задачи оптимизации процессов индукционного нагрева по различным критериям качества с применением сложных численных моделей взаимосвязанных нелинейных процессов в электромагнитных и тепловых полях. Приведен сравнительный анализ решения задачи оптимального управления индукционной нагревательной установкой по критериям быстродействия и расхода энергии.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ. КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА.

Гильманова Н.А. МЕТОД ТРЕХФАЗОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТОВ СЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ РАЗМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ.

Рассмотрена сложная задача комбинаторной оптимизации – задача построения маршрутов следования транспортных средств с трехмерным размещением грузов внутри грузового отсека. Представлен новый эвристический алгоритм ее решения – метод трехфазной декомпозиции.

ОПТИМИЗАЦИЯ. ЛОГИСТИКА. МАРШРУТИЗАЦИЯ. ЗАГРУЗКА. УПАКОВКА. МЕТАЭВРИСТИКА.

Низамутдинова Р.И., Федорова Н.И. ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРОЦЕССАМИ.

Рассмотрены проблемы управления взаимодействующими процессами. Изложены основные проблемы, возникающие перед управляющими, во взаимодействующих процессах на предприятии. Предложена поддержка принятия решений при управлении взаимодействующими процессами.

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ. УПРАВЛЕНИЕ. ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. АНАЛИЗ. ОПЫТ ЭКСПЕРТОВ.

Пятак И.М., Морозов Д.В., Пилипко М.М. СХЕМНОЕ РЕШЕНИЕ БЛОКА КОМПАРАТОРОВ ДВУХРАЗЯДНОЙ ЯЧЕЙКИ КОНВЕЙЕРНОГО АЦП.

Рассмотрено схемотехническое решение на основе КМОП инверторов для снижения потребляемой мощности двухразрядной ячейки конвейерного аналого-цифрового преобразователя. Предложен способ уменьшения зависимости схемы от изменения температуры и разброса параметров транзисторов при изготовлении.

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ. КМОП ИНВЕРТОР. ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ.

Потапенко А.Н., Канунникова Е.А., Потапенко Т.А. МЕТОД ИНВЕРСИИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ТИПА «ПЛОСКОСТЬ-ПРОВОДНИК».

На основе модифицированного метода инверсии исследован стержневой молниеприемник системы молниезащиты с учетом поверхности облака и его края. Представлены результаты расчетов и их сравнительный анализ.

ВНЕШНЯЯ КРАЕВАЯ ЗАДАЧА. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ИНВЕРСИИ. СТЕРЖНЕВОЙ МОЛНИЕПРИЕМНИК. СИСТЕМА МОЛНИЕЗАЩИТЫ.

Тименков Ю.В., Тименкова Д.В., Антышев Е.П. МОДЕЛЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ДЛЯ ВЗАИМОЗАВИСИМЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ИСТОРИИ ОБРАЩЕНИЙ.

Предложен метод моделирования связанных процессов, между которыми есть конкуренция за системные ресурсы. Приведена классификация возможных способов взаимодействия и варианты их математического описания.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА. ФИЗИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ. ПЛАНИРОВЩИК.

Елисеев В.В., Кузин А.К. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЛИНЕЙНО-УПРУГОГО ТЕЛА В ОКРЕСТНОСТИ УГЛОВОГО ВЫРЕЗА.

Построено асимптотическое решение задачи теории упругости вблизи углового выреза. Разработан алгоритм расчета коэффициентов интенсивности напряжений, основанный на теореме взаимности и методе конечных элементов. Предложен силовой критерий прочности при механических и тепловых воздействиях.

ЛИНЕЙНАЯ ТЕРМОУПРУГОСТЬ. АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ. КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ. СИЛОВОЙ КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ. ТЕОРЕМА ВЗАИМНОСТИ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Бурлов В.Г., Магулян Г.Г., Матвеев А.В. ОБЩИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ.

Предложен подход к синтезу системы обеспечения безопасности и способов ее функционирования при заданном целевом предназначении. Предложена математическая формализация синтеза системы. Разработан алгоритм синтеза системы обеспечения безопасности.

СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

Галиуллин Л.А., Зубков Е.В., Мочалов Д.И. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.

