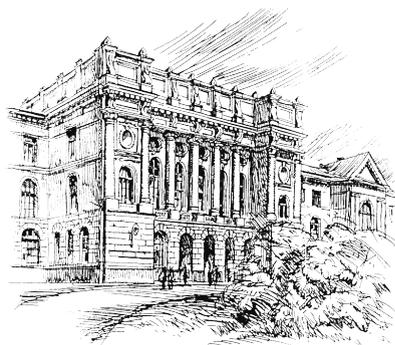


3(126)/2011



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); *Юсунов Р.М.*, чл.-кор. РАН.

СЕРИЯ “ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ”

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

Юсунов 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

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

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

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

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

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

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

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

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010



Содержание

Инфокоммуникационные технологии

- Лебедянец В.В., Морозов Е.В.** Анализ помехоустойчивости инвариантной системы связи при разных методах вычисления оценок информационных элементов 7
- Хасанов Р.И., Закревский Г.В., Галимов Р.Р., Аралбаев Т.З.** Мобильная система мониторинга состояния дорожного полотна и скоростного режима автомобиля на основе беспроводных каналов связи 11

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

- Шевченко А.В., Коротков А.С.** Разработка многодиапазонного преобразователя частоты приемника сверхширокополосной системы связи 15
- Лапшин Б.А., Петраков В.А.** Синтез корректоров на основе волоконно-оптических многослойных решеток 21
- Богоявленский Ю.А., Колосов А.С.** Организация и автоматизированная поддержка объектной базы данных графа ИКТ-инфраструктуры поставщика услуг Интернета 27

Проблемы передачи и обработки информации

- Христодуло О.И.** Интеграция ГИС в корпоративные системы обработки информации на основе многомерных информационных объектов 37
- Наумов И.С.** Математическая модель оценки влияния системы обеспечения ресурсами на результаты ликвидации чрезвычайных ситуаций 43
- Доросинский Л.Г., Литвиненко С.П.** Совместное измерение угловых координат нескольких источников сигнала 46

Радиотехника, антенны, СВЧ-устройства

- Бибарсов М.Р., Габриэльян Д.Д., Новиков А.Н.** Оптимальное восстановление спектра широкополосных сигналов в условиях помех с использованием адаптивных антенных решеток 49
- Акимов В.П., Глыбовский С.Б., Дубрович В.К.** Отражающая поверхность на основе ламинированной сетки из металлических нитей для коррекции неровностей рефлекторов зеркальных антенн 52

Системный анализ и управление

- Нагорный В.С., Машков И.А.** Динамические характеристики электропневматических преобразователей с турбулизацией струи потоком ионов 61
- Ильюшин Ю.В.** Проектирование системы управления температурными полями туннельных печей конвейерного типа 67
- Ляшенко А.Л.** Определение области устойчивости систем с распределенными параметрами методом расширенных частотных характеристик 73

Вычислительные машины и программное обеспечение

- Бортяков Д.Е., Мещеряков С.В.** Иерархия данных в задачах проектирования специальных грузоподъемных механизмов и машин 77
- Титенко Е.А.** Исчислительная производственная система и реконфигурируемый мультипроцессор для ее реализации 82

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

- Атрощенко В.А., Дьяченко Р.А., Шароватов А.С., Литвинов Ю.Н.** Разработка алгоритма определения критического параметра ресурса технических систем 89

Афанасьева Е.В. Моделирование процессов потребления экономических ресурсов с помощью вероятностных цепочек (на примере стран Западной Европы)	93
Верзилин Д.Н., Максимова Т.Г. Реконструкция временных характеристик процессов изменения состояний элементов социума	97
Бортяков Д.Е., Мещеряков С.В. Нерекурсивная модель иерархии объектов транспортных и технологических систем.....	105
Петриченко Г.С., Крицкая Л.М., Срур М.Ю. Методика поиска и устранения неисправностей в электронных блоках средств вычислительной техники.....	109
Данилова Н.В., Штейнберг Б.Я., Фоменко Л.Н. Параллельный алгоритм расчета справедливой цены европейского опциона	115
Припадчев А.Д. Анализ парка воздушных судов авиапредприятия.....	119
Онегов В.Л., Каримова Л.К. Алгоритмы и программный комплекс построения объемных моделей теплового поля Земли.....	125
Захаров А.А., Ткачук М.И. Алгоритм автоматической реконструкции трехмерных сцен по видеопоследовательности.....	129

Приборы, информационно-измерительные системы

Кудряшов Э.А., Сушников В.А. Оценка вариаций чувствительности тензорезистивных каналов датчиков силы	135
---	-----

Электроника, технологии производства материалов электронной техники

Уваров А.А., Александров С.Е. Химическое осаждение из газовой фазы диэлектрических пленок политетрафторэтилена.....	141
Протопопова В.С., Александров С.Е. Химическое осаждение из газовой фазы слоев Ni из бис-(этилциклопентадиенил) никеля	145

Информационные и телекоммуникационные технологии в образовании

Семенюта И.С. Использование метода попарного сравнения в задаче составления расписания	151
---	-----

Всероссийский конкурс студенческих научных работ

Карастелкина Н.А. Стратегический анализ деятельности предприятия на основе когнитивного подхода.....	155
Ежевская Г.С. Совершенствование модели управления муниципальным образованием	158

Конференция «Технологии Microsoft в теории и практике программирования»

Подорожкин Д.Ю., Когай А.Р., Сафонов В.О. Применение методов аспектно-ориентированного программирования при разработке программных систем.....	166
Крышень М.А., Богоявленский Ю.А. Интерактивная визуализация графа ИКТ-инфраструктуры организации	172
Дробинцев П.Д., Ким Р.И., Котляров В.П. Автоматизация тестирования с использованием символических трасс.....	175
Никифоров И.В., Петров А.В., Юсупов Ю.В., Котляров В.П. Применение методик формализации для построения верификационных моделей систем по UCM-спецификациям.....	180
Семинары	185
Сведения об авторах.....	187
Аннотации.....	191



Contents

Infotelecommunication technologies

- Lebedjantsev V.V., Morozov E.V.** The analysis of the noise stability of the invariant communication system at different methods of information elements estimations 7
- Khasanov R.I., Zakrewsky G.V., Galimov R.R., Aralbaev T.Z.** Mobile system of monitoring state of the road surface and regime of speed automobile based on wireless communication channels* 11

Telecommunication systems and computer networks

- Shevchenko A.V., Korotkov A.S.** Design of a multiband down-converter for ultra-wide band communication receiver 15
- Lapshin B.A., Petrakov V.A.** Equaliser synthesis based on optical multilayer lattices 21
- Bogoyavlensky Yu.A., Kolosov A.S.** Organization and automated maintenance of an ict-infrastructure graph object database of an internet service provider 27

Problems of transfer and information processing

- Khristodulo O.I.** Integration of gis in corporate information processing system based on multidimensional information objects 37
- Naumov I.S.** Mathematical model of an estimation of influence of system of maintenance with resources on results of liquidation of emergency..... 43
- Dorosinsky L.G., Litvinenko S.P.** Angular coordinates of several signal sources joint measurement..... 46

Radio engineering, aeriels, SHF-devices

- Bibarsov M.R., Gabriel'yan D.D., Novikov A.N.** Optimum regeneration of the pectrum broadband signals in the conditions of noises with use of adaptive antenna arrays 49
- Akimov V.P., Glybovsky S.B., Dubrovich V.K.** Laminated wire mesh-based reflective surface for phase errors correction due to antenna reflector's unevenness 52

The system analysis and management

- Nagorniy V.S., Mashkov I.A.** Dynamic characteristics electropneumatic converters with turbulization jet of ion stream 61
- Il'yushin Yu.V.** Projecting of control systems of the temperature field of tunnel kilns conveyor-type 67
- Lyashenko A.L.** Definition of stability range of distributed parameter systems by the expanded frequency-response method..... 73

Computers and the software

- Bortyakov D.E., Mescheryakov S.V.** Hierarchical data issues in designing special lifting devices and machines..... 77
- Titenko E.A.** The computing production system and reconfigurable multi-unit for its implementation..... 82

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

- Atroshchenko V.A., Dyachenko R.A., Sharovатов A.S., Litvinov Yu.N.** Developing of algorithm of determining critical parameter of the resource of technical systems 89
- Afanasyeva E.V.** Nonlinear probabilistic chain-based modelling of the distribution of economic resources consumption (by the example of western european countries) 93
- Verzilin D.N., Maximova T.G.** Time attributes reconstruction for processes of states changing in social medium 97

Bortyakov D.E., Mescheryakov S.V. Recursive-free data model of objects hierarchy in transport and manufacturing systems.....	105
Petrichenko G.S., Kritskaya L.M, Srur M.Y. Technique of search and elimination of malfunctions in electronic blocks of computer aids	109
Danilova N.V., Shteinberg B.Ya., Fomenko L.N. The parallel algorithm of the fair price calculating for the european option.....	115
Pripadchev A.D. Analysis of flying stock in air enterprise.....	119
Onegov V.L., Karimova L.K. Algorithms and software package to computing 3d models of earth's thermal field.....	125
Zakharov A.A., Tkachuk M.I. Algorithm for automatic reconstruction of three-dimensional scenes from video sequences.....	129

Devices, information-measuring systems

Kudryashov E.A., Sushnikov V.A. The estimation of the variation of sensitivity tensorresistive channels of gauges force.....	135
---	-----

Electronics, technologies of producing the materials of electronic technics

Uvarov A.A., Alexandrov S.E. Chemical vapor deposition of polytetrafluoroethylene dielectric films.....	141
Protopopova V.S., Alexandrov S.E. Chemical vapor deposition of Ni films from bis-(ethylcyclopentadienyl) nickel.....	145

Information and telecommunication technologies in education

Semenyuta I.S. Paired comparison method using in the timetable schedule problem.....	151
---	-----

The All-Russia competition of students works

Karastelkina N.A. The strategic analysis of activity of the enterprise on the basis of cognitive approach	155
Ezhevskaya G.S. Improvement of the model at management of municipal department	158

Conference «Technologies Microsoft in the theory and programming practice»

Podorozhkin D.Y., Kogay A.R., Safonov V.O. Using methods of aspect-oriented programming for software development	166
Kryshen M.A., Bogoyavlensky Yu.A. Interactive visualization of enterprise it infrastructure graph	172
Drobintsev P.D., Kim R.I., Kotlyarov V.P. Technology of testing automation based on symbolic traces	175
Nikiforov I.V., Petrov A.V., Yusupov Yu.V., Kotlyarov V.P. Usage of formalization approaches for creation of system models from ucm-specification	180

<i>Seminars SPbSPU</i>	185
------------------------------	-----

<i>About the authors.....</i>	187
-------------------------------	-----

<i>Abstracts.....</i>	191
-----------------------	-----

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИНВАРИАНТНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОЦЕНОК ИНФОРМАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Основная задача системы связи – обеспечение неизменности (инвариантности) передаваемой информации относительно воздействия на сигналы – переносчики информации различных мешающих факторов. Эта задача может решаться различными способами. Новым методом синтеза систем связи, обеспечивающих инвариантность к мешающим факторам, является метод, базирующийся на результатах теории групп преобразований [1]. Суть его состоит в следующем. Как показано в [2], множество возможных сигналов на выходе канала связи можно представить точками некоторой поверхности, погруженной в пространство представления выходных сигналов. При этом свойства поверхности определяются свойствами канала связи. Координаты точки поверхности, рассматриваемой в системе координат пространства представления, отображают соответствующий выходной сигнал, а координаты этой точки в собственной системе координат поверхности – соответствующий входной сигнал. Тогда преобразование входного сигнала можно представить как преобразование координат единой сигнальной точки при переходе от собственной системы координат поверхности модели канала к системе координат пространства представления выходных сигналов.

Известно, что операции преобразования систем координат образуют группу преобразований [3]. При этом преобразованиями сигналов линейными каналами связи соответствует аффинная группа преобразования систем координат. В некотором классе нелинейных каналов изменениям сигналов в канале соответствует проективная группа преобразований [2].

Воздействие аддитивных помех описывается группой аддитивных преобразований в виде сдвигов сигнальных точек в направлениях векто-

ров помехи. Группы преобразований имеют инварианты – некоторые характеристики объекта (системы объектов), которые остаются неизменными при воздействии на сами объекты преобразований группы [1]. Разумеется, обладают инвариантами и группы преобразований, характеризующие каналы связи. Из сказанного выше можно сделать вывод, что в силу своей неизменности инварианты канала связи являются «идеальной» формой представления передаваемой информации.

Используя сочетания инвариантов аддитивной и аффинной групп преобразований, можно обеспечить безыскаженную передачу информации по линейным каналам с аддитивными помехами.

В [2] на базе инвариантов линейных и нелинейных каналов были синтезированы соответствующие инвариантные методы модуляции и демодуляции. Кроме этого, в [2] показана возможность конструирования «составного инварианта», применение которого обеспечивает независимость передаваемой информации не только по отношению к преобразованиям аффинной или проективной группы, но и к преобразованиям аддитивной группы (группы сдвигов), отображающей воздействие аддитивных помех.

Структурная схема системы связи, использующей составной инвариант для безыскаженной передачи информации, формально может быть представлена следующим образом (рис. 1).

Будем считать, что подлежит передаче последовательность чисел. Эти числа могут отображать отсчеты аналогового сигнала, номера символов текстового сообщения и т. п. Далее, для общности эти числа называются *информационными элементами*.

На приведенной схеме J_i и \hat{J}_i обозначают, соответственно, величины информационных эле-

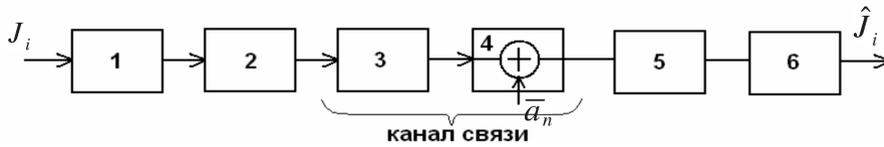


Рис. 1. Структурная схема инвариантной системы связи

ментов и оценки их значений. Канал связи представлен блоками 3 и 4. Блок 3 отображает преобразования сигналов элементами оборудования (фильтрами и т. п.) и средой передачи. Эти преобразования в линейных каналах описываются аффинной группой преобразований, инвариантом которой является так называемое «отношение трех точек» [3]. Это отношение в интерпретации к задачам связи соответствует сохранению отношения длин векторов сигналов одинаковой формы, т. е. сохраняющейся величиной является

$$J_i = \frac{|\bar{s}_{\text{вх}_i}|}{|\bar{s}_{\text{вх}_{on}}|} = \frac{|\bar{s}_{\text{вых}_i}|}{|\bar{s}_{\text{вых}_{on}}|}, \quad (1)$$

где J_i – значение передаваемого i -го информационного элемента; $|\bar{s}_{\text{вх}_i}|$, $|\bar{s}_{\text{вх}_{on}}|$, $|\bar{s}_{\text{вых}_i}|$, $|\bar{s}_{\text{вых}_{on}}|$ – длины векторов информационных и опорных сигналов, соответственно, на входе и выходе канала связи.

При этом $\bar{s}_{\text{вх}_{on}}$ и $\bar{s}_{\text{вых}_{on}}$ должны совпадать по направлению.

Информацию можно передавать блоками, в начале которых находится опорный сигнал, за которым следуют информационные сигналы. В частном случае в качестве опорного сигнала применим предыдущий информационный сигнал. Это обеспечит возможность передачи сообщений по каналам с быстро меняющимися параметрами.

В общем случае опорный сигнал может занимать любое место в блоке сигналов, опорных сигналов может быть несколько и т. д. Это при необходимости следует использовать для обеспечения информационной защищенности процесса передачи.

Из предыдущего выражения легко получить алгоритмы инвариантной модуляции

$$\bar{s}_{\text{вх}_i} = J_i \bar{s}_{on} \quad (2)$$

и демодуляции

$$\hat{J}_i = \frac{|\hat{s}_{\text{вых}_i}|}{|\hat{s}_{\text{вых}_{on}}|}. \quad (3)$$

Алгоритм модуляции реализует блок 2, а демодуляции – блок 6.

Блок 4 на рис. 1 отображает воздействия на сигналы аддитивных помех \bar{a}_n , что описывает-

ся аддитивной группой преобразований. Инвариант аддитивной группы представляет собой расстояние между линиями направлений сдвигов сигнальных точек вследствие воздействия помех в пространстве представления сигналов [2]. При этом для обеспечения инвариантности по отношению к аддитивным помехам в качестве сигналов $s_{\text{вых}_i}(t)$ и $s_{\text{вых}_{on}}(t)$ на выходе канала следует использовать сигналы, векторы которых ортогональны вектору помехи \bar{a}_n . Синтез таких сигналов осуществляется в блоке 1. Затем в блоке 2 из них формируются опорные и информационные сигналы в соответствии с (2). При таком их взаимном соотношении с вектором помехи применение корреляционного приемника с ортогональным помехе опорным сигналом делает оценку длин векторов информационного и опорного сигналов нечувствительной к помехе. Блок 5 (коррелятор), реализующий вычисления скалярных произведений принимаемых сигналов с опорным сигналом коррелятора, можно назвать *демодулятором инварианта аддитивной группы*.

Разумеется, реализации аддитивных помех разнообразны. В этом случае в качестве опорного сигнала следует использовать сигнал, обеспечивающий «наилучшую» ортогональность к большинству реализаций помех. Синтез такого сигнала приведен в [2].

При наличии в канале белого шума вследствие равновероятности любого направления сдвига сигнальных точек найти инвариант аддитивной группы сдвига невозможно. В связи с этим представляет интерес оценка помехоустойчивости инвариантной системы связи к воздействию белого шума. Желательно максимизировать помехоустойчивость. Для этого необходимо изыскивать методы повышения точности оценок. Цель данной статьи – сравнительный анализ точности оценок информационных элементов для двух методов обработки сигналов в приемнике инвариантной системы.

Оценка помехоустойчивости к белому шуму инвариантной системы связи

Произведем оценку помехоустойчивости для случая, когда вычисления оценок информацион-

ных элементов \hat{J}_i осуществляются в соответствии с алгоритмом (3).

Для этого вначале осуществим анализ помехоустойчивости для простого случая, когда в системе используются сигналы, допускающие их прием методом однократного отсчета. Тогда на входы делителя демодулятора будут поступать случайные величины $a_{ij} = s_{ij} + \xi_{ij}$ (числитель в (3)) и $b_j = s_{onj} + \xi_{onj}$ (знаменатель в (3)). Здесь ξ_{ij} и ξ_{onj} – отсчеты белого шума, воздействующие на информационные и опорный сигналы при передаче j -го блока информационных сигналов.

Случайные числа a_{ij} и b_j можно считать независимыми, имеющими независимые слагаемые в виде отсчетов белого шума ξ_{ij} и ξ_{onj} . Тогда двумерный закон распределения двух случайных величин a_{ij} и b_j будет следующим:

$$w_2(a_{ij}, b_j) = w(a_{ij}) \cdot w(b_j). \quad (4)$$

Используя это соотношение, определим условные плотности вероятностей $w = (\hat{J} / s_i)$, посредством которых можно оценить вероятности ошибочного распознавания значений J_i решающей схемой демодулятора.

Далее, для компактности записи последующих преобразований используем более короткие обозначения:

$$y = a_{ij}; x = b_j; z = \hat{J} = \frac{y}{x}; y = z \cdot x. \quad (5)$$

Рассматривая z как результат функционального преобразования случайных величин y и x , можно получить следующее выражение для ее плотности вероятности:

$$w(z) = \int_{-\infty}^{\infty} |x| \cdot w(x) \cdot w(z \cdot x) dx. \quad (6)$$

После подстановки в эту формулу выражений для плотностей вероятностей нормально распределенных случайных величин x и $y = z \cdot x$ имеем

$$w = (\hat{J} / s_i) = R \int_{-\infty}^{\infty} |x| \cdot e^{-[ax^2 - bx]} dx, \quad (7)$$

где $R = \frac{1}{2\pi\sigma(\xi_j) \cdot \sigma(\xi_{onj})} e^{-\frac{[\sigma^2(\xi_j) \cdot s_{onj}^2 + \sigma^2(\xi_{onj}) \cdot s_i^2]}{2\sigma^2(\xi_j) \cdot \sigma^2(\xi_{onj})}}$,

$$a = \frac{\sigma^2(\xi_j) + \sigma^2(\xi_{onj}) \cdot z^2}{2\sigma^2(\xi_j) \cdot \sigma^2(\xi_{onj})}, \quad (8)$$

$$b = \frac{\sigma^2(\xi_j) \cdot s_{onj} + \sigma^2(\xi_{onj}) \cdot s_i \cdot z}{\sigma^2(\xi_j) \cdot \sigma^2(\xi_{onj})}.$$

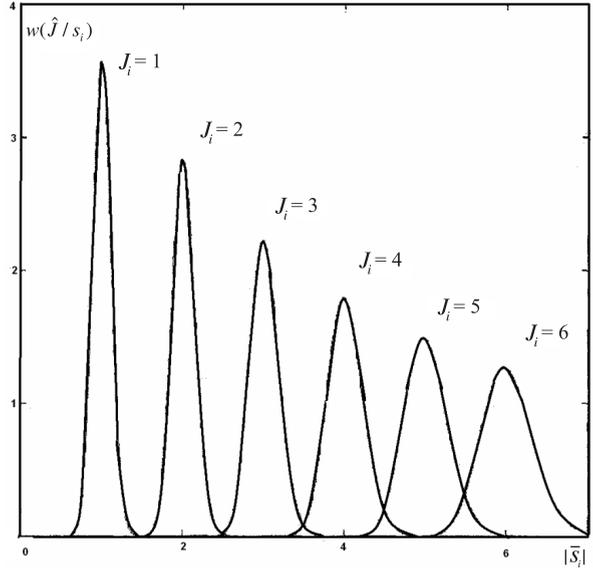


Рис. 2. Графики условных плотностей вероятностей $w = (\hat{J} / s_i)$ для $s_{onj} = 1; \sigma^2(\xi_{onj}) = 0,025; \sigma^2(\xi_j) = 0,01$

Для примера, методом численного интегрирования рассчитаны графики $w = (J / s_i)$ для $s_i = 1, 2, \dots, 6; s_{onj} = 1; \sigma^2(\xi_{onj}) = 0,025; \sigma^2(\xi_j) = 0,01$ (рис. 2).