Рассмотрено построение математической модели дизельного двигателя для автоматического получения векторов управления его режимами работы в процессе испытаний. Для более наглядного представления эта модель представлена в виде графа. Оценена адекватность модели управления дизельным двигателем на основе сравнения смоделированной и экспериментальной характеристик.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ГРАФ. ДИЗЕЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЯ

Куриков Н.Н., Шабров Н.Н., Мелешенко Н.Г. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЙ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ В ПРОУШИНАХ ПРИЦЕПНОГО ШАТУНА ЗВЕЗДООБРАЗНОГО ДВИГАТЕЛЯ.

Рассмотрена задача о взаимодействии деталей шатунно-поршневой группы звездообразного двигателя. Изучен вопрос эффективности применения многопроцессорной вычислительной системы.

ЗВЕЗДООБРАЗНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ.

Морозова Е.В. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА.

Приведены математические модели функционирования оборудования стеклотарного производства. В результате синтеза моделей подсистем получена целостная имитационная модель процесса производства стеклотары, которая может быть использована при решении задач управления производством.

УПРАВЛЕНИЕ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. СТЕКЛОТАРНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.

Ураков А.Р., Тимеряев Т.В. РАЗБИЕНИЕ ГРАФА С МИНИМИЗАЦИЕЙ СРЕДНИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ПОДГРАФАХ.

Рассмотрена задача разбиения взвешенного графа на данное число подграфов с минимизацией величины средних перемещений в подграфе. Для решения задачи предложен многоуровневый алгоритм.

РАЗБИЕНИЕ ГРАФА. АППРОКСИМАЦИЯ ГРАФА. МНОГОУРОВНЕВЫЙ АЛГОРИТМ. МАССОВОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Ахатова Ч.Ф. МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ И ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ.

Описана нейронечеткая модель интеллектуального анализа данных и получения правил принятия решений. Предложен алгоритм ее обучения. Приведены результаты сравнения эффективности данного алгоритма с другими решениями. Показана эффективность использования предлагаемых подходов для формирования баз знаний экспертных систем в различных сферах человеческой деятельности.

МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ. НЕЧЕТКАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ. БАЗА ЗНАНИЙ. ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.

Кудряшов Э.А., Сушников В.А. МЕТОД СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ НЕЦЕНТРАЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ В ОДНОТОЧЕЧНОМ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ С ЕМКОСТНЫМ ДАТЧИКОМ СИЛЫ.

Исследованы дополнительные погрешности одноточечных весоизмерительных устройств с емкостным датчиком. Разработаны рекомендации по снижению этих погрешностей до уровня, обеспечивающего их конкурентоспособность с тензорезисторными датчиками силы.

ЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК, НЕЦЕНТРАЛЬНОЕ НАГРУЖЕНИЕ, ПОГРЕШНОСТЬ, ДВОЙНАЯ КОНСОЛЬНАЯ БАЛКА.

Рихтер М.Р. АЛГОРИТМ ТРАССИРОВКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СБИС.

Рассмотрена задача трассировки при проектировании сверхбольших интегральных схем (СБИС). Для ее решения применен алгоритм проверки планарности графа на базе процедур генетического алгоритма. Выявлены все конструкторско-технологические ограничения при выполнении трассировки. Разработан декодер, осуществляющий размещение модулей на кристалле с учетом технологических ограничений для выполнения последующего соединения модулей (трассировки).

ПЛАНИРОВАНИЕ. ГЛОБАЛЬНАЯ ТРАССИРОВКА. ДЕТАЛЬНАЯ ТРАССИРОВКА. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА. ПЛАНАРНЫЙ ГРАФ. ДЕКОДЕР.

Щесняк Е.Л., Василюк И.П., Фоминых Ю.Г. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.

Рассмотрена многоуровневая система комплексной безопасности образовательного учреждения. Отражены основные организационно-технические мероприятия по созданию и развитию этой системы.

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ. ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ. СОЗДАНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БЕЗОПАСНОСТИ.

Верзилин Д.Н., Шаныгин С.И. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ.

Рассмотрены проблемы формализованного моделирования социальных систем в рамках исследования устойчивости целевых процессов в таких системах. Изложены концептуальные основы и этапы исследования.

СОЦИАЛЬНАЯ СИСТЕМА. МОДЕЛИРОВАНИЕ. УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССОВ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Лепешкин О.М., Гаппоев Р.С. ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрена задача повышения оперативности функционирования автоматизированной системы управления в условиях применения инфокоммуникационных технологий за счет оптимизации структуры комплекса информационно-технических средств в реальном масштабе времени.

СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. КОМПЛЕКС ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ.

Большаков Б.Е., Шамаева Е.Ф. МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА НОВАЦИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕГИОНАЛЬНОГО УСТОЙЧИВОГО ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИМЫХ ВЕЛИЧИН.

Изучены вопросы актуальности, постановки проблемы, теоретической и методологической базы, методического обеспечения проектирования регионального устойчивого инновационного развития, методического обеспечения мониторинга и оценки новаций.

УСТОЙЧИВОЕ ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СОРАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ. УПРАВЛЕНИЕ НОВАЦИЯМИ.

ANNOTATION

KEYWORDS

Levin E.K., Raguzin P.S. Tatarnikova M.Yu. AN ESTIMATION OF THE KEYWORD FALSE ACCEPTANCE ERROR OF AUTOMATIC SPEECH RECOGNITION SYSTEMS.

The process of the accuracy estimation of different automatic speech keyword spotting systems is very important for the developers. The most widespread estimation is a false error rate. This one highly depends on acoustic similarity of keywords to non-keywords in the certain test speech dataset. This paper proposes an approach which allows to reduce this drawback.

SPEECH COMMANDS. FALSE ACCEPTANCE ERROR. AUTOMATIC CONTINUOUS SPEECH RECOGNITION.

Neelova N.V. DETECTING MODEL OF THE AUTHOR'S COPY AMONG CLUSTER OF SIMILAR WEB-DOCUMENTS.

In article the problem of revealing of an author's copy among cluster web-documents is considered. The method of definition of the original web-document on the basis of calculation of authorship, completeness of subjects of all web-resource, the quotability principle and other additional estimations of value of a web-resource is offered. As a result of work the general formula with the calculated factors is received, allowing to define the original in cluster doubles.

AUTHORSHIP DEFINITION. QUOTABILITY PRINCIPLE. WEB-DOCUMENT. COMPRESSION OF TEXTS. COMPLETENESS OF SUBJECTS. IDF. NEWTON'S ITERATIVE METHOD.

Safiullin N.T., Porshnev S.V. COMPARATIVE ANALYSIS OF COMPUTATION THE INSTANTANEOUS FREQUENCY WITH HILBERT TRANSFORM AND DIRECT QUADRATURE.

Article examines the results of the comparative analysis of two methods calculating instantaneous frequency on model frequency-modulated (FM) signals.

INSTANTANEOUS FREQUENCY. ANALYTIC SIGNAL. HILBERT TRANSFORM. FREQUENCY MODULATED SIGNALS. NON-STATIONARY DATA SERIES. DIRECT QUADRATURE.

Balashov E.V., Korotkov A.S., Rumyancev I.A. LINEARIZATION METHODS OF POWER AMPLIFIERS OF MOBILE COMMUNICATION SYSTEM TRANSMITTERS – SHORT REVIEW.

The article presents main parameters of modern microelectronic switchmode power amplifiers, classification and principles of the linearization systems of amplifiers are considered, including predistortion systems, main methods of predistortion are described.

LINEARIZATION METHODS. PREDISTORTION. POWER AMPLIFIER.

Sharapova O.Yu. OPTIMAL CONTROL OF MULTIVARIATE MODEL OF PROCESS OF PERIODIC INDUCTION HEATING.

In article the problems of optimization of processes of induction heating were formulated and solved on different criteria of quality using complex numerical model, interrelated nonlinear processes in the electromagnetic and thermal fields. The joint solution of the problem of optimal control induction heater according to criteria of high-speed performance and energy consumption was given.

OPTIMAL CONTROL. NUMERICAL MODEL. ALTERNANCE METHOD. INDUCTION HEATING. QUALITY CRITERIA.

Gilmanova N.A. A THREE-PHASE DECOMPOSITION METHOD FOR THE CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH LOADING CONSTRAINTS.

In this paper a hard combinatorial optimization problem, capacitated vehicle routing with three-dimensional loading constraints is considered. A new heuristic method named three-phase decomposition is proposed for its solving.

OPTIMIZATION. LOGISTICS. VEHICLE ROUTING. LOADING. PACKING. METAHEURISTICS.

Nizamutdinova R.I., Fedorova N.I. DECISION-MAKING FOR COOPERATIVE PROCESSES MANAGEMENT IN CONSTRUCTION ENGINEERING.