Анализ графиков показывает увеличение дисперсии оценок для больших J_i , что объясняется возрастанием числителя в (3). П посредством (7) можно вычислить интервалы между величинами информационных элементов, при которых будет обеспечена заданная предельная величина вероятности неверного определения информационных значений.

Улучшить помехоустойчивость инвариантной системы связи позволяет применение методов оптимального приема сигналов. Будем исходить из того, что форма принимаемых сигналов на приемной стороне приблизительно известна, т. к. информационные и опорные сигналы имеют подобные формы, а оценка опорного сигнала $\hat{S}_{on}(t)$ принятая в начале, в конце или внутри блока сигналов, хранится в памяти приемника. Тогда алгоритм получения наилучших оценок будет следующим:

$$\min_{J_i} \int_0^T [\hat{s}(t) - \hat{J}_i \hat{S}_{on}(t)]^2 dt, \quad (9)$$

где T – длительность сигнала на выходе канала.

В результате аналитических преобразований получено выражение для плотности вероятности погрешности оценок $\Delta \hat{J}_i$:

$$\omega(\Delta\hat{J}_i) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi(1+2J_i^2)}} \exp\left[-\frac{\Delta\hat{J}_i^2}{\delta^2(1+2J_i^2)}\right], \quad (10)$$

где δ – среднеквадратическое значение белого шума.

Как следует из (10), погрешность оценок $\Delta\hat{J}_i$ является случайной величиной с гауссовской плотностью вероятности с дисперсией $\delta^2(1+2J_i^2)$ и нулевым математическим ожиданием.

Из алгоритма вычисления оценок информационных элементов (3) и (9), видно, что точность оценки существенно зависит от качества приема опорных сигналов в условиях воздействия белого шума. Для повышения точности оценок длин векторов опорных сигналов предлагается осуществлять их последовательное накопление и усреднение накапливаемой суммы:

$$\left|\hat{S}_{on}\right|_i = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i \left|\hat{S}_{on}\right|_j, \quad (11)$$

где $\left|\hat{S}_{on}\right|_i$ – усредненная оценка длины вектора опорного сигнала, полученная к моменту начала обработки i -го блока информационных сигналов.

На рис. 3 приведены результаты имитационного моделирования инвариантной системы связи. Цель исследования – сравнение помехоустойчивости различных методов оценки значений информационных элементов. Мерой точности приема информационных элементов выбрано среднеквадратическое отклонение (СКО) приня-

той последовательности информационных элементов $\{\hat{J}_i\}$ от переданной $\{J_i\}$. С учетом специфики исследования оно определяется следующим образом:

$$\text{СКО} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (J_i - \hat{J}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (J_i)^2} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь n обозначает число переданных элементов. При этом для получения достоверных оценок СКО величина n выбиралась исходя из ширины доверительного интервала, равного 15 % ожидаемой величины СКО при доверительной вероятности не менее 0,8 (число испытаний превышало 10^6).

В эксперименте использовались сигналы в виде функции Котельникова, допускающие их прием методом однократного отсчета. Имитировалось воздействие помехи в виде белого шума с разной мощностью. Диапазон изменения отношения сигнал/шум – от 0 до 30 дБ. В качестве информационных элементов использовались случайные числа с равномерным распределением плотности вероятности от 1 до 10. Длина блоков составляла 1000 сигналов. Результаты исследования приведены на рис. 3.

Как показал эксперимент, применение для вычисления оценок информационных элементов метода максимального правдоподобия позволило

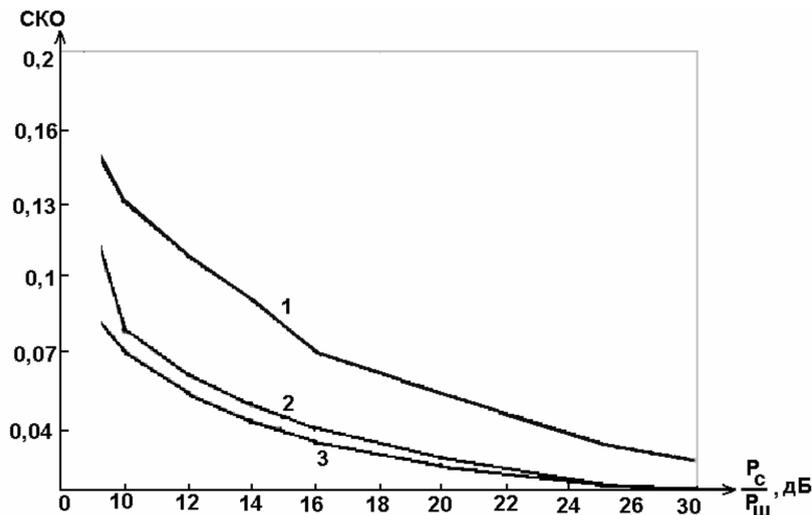


Рис. 3. Сравнение помехоустойчивости различных методов оценки информационных элементов в инвариантной системе связи

- 1 – метод непосредственного деления оценок длин векторов информационных и опорных сигналов;
- 2 – метод максимального правдоподобия с использованием усредненной оценки длины вектора опорного сигнала;
- 3 – кривая потенциальной помехоустойчивости эквивалентной неинвариантной системы связи



практически вдвое уменьшить погрешность (кривая 2) по отношению к методу вычисления путем непосредственного деления оценок длин векторов информационных и опорных сигналов (кривая 1). При этом инвариантная система уступает в помехоустойчивости эквивалентной неинвариантной системе приблизительно 2 дБ.

Для безыскаженной передачи информации возможно использование инвариантов групп преобразований, характеризующих канал связи.

В инвариантных системах связи для вычисления оценок информационных элементов применимы алгоритм непосредственного деления оценок длин векторов информационных и опорных сигналов и метод максимального правдоподобия

в сочетании с последовательным накоплением и усреднением оценок длин векторов опорных сигналов.

Полученные формулы позволяют рассчитать условные плотности вероятности погрешности оценок для алгоритма непосредственного деления и для метода максимального правдоподобия.

Как показывают результаты статистического моделирования, метод максимального правдоподобия в диапазоне отношений сигнал/шум от нуля до 30 дБ обеспечивает двукратное уменьшение погрешности оценок информационных элементов по сравнению с методом непосредственного деления. По отношению к неинвариантной эквивалентной системе проигрыш в помехоустойчивости составляет около 2 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ибрагимов, Н.Х.** Группы преобразований в математической физике [Текст] / Н.Х. Ибрагимов. –М.: Наука, 1983. –С. 7–25.

2. **Лебедев, В.В.** Разработка и исследование методов анализа и синтеза инвариантных систем связи:

Дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / В.В. Лебедев. –Новосибирск: Сибирский гос. ун-т телекоммуникации и информатики, 1995. –С. 81–269.

3. **Ефимов, Н.В.** Высшая геометрия [Текст] / Н.В. Ефимов. –М.: Наука, 1978. –С.421–440.

УДК 629.067:629.113.017

Р.И. Хасанов, Г.В. Закревский, Р.Р. Галимов, Т.З. Аралбаев

МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА И СКОРОСТНОГО РЕЖИМА АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ*

Один из основных принципов обеспечения безопасности дорожного движения – переход к интеллектуальным транспортным системам (ИТС). Стремление обеспечить безопасность всех участников дорожного движения привело к появлению множества ИТС, отличающихся как по принципам действия, так и по методам эксплуатации. Особое место среди них занимают компьютерные системы мониторинга состояния (КСМС) дорожного полотна и скоростного режима автомобиля, получившие широкое распространение в зарубежных транспортных средствах. На сегодняшний день эти системы отсутствуют для автотранспортных средств, стоимость которых не превышает 450 тыс. руб. Данный сегмент рынка занимают следующие российские, европейские, китайские и корей-

ские автомобили: LADA KALINA, PRIORA, GEELY, CHANCE, DAEWOO, KIA SPECTRA, PEUGEOT 107, FIAT PANDA, ALBEA, CHEVROLET SPARK. Актуальна задача разработки и внедрения КСМС для автомобилей, не оснащенных данными системами, количество которых в России составляет несколько десятков миллионов единиц.

По данным официального сайта [1] государственной автоинспекции МВД России за 2010 г. в Оренбургской области произошло 2901 дорожно-транспортное происшествие (ДТП), в котором 3723 человек получили ранения, 356 человек погибло. На дорогах Оренбургской области вне населенных пунктов произошло 1099 ДТП, что составляет 37,88 % от общего числа происшествий.

Представленные на сайте результаты Парето-анализа позволили сделать следующий вывод:

* В порядке обсуждения

в 87,86 % случаях ДТП произошли по вине водителей и из-за неудовлетворительного состояния дорог области. К основным видам нарушений со стороны водителей относятся: несоответствие скоростного режима АТС конкретным дорожным условиям и превышение скоростного режима АТС при установленных дорожных знаках, регламентирующих скоростной режим.

Анализ публикаций по данной тематике показал, что в настоящее время ведутся активные исследования по поиску новых средств аттестации водителей в процессе эксплуатации АТС [6, 7], разрабатываются методы идентификации категории и транспортно-эксплуатационного состояния ДП [2, 3], контроля технического состояния АТС [5], результаты разработок внедряются в КСМС.

Однако существующие КСМС недостаточно полно и эффективно учитывают:

возможность заблаговременного получения автодорожной информации и выбора соответствующего режима эксплуатации АТС;

возможность использования унифицированных штатных датчиков и устройств, имеющих в АТС, для снижения стоимости всей системы;

необходимость обеспечения водителей достоверной информацией при выборе режимов эксплуатации автомобиля, когда установленные дорожные знаки, регламентирующие скоростной режим, не соответствуют изменению качества ДП

(выбоины, гребенка) или сезонным условиям (гололед, дождь).

Цель статьи – повышение безопасности дорожного движения на основе компьютерной поддержки водителей в процессе эксплуатации АТС с использованием беспроводной системы связи (БСС). Для достижения поставленной цели определена организация и архитектура мобильной аппаратно-программной системы для регистрации и обработки данных о состоянии ДП и скоростном режиме АТС, и передачи их другим участникам дорожного движения с использованием БСС, а также разработан экспериментальный вариант – прототип системы.