Cooperative processes management problems are analyzed. The paper discloses major problems that managing directors have to resolve while managing enterprise level cooperative processes. Methods to support decision-making for such sort of managing systems are introduced.

DECISION-MAKING. PROCESS MANAGEMENT. COOPERATIVE PROCESSES. CONSTRUCTION ENGINEERING.

Piatak I.M., Morozov D.V., Pilipko M.M. CIRCUIT OF TWO-DIGIT CELL FOR PIPELINED ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER.

In this paper considered schematic of two-digit cell for pipelined analog-to-digital converter. The method for reducing power consumption was proposed.

ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER. CMOS INVERTER. POWER CONSUMPTION.

Potapenko A.N., Kanunnikova E.A., Potapenko T.A. THE INVERSION METHOD FOR NUMERICAL CALCULATION OF THE DISTRIBUTED SYSTEMS OF TYPE «PLANE-CONDUCTOR».

On the basis of the modified inversion method is investigated lightning rod conductor for lightning protection systems taking into account a surface of a cloud and its edges. Results of calculations and their comparative analysis are presented.

EXTERNAL REGIONAL PROBLEM. THE MODIFIED INVERSION METHOD. THE LIGHTNING ROD CONDUCTOR. THE LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS.

Timenkov Yu.V., Timenkova D.V., Antyshev E.P. THE MODEL OF CONSUMPTION OF COMPUTER RESOURCES BY COUPLED PROCESSES WITH RESPECT TO RESOURCE REFERENCE HISTORY.

This article describes method of mathematical modeling of coupled processes execution when they are competing for system resources. Authors give classification of ways of interaction along with mathematical representation of each one.

MATHEMATICAL MODELING. COMPUTER SYSTEM. PHYSICAL ANALOGY. RESOURCE DISTRIBUTION. SCHEDULER.

Yeliseyev V.V., Kuzin A.K. MATHEMATICAL MODELLING AND EVALUATION OF STRENGTH OF LINEAR ELASTIC BODY IN THE VICINITY OF A CORNER INDENT.

An asymptotic solution of a theory of elasticity problem in the vicinity of a corner indent has been constructed. An algorithm for calculating stress intensity factors on the basis of the reciprocity theorem and the finite element method was developed. A force strength criterion for the case of mechanical and thermal impact is proposed.

LINEAR THERMO ELASTICITY. ASYMPTOTIC FORMULAS. INTENSITY FACTOR. FORCE STRENGTH CRITERION. RECIPROCITY THEOREM. FINITE ELEMENT METHOD.

Burlov V.G., Magulyan G.G., Matveev A.V. THE GENERAL APPROACH OF MODELLING SYSTEM SUPPORT OF SAFETY.

In this article authors propose approach to synthesis of system support of safety and variants of functioning in given target destination. The mathematical formalisation of synthesis of system was reached. The algorithm of synthesis of system support of safety was developed.

SYSTEM OF SAFETY. MODELLING. SYNTHESIS OF SYSTEM. EFFICIENCY.

Galiullin L.A., Zubkov E.V., Mochalov D.I. MATHEMATICAL MODELLING OF DIESEL ENGINES TESTING REGIMES.

The modelling of diesel engine for automated obtaining of its working regimes control vectors at the testing are described. For visual demonstration this model is presented as a graph. The model adequacy for diesel engine control is estimated with using comparison of modeled and experimental characteristics.

MATHEMATICAL MODEL. GRAPH. DIESEL ENGINE. AUTOMATED ENGINE TESTING SYSTEM.

Kurikov N.N., Shabrov N.N., Meleshchenko N.G. DETERMINATION OF CONTACT PRESSURE DISTRIBUTION IN THE EYES OF A LINK ROD OF A RADIAL ENGINE.

The article considers a problem of interaction of mechanical parts of a radial engine. The problem was solved using nonlinear contact formulation. Special attention was given to the question of efficiency of a high performance computer system application to the solution of this highly nonlinear problem.

RADIAL ENGINE. FINITE ELEMENT METHOD. HIGH PERFORMANCE COMPUTING.

Morozova E.V. MATHEMATICAL MODELS OF INDUSTRIAL PRODUCTION EQUIPMENT FUNCTIONING.

Mathematical models functioning equipment of glassware production are given. Synthesis models subsystems results in the holistic of imitation model of glassware production process which can be used in solving the problems of production management.

MANAGEMENT. MODELLING. MATHEMATICAL MODEL. GLASSWARE PRODUCTION.