Структурная схема системы представлена на рис. 1.

Входными данными для системы являются: вектор значений сигналов S от датчика скорости и торможения АТС, вектор $G = \{p, r\}$ продольных и поперечных уклонов ДП от датчика угла наклона ДУГ51-Р11, координаты широты и долготы местоположения АТС по данным автомобильной навигационной подсистемы SIM18EVB KIT для GPS-навигатора.

Потоки измерительной информации определяются перечнем датчиков и режимами работы средств регистрации и обработки данных. Оценка состояния ДП и выбора безопасного скоростного режима осуществляется в автоматизированном

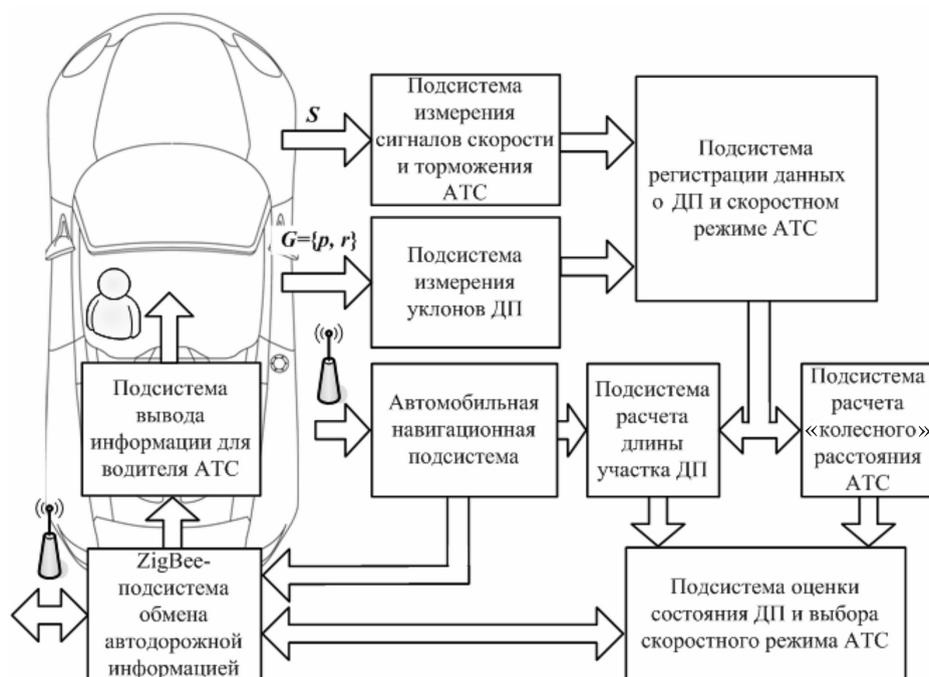


Рис. 1. Структурная схема мобильной системы мониторинга состояния дорожного полотна и скоростного режима автомобиля

режиме на основе соответствующих аналитических выражений и методик, представленных в [5–7], и разработанных авторами алгоритмов и аппаратно-программных средств [2, 3]. Использование автомобильной навигационной подсистемы позволяет осуществлять привязку дорожной информации к конкретному участку ДП и рассчитывать оценку коэффициента буксования по методике, предложенной в [5].

Аппаратная часть подсистемы измерения данных о ДП и АТС содержит: датчик скорости автомобиля ВА3-21140, двухкоординатные датчики продольного и поперечного угла наклона ДУГ51-Р11, GPS-навигатор SIM18EVB KIT и активную GPS антенну.

Сопряжение датчика ДУГ51-Р11 с ноутбуком RoverBook Nautilus Z500+ осуществлялось через USB интерфейс с использованием адаптера связи АС-232. Сопряжение датчиков торможения и скорости АТС происходило через LPT интерфейс компьютера с использованием адаптера, в состав которого входит фильтр верхних и нижних частот, триггер Шмидта. Для непрерывного питания портативной аппаратуры использован преобразователь напряжения на 300 Вт для получения электропитания переменного тока напряжением 220 В от аккумуляторной батареи АТС.

Датчики угла наклона устанавливались на задней оси и в кузове АТС, что позволило оценить углы наклона ДП, а также колебания кузова в зависимости от характеристик дороги и квалификации водителя. Регистрация скорости производилась непосредственно с выхода датчика скорости, что позволило оценить «колесный» путь автомобиля с точностью до нескольких десятых долей метра. Для управления системой и предоставления результатных данных водителю АТС в прототипе использован Нетбук ASUS модели Eee PC 700.

Программная часть системы включает программы сбора, регистрации и обработки данных

от первичных измерительных преобразователей, обработки данных GPS-навигатора, вычисления оценок характеристик ДП и определения категории дороги, вычисления безопасной скорости движения АТС и обмена данными по беспроводному каналу связи между основными элементами системы на платформе ZigBee.

Основные технические характеристики системы:

- количество осей измерения угла наклона – 2;
- диапазон измерения угла наклона по каждой оси от -55° до $+55^\circ$;
- погрешность измерения угла наклона $\pm 0,3^\circ$;
- период получения данных с датчика ДУГ51-Р11 составляет 0,25 мс;
- период получения данных с GPS-навигатора – 1 с;
- дискретность заполнения базы данных о состоянии АТС и ДП задается пользователем, по умолчанию составляет 2 с.

Разработанные аппаратно-программные средства позволяют реализовать различные конфигурации систем мониторинга состояния ДП и скоростного режима АТС. Топологическая схема одного из вариантов представлена на рис. 2.

На рисунке автомобили «АТС_01» и «АТС_02» обмениваются данными о состоянии ДП и скоростном режиме АТС, для пройденных ими отрезков ДП, соответственно, l_1 и l_2 . Обмен данными для обеспечения требуемой достоверности информации производится через диспетчерский пункт в зоне прямой видимости беспроводных средств ZigBee.

Разработанная система обеспечивает стабильный обмен автодорожной информацией при прямой видимости в радиусе до 300 м при использовании ZigBee-модемов ETRX2-PA компании Telegesis со встроенными антеннами [4]. Достигнутая экспериментально скорость передачи данных о состоянии ДП и скоростном режиме

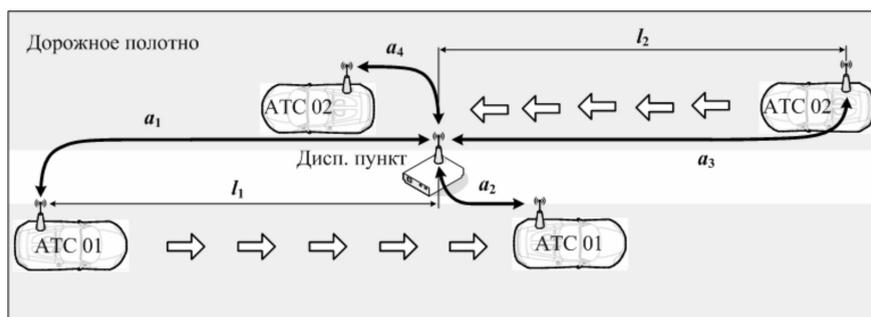


Рис. 2. Топологическая схема обмена автодорожной информацией между участниками дорожного движения на основе технологии ZigBee

Фрагмент оцениваемых параметров ДП «Оренбург – Орск»

Число импульсов датчика скорости	Широта град, мин, с	Долгота град, мин, с	Пройденный путь по GPS, м	Угол наклона продольный, градусы	Угол наклона поперечный, градусы	Оценка коэффициента буксов.
9	51° 57' 53,754''	55° 10' 53,058''	0	-0,2856	-1,0934	0
13	51° 57' 53,736''	55° 10' 53,040''	0,6539	-0,4301	-1,0934	0,9992
33	51° 57' 53,712''	55° 10' 53,022''	0,8175	1,5659	-1,6442	0,2498
114	51° 57' 53,478''	55° 10' 52,770''	8,6863	12,5151	-6,57	0,6554
261	51° 57' 52,908''	55° 10' 52,158''	21,1395	12,2417	-1,7809	0,8790
441	51° 57' 52,176''	55° 10' 51,318''	27,7316	5,7768	-2,8785	0,9417
652	51° 57' 51,318''	55° 10' 50,274''	33,1740	7,3003	-2,4645	0,9610
885	51° 57' 50,358''	55° 10' 49,140''	36,7302	6,3315	-2,0543	0,9635
1134	51° 57' 49,314''	55° 10' 47,892''	40,1111	3,5385	1,2464	0,9846
1394	51° 57' 48,252''	55° 10' 46,488''	42,3784	3,5385	3,4612	0,9962

АТС составляет 400 бит/с. Выбор технологии ZigBee обусловлен оперативностью и экономичностью развертывания подсистем обмена информацией, а также относительно малыми эксплуатационными затратами.

В таблице представлен фрагмент параметров ОДП и АТС, который передается в реальном времени по БСС с использованием технологии ZigBee. Перечень параметров позволяет оценить следующие характеристики: скорость и ускорение АТС, координаты местоположения, моменты нажатия водителем на педали акселератора и тормоза, поперечные и продольные углы ДП, колебания кузова АТС в двух плоскостях при его движении.

Разработанный прототип системы был апробирован в условиях, приближенных к реальным, на автомобиле ВАЗ-21140. Оценка характеристик ДП и организация автодорожного обмена выполнялась на автодроме ГОУ ОГУ; на участке с 3 по 5 км загородного шоссе г. Оренбурга; на участке с 795 по 816 км автомобильной трассы «Оренбург – Орск».

Основные достоинства разработанной системы:

обеспечение водителей оперативной и достоверной автодорожной информацией для выбора безопасных режимов эксплуатации АТС за счет использования БСС;

использование унифицированных штатных датчиков и устройств, имеющихся в АТС;

снижение риска аварийной ситуации, связанного с влиянием состояния ДП и АТС, за счет повышения информативности данных, предоставляемых водителю.