Urakov A.R., Timeryaev T.V. GRAPH PARTITIONING WITH MINIMIZATION OF AVERAGE TRAVEL IN SUBGRAPHS.

The problem of partitioning weighted graph into given number of subgraps with minimization the value of average travel in subgraps is considering. For the problem solve presented multilevel algorithm.

GRAPH PARTITIONING. GRAPH APPROXIMATION. MULTILEVEL ALGORITHM. MASS SERVICE. OPTIMIZATION.

Akhatova Ch.F. ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHOD AND MODELS FOR DATA ANALYSIS AND DECISION MAKING.

In this article the fuzzy neural network model of the data intellectual analysis and of the reception of decision making rules is described. The algorithm of its training is offered. The results of the given algorithm efficiency comparison with other decisions are resulted. On an example of a medical diagnostics task the efficiency of the offered approaches use for the expert systems knowledge bases formation in various fields of human activity is shown.

KNOWLEDGE REPRESENTATION MODEL. FUZZY NEURAL NETWORK. KNOWLEDGE BASE. EXPERT SYSTEM. DECISION MAKING.

Kudryashov E.A., Sushnikov V.A. METHOD OF DECREASE IN AN ERROR NONCENTRAL LOADING IN THE ONE-DOT WEIGHT DEVICE WITH THE CAPACITOR GAUGE OF FORCE.

In clause additional errors one-dot loading devices with the capacitor gauge are investigated. Are developed recommendations on decrease in these errors to a level providing their competitiveness with strain gauge by gauges of force.

THE CAPACITOR GAUGE. NONCENTRAL LOADING. AN ERROR. A DOUBLE CONSOLE BEAM.

Richter M.R. ALGORITHM OF TRACE AT VLSI DESIGNING.

The problem of trace at VLSI design is considered. The algorithm of check planar the count on the basis of procedures of genetic algorithm is applied to its decision. All technological restrictions at trace performance are revealed. The decoder which is carrying out placing of modules on a crystal taking into account technological restrictions for performance of the subsequent connection of modules (trace) is developed.

PLANNING. GLOBAL TRACE. DETAILED TRACE. THE BLOCK DIAGRAM. THE PLANAR COUNT. THE DECODER.

Shesnyak E.L., Vasilyuk I.P., Fominykh Yu.G. MAINTENANCE OF COMPLEX SAFETY OF EDUCATIONAL INSTITUTION ON THE BASIS OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES.

The multilevel system of complex safety of educational institution is considered. The basic organizational-technical actions for creation and development of this system are reflected.

COMPLEX SAFETY OF EDUCATIONAL INSTITUTION. FIRE SAFETY. INFORMATION SYSTEMS OF SAFETY. CREATION OF NEW TECHNOLOGIES OF SAFETY.

Verzilin D.N., Shanygin S.I. CONCEPTUAL BASES OF MODELLING OF SOCIAL SYSTEMS.

In article problems of the formalized modelling of social systems within the limits of research of stability of target processes in such systems are considered. Conceptual bases and investigation phases are stated.

SOCIAL SYSTEM. MODELLING. STABILITY OF PROCESSES, OPTIMIZATION.

Lepeshkin O.M., Gappoev R.S. OPTIMIZATION OF STRUCTURE INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS.

In article the problem of increase of efficiency of functioning for the automated control system in conditions application of infocommunication technologies due to optimization of structure of a complex is considered is information-means in real time.

COMPLEX STRUCTURE. THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM. COMPLEX INFORMATION-MEANS.

Bolshakov B.E., Shamaeva E.F. MONITORING AND NOVATION ASSESSMENT IN THE PROJECTING OF REGIONAL SUSTAINABLE INNOVATIVE DEVELOPMENT WITH THE USAGE OF DIFFERENT MEASURES.

The article covers the following questions: actuality, defining of a problem, theoretical and methodological base, methodical providing of monitoring and novation assessment, methodological providing of projecting regional sustainable development.

SUSTAIBABLE INNOVATIVE DEVELOPMENT. UNIVERSAL BALANCED PARAMETERS. NOVATION MANAGEMENT.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГУ

№ 5 (133) 2011

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция журнала

канд. техн. наук, д-р экон. наук, профессор *А.В. Бабкин* – научный редактор

Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор

Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции 552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 28.10.2011. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,67. Уч.-изд. л. 17,67. 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.