Отличительная особенность представленной системы – использование в составе подсистемы оценки состояния ДП и выбора скоростного режима оригинальной модели, а также устройства автоматического распознавания категории дороги и выбора безопасной скорости [2, 3], позволяющих повысить производительность вычислений параметров и сократить время на подготовку оперативной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт государственной автоинспекции МВД России [Эл. документ] / Режим доступа: <http://www.gibdd.ru/> (Проверено 05.05.2011).
2. Хасанов, Р.И. Оценка качества дорожного полотна на основе ассоциативной модели распознавания образов [Текст] / Р.И. Хасанов, Т.З. Аралбаев // ИТ-НОП-2010: Матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. – Орел: ОрелГТУ, 2010. –Т. 3 –С. 345–349.
3. Решение о выдаче патента на изобретение № 2010116601/08 РФ, МПК Устройство распознавания образов [Текст] / Р.И. Хасанов, М.З. Масыгутов, Т.З. Аралбаев; опубл. 08.04.2011.
4. Кривченко, Т. ZigBee-модемы ETRX компании Telegesis [Текст] / Т. Кривченко // Беспроводные технологии. –2006. –№ 2. –С. 28–30.
5. Методика оценки безопасности движения и транспортных качеств автомобильных дорог [Текст]. – М.: Высш. шк., 1971. –86 с.
6. Ходес, И.В. Приоритетные направления повышения безопасности АТС за счет свойств управляемости в системе ВАД [Текст] / И.В. Ходес, Нгуен Тхе Мань // ААИ: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров. –Волгоград: ВГУ, 2010. –С. 323–335.
7. Патент № 85405 Российская Федерация, МПК Устройство ограничения скорости автомобиля в зависимости от динамических характеристик, массогеометрических параметров и дорожного профиля [Текст] / И.В. Ходес, П.Г. Егоров, А.Н. Дербенцев; опубл. 10.08.2009, бюл. № 22.



Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

УДК 621.396.62

А.В. Шевченко, А.С. Коротков

РАЗРАБОТКА МНОГОДИАПАЗОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИЕМНИКА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Сверхширокополосные системы радиосвязи (Ultra-Wide Band – UWB) получили свое название из-за применения сигналов с полосой частот более 20 % от значения несущей частоты. Применение таких сигналов в UWB системах позволяет увеличить число абонентов в выделенном для радиосети диапазоне частот, повысить устойчивость радиосистем к сосредоточенным узкополосным помехам и федингу, а также повысить скорость передачи информации по сравнению с системами, работающими на основе классических узкополосных методов модуляции. На основе сверхширокополосных сигналов осуществляется построение сенсорных радиосетей. Для расширения спектра в UWB системах используются импульсы короткой длительности, а также специальные кодовые последовательности. Множественный доступ абонентов реализуется за счет временного или кодового разделения каналов. Федеральной комиссией связи США создана рабочая группа 802.15, которая выделила для UWB сетей два основных стандарта: 802.15.3, определяющий работу беспроводных персональных сетей (Wireless Personal Area Network – WPAN) с большой скоростью передачи информации на малые расстояния, и 802.15.4a, определяющий работу WPAN с малой скоростью передачи информации на большие расстояния [1–3].

Поскольку в UWB системах полоса частот, занимаемая сигналом, составляет не менее 500 МГц, а несущая частота – не менее 0,5 ГГц, то при приеме необходимо использовать преобразование входного сигнала вниз по частоте. Иначе тактовая частота аналого-цифрового преобразователя (АЦП) составит не менее 1,5 ГГц, что определяет высокий уровень потребляемой приемником мощности. Преобразователь частоты состоит из смесителя и блока генераторов, управляемых напряжением (ГУН), формирующих сетку опорных

частот. В статье представлены результаты разработки преобразователя частоты сверхширокополосной системы связи поддиапазонов частот 3,1–5,0 ГГц и 6,0–10,6 ГГц.

Структура приемника сверхширокополосных систем связи

Сверхширокополосные системы являются развитием широкополосных систем, в которых наибольшее распространение получили методика расширения спектра сигнала прямой последовательностью (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS) и методика расширения спектра сигнала изменением несущей частоты (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS) [1].

Характеристикой широкополосных систем связи служит отношение ширины полосы частот расширенного сигнала к минимальной полосе частот, требуемой для передачи информации. Однако реализация большой ширины полосы частот связана со следующими техническими проблемами: для систем с сигналами FHSS повышение скорости сканирования ограничено скоростью перестройки синтезаторов частоты; для систем DSSS повышение скорости кодовой последовательности приводит к существенному увеличению ошибок тактовой синхронизации в приемнике. Дальнейшее увеличение ширины полосы частот расширенного сигнала осуществляется с использованием сверхширокополосных сигналов. В этом случае передаваемый сигнал представляет последовательность одиночных симметричных импульсов короткой длительности. При большой скважности функциональная зависимость спектральной плотности мощности сигнала от частоты для периодической последовательности импульсов близка к спектральной плотности мощности одиночного импульса. В качестве импульсов ис-

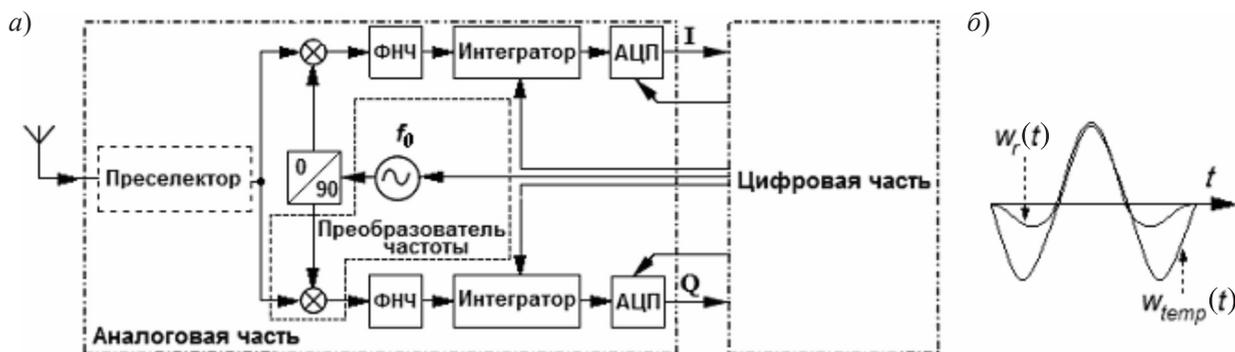


Рис. 1. Приемник сверхширокополосных сигналов:

а – упрощенная структурная схема приемника; б – огибающие опорного и принимаемого импульсов при подоптимальном приеме

пользуются гауссовы импульсы или импульсы с огибающей, соответствующей первой или второй производным по времени от функции огибающей гауссова импульса [2].

Большинство приемников UWB систем строятся по гомодинной схеме [4]. В гомодинном приемнике принимаемый сигнал переносится на нулевую промежуточную частоту, благодаря чему из структуры приемника исключаются высокоизбирательные полосовые фильтры. Частотная избирательность в гомодинном приемнике осуществляется фильтром нижних частот (ФНЧ), реализация которого ориентирована на металл-оксид-полупроводниковую (МОП) технологию. Преимущество гомодинных приемников – отсутствие паразитных зеркального канала приема и канала приема на промежуточной частоте.

На рис. 1 а изображена упрощенная структурная схема квадратурного гомодинного приемника UWB системы стандарта 802.15.4а [3]. В UWB системах используются как ортогональные, так и противоположные сигналы. Рассмотрим далее приемник противоположных сигналов с двухпозиционной фазовой манипуляцией, преимуществом которых является энергетический выигрыш 3 дБ при фиксированной вероятности ошибочного приема по сравнению с ортогональными сигналами. Это дает возможность реализовать подоптимальный прием. В частности, при приеме импульсов $w_r(t)$, соответствующих второй производной от гауссова импульса, в качестве опорного сигнала $w_{temp}(t)$ достаточно использовать радиоимпульс, длительность которого равна длительности принимаемых импульсов $w_r(t)$. Высокочастотное заполнение радиоимпульса выбирается с частотой f_0 , равной центральной частоте спектра принимаемого импульса (рис. 1 б)

[5, 6]. Оценки, приведенные в [5], показывают, что при фиксированной вероятности ошибочного приема при подоптимальном приеме требуется всего на 0,1 нДж большее значение энергии на бит по сравнению с оптимальным приемом. При этом по сравнению с оптимальным приемом для подоптимального существенно уменьшается уровень мощности, потребляемой аналоговой частью приемника.

Реализация блока генераторов

Для формирования опорного колебания гетеродина в диапазоне изменения несущих частот входного сигнала используется блок ГУН, который формирует сетку опорных частот. Диапазоны изменения частот ГУН соответствуют стандарту IEEE 802.15.4а, согласно которому опорное колебание перестраивается с шагом 0,5 ГГц в диапазонах частот 3,5–4,5 ГГц и 6,5–10,0 ГГц. Перекрытие полного диапазона частот осуществляется тремя ГУН. Каждый ГУН обеспечивает как дискретную перестройку с шагом 0,5 ГГц для формирования сетки частот, так и точную подстройку частоты. Наибольшее распространение получили балансные структуры ГУН на основе индуктивных трехточечных схем [7] (рис. 2). В ГУН поддиапазона 3,1–5,0 ГГц дискретная перестройка реализуется с помощью подключаемых ключами конденсаторов C_1, C_2 . Ключи управляются напряжением $U_{упр1}$.

В данной работе использована простейшая схема ключей на одном МОП-транзисторе как обеспечивающая малое сопротивление ключа и минимум вносимых паразитных емкостей в колебательный контур ГУН. Точная подстройка частоты ГУН реализуется с помощью варикапов D_1, D_2 , управляемых напряжением $U_{упр2}$ (рис. 2 а).

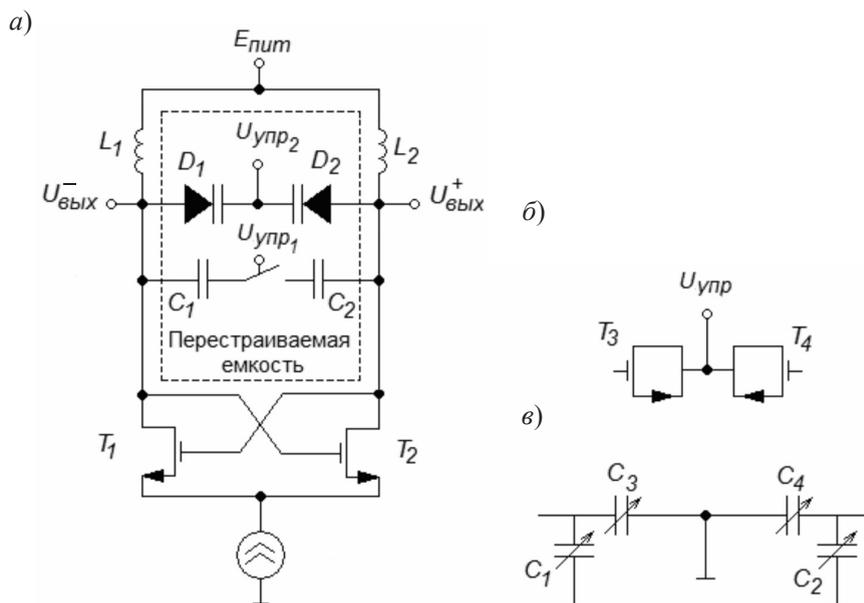


Рис. 2. Балансная трехточечная схема ГУН:
 а – структурная схема ГУН; б – схема формирования перестраиваемой емкости на основе паразитных емкостей МОП-транзисторов; в – эквивалентная схема цепи перестройки рис. б по высокой частоте

В ГУН поддиапазонов 6,0–10,6 ГГц перестройка и подстройка частоты ГУН реализуются на основе изменяемых напряжением $U_{упр}$ паразитных емкостей МОП-транзисторов Т3, Т4 с закороченным стоком и истоком (рис. 2 б). Эквивалентное представление данной структуры по высокой частоте изображено на рис. 2 в. Основной вклад в изменение частоты ГУН вносят емкости C_1, C_2 между подложкой и истоком, подложкой и стоком.

Расчет ГУН основан на представлении структурной схемы генератора в виде небалансного усилителя с крутизной g_m , охваченного петлей положительной обратной связи. При разомкнутой петле обратной связи усилитель обладает коэффициентом передачи по напряжению K . Тогда, если коэффициент передачи по петле обратной связи равен B , то самовозбуждение генератора на основной частоте произойдет при выполнении амплитудных и фазовых условий:

$$|B| \cdot |K| = 1, \quad (1)$$

$$\varphi_B + \varphi_K = 2\pi \cdot n, n = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

где $\varphi_B = \arctan\left(\frac{\text{Im}(B)}{\text{Re}(B)}\right), \varphi_K = \arctan\left(\frac{\text{Im}(K)}{\text{Re}(K)}\right).$ (3)

С учетом того, что B, K и проводимости Y_i , входящие в контур ГУН, являются функциями

от частоты f_0 , в системе уравнений (1) и (2) в общем случае число неизвестных величин Y_i, g_m, f_0 оказывается больше числа уравнений, т. е. для решения этой системы уравнений необходимо задать часть неизвестных величин. Если задать частоту генерации f_0 и один из элементов контура, то можно рассчитать крутизну усилителя g_m (например, для транзисторов Т1, Т2 на рис. 2 а) и значения остальных элементов контура Y_i . В начальный момент времени для обеспечения надежного запуска ГУН значение крутизны должно быть в два-три раза больше g_m . Расчет схемы ГУН целесообразно проводить с использованием программных средств, т. к. в общем случае параметры Y_i являются комплексными и решение уравнений (1) и (2) в символьном виде затруднено [7].

Предлагается следующий алгоритм расчета ГУН, показанного на рис. 2, без учета паразитных параметров.

1. Задается величина индуктивностей контура ГУН $L_1 = L_2 = L$, выбираются минимальные геометрические размеры индуктивностей, обеспечивающие максимальную добротность индуктивности Q_L . Определяется величина потерь в индуктивности R_L :

$$R_L = \frac{2\pi f_0 L}{Q_L}. \quad (4)$$

Далее R_L используется в качестве нагрузочного сопротивления ГУН.

2. Определяются значения емкостей варикапов D_1, D_2 контура ГУН на верхней частоте диапазона перестройки и крутизна транзисторов T_1 и T_2 g_m . Для этого решается уравнение (1) относительно рабочих емкостей контура C и крутизны транзисторов g_m . В результате численного решения формируются результаты в виде множеств значений C и g_m . Откуда выбираются вещественное значение C и положительное значение g_m . Аналогично определяются значения емкостей конденсаторов контура ГУН на нижней частоте диапазона перестройки.

3. Определяются геометрические размеры (ширина канала W и длина канала L) МОП транзисторов T_1 и T_2 при заданных параметрах технологии согласно выражению для крутизны транзистора g_m в режиме насыщения:

$$g_m = \mu_{\text{эфф}} C_{\text{ОХ}} \left(\frac{W}{L} \right) (U_{\text{зи}} - U_{\text{О}}), \quad (5)$$

где $\mu_{\text{эфф}}$ – эффективная подвижность носителей; $C_{\text{ОХ}}$ – удельная емкость слоя диэлектрика; $U_{\text{зи}}$ – напряжение между затвором и истоком; $U_{\text{О}}$ – напряжение отпирания.

4. Проводится моделирование для проверки рассчитанной схемы ГУН.

Отметим, что паразитные емкости МОП транзисторов и паразитные параметры микроселектронных индуктивностей оказывают существенное влияние на частоту и амплитуду генерации и диапазон перестройки ГУН. Следовательно, в расчет, проведенный при идеальных параметрах, необходимо вносить поправки. Поправки вносятся при компьютерном моделировании схемы ГУН, поскольку число паразитных элементов велико и их одновременный учет в предварительном расчете является невозможным. В общем случае для расчета схемы ГУН с учетом паразитных эффектов необходимо использовать эквивалентные схемы замещения МОП транзисторов и планарных индуктивностей.

Согласно приведенной методике проведен расчет ГУН блока преобразователей частоты. В зависимости от частотного поддиапазона ГУН крутизна g_m транзисторов T_1, T_2 составила от 5 мСм до 10 мСм при ширине канала транзисторов от 35 мкм до 55 мкм и длине канала транзисторов 0,18 мкм, номиналы индуктивностей L_1, L_2 – от 594 пГн до 1,52 нГн. Номиналы конденсаторов

C_1, C_2 ГУН поддиапазона 3,1–5,0 ГГц составили от 340 фФ до 790 фФ. Номиналы емкостей варикапов D_1, D_2 составили 400 фФ. Для ГУН поддиапазонов 6,0–10,6 ГГц ширины транзисторов T_3, T_4 составили от 204 мкм до 420 мкм при длине канала транзисторов 0,18 мкм, что определяет эквивалентную емкость контура ГУН от 600 фФ до 850 фФ при среднем значении $U_{\text{упр}} = 0,9$ В.

Проведено схемотехническое моделирование ГУН, разработанных на основе 0,18 мкм МОП технологии компании UMC, в среде Virtuoso, Cadence Design Systems. Амплитуда выходного колебания ГУН составила от 400 мВ до 900 мВ. Диапазоны перестройки ГУН составили 3,37–4,59 ГГц, 6,33–8,40 ГГц и 7,87–10,23 ГГц. В зависимости от поддиапазона частот уровень потребляемой мощности ГУН составил от 5 мВт до 9,5 мВт при напряжении питания 1,8 В. Приведенные параметры не уступают параметрам известных ГУН аналогичного назначения [8].

Реализация смесителя

В современных системах связи наибольшее распространение получили смесители по схеме Гильберта. Основное достоинство схемы Гильберта – высокий уровень развязки между всеми входами смесителя, что определяется двойной балансной структурой схемы. Схема смесителя на МОП транзисторах представлена на рис. 3 а. При расчете по постоянному току предполагается, что транзисторы T_3, T_6, T_7, T_8 работают в режиме насыщения, а транзисторы T_1, T_2, T_4, T_5 переключаются из открытого состояния в режим отсечки.

Расчет смесителя проведен по методике, изложенной в [9], при токе источника питания $I_{07} = 5$ мА, значении постоянной составляющей разности $(U_{\text{зи}} - U_{\text{О}})$ равной 250 мВ и минимальной длине транзисторов $L = 0,18$ мкм. Выбор данного значения I_{07} обусловлен тем, что при меньшем значении расчет приводил к физически нереализуемым значениям ширины транзисторов. Результаты расчета представлены в таблице.

Согласно таблице, постоянные уровни сигналов гетеродина U_{Γ} и входного сигнала $U_{\text{С}}$ выбраны 1,1 В и 1,4 В соответственно, поскольку при данных значениях наблюдается максимальный коэффициент передачи смесителя $K_{\text{СМ}}$. Номинал сопротивления нагрузки $R_{\text{Н}}$ выбран равным максимально допустимому значению 380 Ом. При данном значении $R_{\text{Н}}$ неравномерность за-

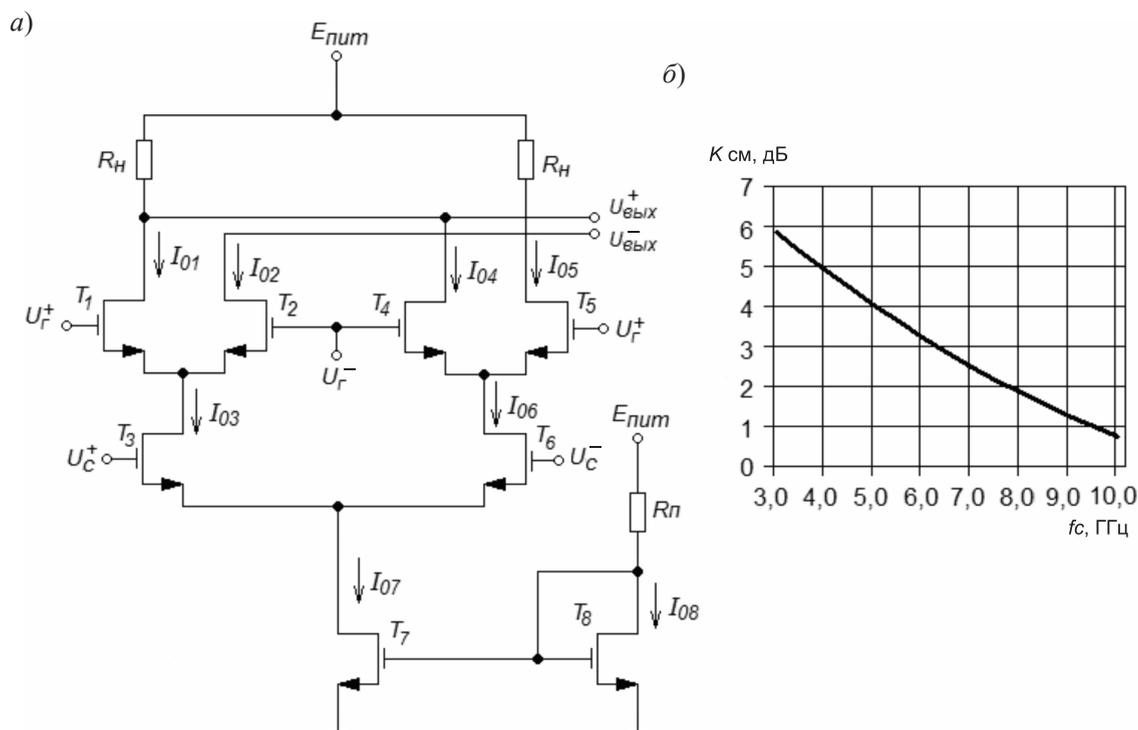


Рис. 3. Смеситель, построенный по схеме Гильберта:
 а – схема смесителя; б – характеристика перестройки смесителя

Результаты расчета смесителя

Ширина транзисторов T_1, T_2, T_4, T_5	25 мкм
Ширина транзисторов T_3, T_6	50 мкм
Ширина транзисторов T_7, T_8	100 мкм
Напряжение питания $E_{пит}$	1,8 В
Ток источника питания I_{07}	5 мА
Максимальное напряжение на затворе T_3, T_6	2,125 В
Минимальное напряжение на затворе T_3, T_6	1,1 В
Минимальное напряжение на затворе T_1, T_2, T_4, T_5	1,4 В
Максимальное напряжение на затворе T_1, T_2, T_4, T_5	1,825 В
Минимальная амплитуда сигнала гетеродина	352,5 мВ
Сопротивление нагрузки $R_н$	≤ 380 Ом

зависимости коэффициента передачи от частоты в пределах каждого канала стандарта 802.15.4a составляет менее 3 дБ.

Проведено схемотехническое моделирование смесителя, разработанного на основе 0,18 мкм МОП технологии компании UMC,

в среде Virtuoso, Cadence Design Systems. Построена частотная зависимость коэффициента передачи смесителя K_{CM} в диапазоне частот 3,1–10,6 ГГц при промежуточной частоте 50 МГц, представленная на рис. 3 б. Коэффициент передачи смесителя в диапазоне частот 3,1–5 ГГц составил от 6 дБ до 4 дБ. В диапазоне частот 6–10,6 ГГц коэффициент передачи составил от 3 дБ до 1 дБ. Уровень потребляемой смесителем мощности составил 9 мВт. Приведенные параметры не уступают параметрам известных смесителей аналогичного назначения [10, 11].

Периферийные устройства микросхем

Для работы микросхем ГУН и смесителя со стандартным кабелем по всем высокочастотным входам и выходам в схему необходимо ввести цепи согласования на волновое сопротивление 50 Ом. На рис. 4 а представлены входные согласующие цепи смесителя. На рис. 4 б показаны выходные согласующие цепи ГУН и смесителя. На все выводы микросхемы необходимо установить цепи защиты от статического электричества, которые строятся на основе МОП транзисторов в диодном включении (рис. 4 в). Данная схема обеспечивает минимум паразитных параметров, вносимых в кристалл и влияющих на согласование по высокочастотным входам и выходам, и занимает малую площадь на кристалле. Проведенное моделирование на основе так называемой *модели тела человека* подтвердило правильность работы схем защиты. Во всем диапазоне частот работы микросхем по всем высокочастотным входам и

выходам достигнуты уровни коэффициентов отражения S_{11} менее –10 дБ.

Для развязки шин постоянного тока по переменному сигналу в схему вводятся дополнительные цепи защиты на емкостях, которые формируют закороченные МОП транзисторы (рис. 4 з) [11].

Разработаны компоновки кристаллов микросхем смесителя и блока ГУН, входящих в состав преобразователя частоты приемника сверхширокополосных сигналов диапазонов частот 3,1–5 ГГц и 6–10,6 ГГц стандарта 802.15.4а. Компьютерное моделирование компоновок кристаллов с учетом экстракции паразитных параметров соответствует результатам моделирования схем на транзисторном уровне. При реализации кристаллов на основе МОП технологии компании UMC с минимальным разрешением 0,18 мкм площадь кристалла каждого ГУН составила не более 0,56 кв. мм. Площадь кристалла смесителя составила 0,945 кв. мм. По реализованным характеристикам представленные схемы не уступают известным аналогам или превосходят их. Так, для ГУН диапазона частот 6,0–10,6 ГГц по сравнению со схемой, описанной в работе [8], достигнуто увеличение полосы перестройки на 1,72 ГГц при уменьшении потребляемого тока на 40 %. Для смесителя при сходных размерах кристалла на нижней частоте рабочего диапазона 3,1 ГГц достигнут выигрыш по коэффициенту передачи в 20 % [10].

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

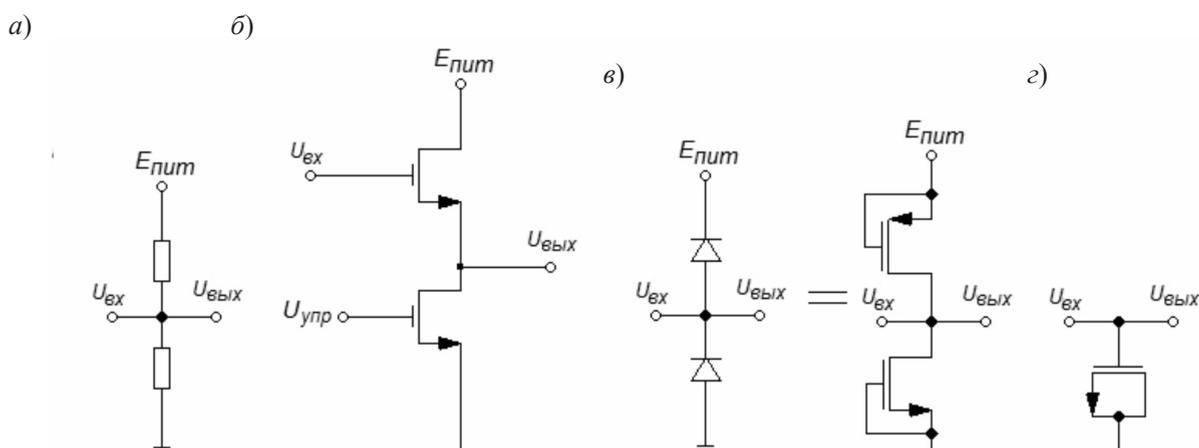


Рис. 4. Периферийные устройства микросхем:

а – входной согласующий блок смесителя; б – выходной согласующий блок смесителя и генератора; в – схема защиты от статического электричества; з – схема развязки шин постоянного тока по переменному сигналу



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скляр, Б.** Цифровая связь. Теоретические основы [Текст] / Б. Скляр. –Изд-во «Вильямс», 2004. –1099 с.
2. **Yang, L.** Ultra-wideband communications: an idea whose time has come [Текст] / L. Yang, G.B. Giannakis // IEEE Signal Proc. Magazine. –Nov. 2004. –Vol. 21. –№ 6. –P. 26–54.
3. **De Nardis, L.** Overview of the IEEE 802.15.4/4a standards for low data rate Wireless Personal Data Networks [Текст] / L. De Nardis, M-G. Di Benedetto // Proc. WPNC–2007. –P. 285–289.
4. **Коротков, А.С.** Интегральные (микроэлектронные) радиоприемные устройства систем связи – обзор [Текст] / А.С. Коротков // Микроэлектроника. –2006. –Т. 35. –№ 4. –С. 285–305.
5. **Verhelst, M.** Analog Circuit Design (RF Circuits Wide band, Front-Ends, DAC's, Design Methodology and Verification for RF and Mixed-Signal Systems, Low Power and Low Voltage) [Текст] / M. Verhelst [et al.]. –Springer, 2006. –P. 303–329.
6. **Verhelst, M. W.** System design of an ultra-low power, low data rate, pulsed UWB receiver in the 0-960 MHz band [Текст] / M. Verhelst, W. Dohaene // Proc. ICC. –2005. –P. 2812–2817.
7. **Коротков, А.С.** Устройства приема и обработки сигналов. Микроэлектронные высокочастотные устройства радиоприемников систем связи [Текст] / А.С. Коротков. –Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –223 с.
8. **Ju The, Yen.** A 0,18um CMOS 8GHz Quadrature VCO for UWB Application [Текст] / Yen Ju The [et al.] // Proc. ICUWB. –Sep. 2007. –P. 636–640.
9. **Коротков, А.С.** Двойной балансный смеситель на МОП транзисторах [Текст] / А.С. Коротков // Микроэлектроника. –2011. –Т. 40. –№ 2. –С. 140–153.
10. **Delong, Fu** A 0.18um CMOS high linearity flat conversion gain down conversion mixer for UWB receiver [Текст] / Fu Delong [et al.] // Proc. ICSICT. –2008. –P. 1492–1495.
11. **Mohamed, El-Nozahi.** A CMOS Low-Noise Amplifier With Reconfigurable Input Matching Network [Текст] / El-Nozahi Mohamed // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. –2009. –Vol. 57.–№ 5.

УДК 538.975;621.382.13;535

*Б.А. Лапшин, В.А. Петраков***СИНТЕЗ КОРРЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕШЕТОК**

Волоконно-оптические усилители (ВОУ) используются в линейном тракте волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением каналов (ВОСП-СР) для увеличения дальности связи в пределах оптической транспортной сети связи [4, 5].

Эрбиевые усилители работают в диапазоне длин волн 1528÷1565 нм, что соответствует частотному диапазону 192–196 ТГц. Практически все ВОУ в нижней части частотного диапазона имеют подъем усиления порядка 6 дБ на длине усилительного участка линейного тракта. Поэтому основная задача корректирования – снижение этого подъема с помощью корректора амплитудных искажений (КАИ) до величины δS – допустимой неравномерности частотной характеристики усиления в заданном диапазоне частот.

В настоящей статье исследуются частотные характеристики затухания КАИ, построенные

в виде цепочки локальных звеньев оптических многослойных решеток (ОМСР), и рассматриваются методы их расчета на основе строгих методов теории электрических цепей [2] и общей теории электрических фильтров с распределенными параметрами [1] с учетом особенностей распространения оптического сигнала в оптическом волокне, в тонких прозрачных пленках и других оптических средах.

ОМСР – новое направление в создании КАИ на основе оптических многослойных фильтров (ОМСФ). Совпадая по топологии с ОМСФ, оптические многослойные решетки отличаются от них следующими признаками.

Во-первых, показатели преломления соседних слоев решетки отличаются друг от друга на очень малую величину, так что их разность $n_2 - n_1 = \Delta n = (10^{-5} \dots 10^{-4})n_1$, тогда как в фильтрах $\Delta n = (0,5 \dots 1)n_1$.

Во-вторых, для формирования характеристики КАИ используется не полоса пропускания, как в ОМСФ [6, 7], а его полоса задерживания, ширина которой зависит от коэффициента рассогласования показателей преломления (КРПП) соседних слоев:

$$v = n_1 / n_2, \quad (1)$$

где $n_2 > n_1$.

Тогда, если $n_1 = 1,444$ и $n_2 = 1,448$, то $v = 0,9972$.

Анализ частотных характеристик локальных звеньев ОМСФ

Уравнения передачи в матричной форме удобно использовать для определения собственных параметров двухслойных полувзвеньев ОМСФ. В этих уравнениях вместо показателей преломления $n_1 = (\mu_1 \varepsilon_1)^{1/2}$ и $n_2 = (\mu_2 \varepsilon_2)^{1/2}$ используются (при $\mu_1 = \mu_2 = 1$) их обратные величины $\rho_p = 1/n_1$ и $\rho_c = 1/n_2$, где $\rho_p = (\mu_1/\varepsilon_1)^{1/2}$ и $\rho_c = (\mu_2/\varepsilon_2)^{1/2}$ – волновые сопротивления резонатора и связки. Тогда

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} \cos \Theta & j\rho_p \sin \Theta \\ j \sin \Theta / \rho_p & \cos \Theta \end{vmatrix} \times \\ & \times \begin{vmatrix} \cos \Theta & j\rho_c \sin \Theta \\ j \sin \Theta / \rho_c & \cos \Theta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Theta = \pi f / 2f_0$ и f – соответственно текущие волновая длина и частота ВАФ, f_0 – резонансная частота слоев, ширина которых равна $\lambda_0 / 4$.

Анализ характеристического сопротивления

$$Z = \sqrt{AB/(CD)} \quad (3)$$

и затухания

$$a = 20 \lg \left| \frac{\sqrt{AD} + \sqrt{BC}}{\sqrt{AD} - \sqrt{BC}} \right| \quad (4)$$

как функций переменной f , показывает, что полузвено ВАФ-2-Ц [1, 6, 7] в полосе частот $0 < f < 2f_0$ имеет три полосы пропускания (ППр) и две полосы задерживания (ПЗ), как это показано на рис. 1.

Значения характеристических сопротивлений полузвена ОМСФ на средней частоте средней полосы пропускания со стороны резонатора (слой с низким – «Н» значением показателя преломления) и со стороны связки (слой с высоким – «В» значением показателя преломления) определяются следующими выражениями:

$$Z_{pc} = \rho_p / \sqrt{v}; \quad Z_{cp} = \rho_c \sqrt{v}. \quad (5)$$

Границы ППр и ПЗ полузвена ОМСФ на оси частот f определяются через коэффициент v следующими формулами:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{4f_0}{\pi} \arctg \left(\sqrt{1 + \frac{1}{v}} - \frac{1}{\sqrt{v}} \right) = 2f_0 - f_4; \\ f_2 &= \frac{4f_0}{\pi} \arctg \left(\sqrt{1 + v} - \sqrt{v} \right) = 2f_0 - f_3. \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) видно, что на оси частот f характеристики функций цепи ОМСФ имеют арифметическую симметрию относительно средней частоты $f_0 = (f_1 + f_4)/2 = (f_2 + f_3)/2$.

Для синтеза заграждающих (режекторных) ОМСР необходимо знать ширину полосы задерживания Δf_3 звена с топологией $T_2 = \text{ВННВ}$ при значениях $v \rightarrow 1$ (например, при $v = 0,9972$). Тогда,

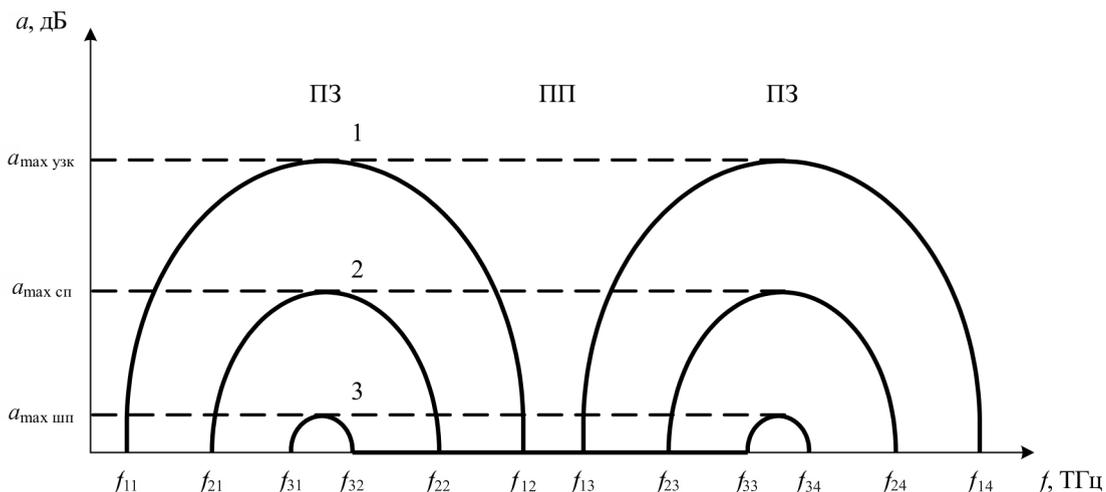


Рис. 1. Характеристическое затухание полузвеньев ОМСФ

с учетом (6), получим для первой и второй ПЗ звена ОМСП значения полос задерживания в виде:

$$\Delta f_{12} = f_2 - f_1 = \frac{4f_0}{\pi} (\operatorname{arctg}(\sqrt{1+v} - \sqrt{v}) - \operatorname{arctg}(\sqrt{1+1/v} - 1/\sqrt{v})); \quad (7)$$

$$\Delta f_{34} = f_4 - f_3 = \frac{4f_0}{\pi} (\operatorname{arctg}(\sqrt{1+1/v} + 1/\sqrt{v}) - \operatorname{arctg}(\sqrt{1+v} + \sqrt{v})). \quad (8)$$

Из теории четырехполосников известно [2], что при каскадном согласованном соединении q четырехполосников (в данном случае – одинаковых звеньев) собственное затухание такой цепи увеличивается точно в q раз. Тогда на средних частотах первой f_{12} и второй f_{34} ПЗ собственное затухание многозвенной решетки ОМСП, а с учетом (4), будет равно

$$A_{12} = a_{12} q; \quad A_{34} = a_{34} q. \quad (9)$$

Принцип построения корректоров на основе ОМСП

Выше было сказано, что особенностями ОМСП как фильтров многослойного типа являются малое различие показателей преломления соседних слоев решетки и малая величина затухания в полосе задерживания фильтра. Эти особенности определяют принцип построения корректоров на основе ОМСП.

При $v \rightarrow 1$ фильтр становится сверхширокополосным, а максимум затухания на средних частотах полос задерживания – ничтожно малым. При $v = 1$ полосы задерживания исчезают, т. е. становятся равными нулю, как это следует из анализа формул (7) и (8).

Поэтому приемлемые значения затухания можно получить за счет включения большого числа звеньев. Рассмотрим характеристику затухания звена ОМСП с параметром $v = 0,9972$ в расширенном диапазоне частот, показанную на рис. 2. Здесь за основу расчета принимается

первая резонансная частота слоя, например $f_0 = 100$ ТГц. Тогда из анализа рисунка видно, что средние частоты ПЗ $f_{m,m+1}$ ($m = 1..M$) определяются по формуле

$$f_{m,m+1} = f_0(2m - 1) / 2. \quad (10)$$

Величины максимумов собственного затухания многозвенной решетки (назовем ее *локальным звеном ОМСП*) определяются количеством звеньев решетки, т. е. $a_{k1} = qa_{12}$ или $a_{k2} = qa_{34}$. Так, например, на средних частотах полос задерживания 50, 150, 250 ТГц для решетки, состоящей из $q = 200$ элементарных звеньев (с топологией $T_{200} = (ВН^2В)^{200}$), величина максимумов собственного затухания составляет 9,6 дБ. Частотная характеристика собственного затухания этой решетки в окрестности средней частоты второй полосы задерживания $f_{34} = 150$ ТГц (как следует из (10)) имеет колоколообразную форму, граничные частоты которой совпадают с расчетными значениями, полученными с помощью формул (6).

Характеристическое сопротивление в ПЗ имеет мнимый характер. Поэтому при включении многозвенной решетки (МЗР) между резистивными частотно-независимыми нагрузками, в соответствии с теорией фильтров [2], характеристика рабочего затухания становится отличной от характеристики собственного затухания на величину затухания отражения. Происходит деформация кривой собственного затухания в кривую рабочего затухания (она становится более широкой и имеет меньшее максимальное значение). Например, максимальное рабочее затухание МЗР, нагруженной на среду с показателями преломления $n_{n1} = n_{n2} = (1,444 \cdot 1,448)^{1/2} = 1,446$, равно 1,263 дБ.

Для построения КАИ в широкой полосе частот (длин волн) нужно включать каскадно несколько локальных звеньев ОМСП с разнесенными средними частотами полос задерживания. Теория и расчет таких локальных КАИ рассмотрены в учебнике по теории электрических цепей [2, 3]

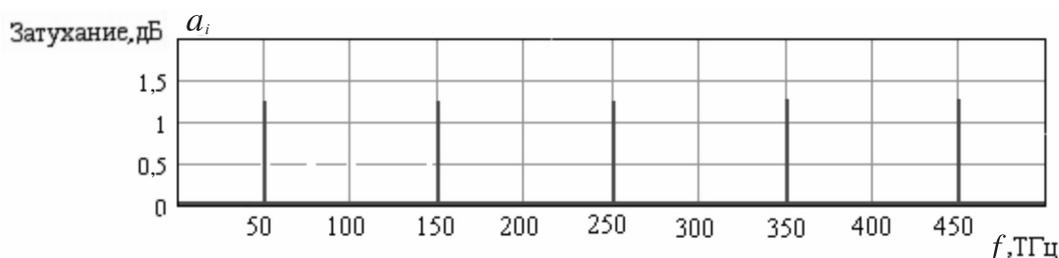


Рис. 2. Расположение полос задерживания МСП

и в дисциплине: «Многоканальные системы передачи» [8].

Ниже приводится новый метод расчета [6, 10] локальных КАИ на базе волоконно-оптических решеток – ОМСР.

Предварительно определимся с терминологией отдельных элементов ОМСР:

элементарное звено топологии (ВННВ)-МСР-2 (из двух элементарных полувзвеньев);

локальное звено топологии (ВННВ)^q – звено МЗР-*q*;

оптическая многослойная решетка ОМСР с топологией (ВННВ)^{q1}(ВННВ)^{q2}..(ВННВ)^{qN}.

Частотные характеристики звеньев МЗР-*q*

Характеристика рабочего затухания МЗР показана на рис. 4 б. Эту характеристику в широком диапазоне частот хорошо аппроксимирует обозначенная пунктирной линией функция

$$\varphi = A \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2, \quad (11)$$

где $x = 2\pi(f - f_{34})/\Delta f_q$, $A = a_{q,max}$ – максимальное значение главного лепестка на средней частоте ПЗ f_{34} ; f_{34} – средняя частота характеристики (частота максимума) или частота настройки локального звена; $\Delta f_q = (f_2 - f_1)$ – ширина основания главного лепестка; f_1 и f_2 – первые относительно f_{34} частоты, на которых характеристика затухания равна нулю. Заметим, что значения $a_{q,max}$ и Δf_q зависят от значений параметров q и ν .

На рис. 3 приведены графики зависимости величины максимума затухания $a_{q,max}$ и относительной ширины полосы главного лепестка

$\Delta \hat{f}_q = \Delta f/f_{34}$ локального звена от количества элементарных звеньев q в локальном звене (значения $a_{q,max}$, дБ; величина $\Delta \hat{f}_q$, %) для различных значений ν .

Из графиков видно, что относительная ширина полосы главного лепестка $\Delta \hat{f}_q = \Delta f/f_{34}$ локального звена слабо зависит от параметра ν . При изменении ν в третьем знаке кривые практически не различимы.

Если необходимо использовать более низкие частоты, то ОМСР можно построить на звеньях со средними частотами f_{12r} .

Решение задачи аппроксимации при синтезе локальных КАИ

Возможность приближения частотной характеристики затухания локальных звеньев с помощью классических базисных функций (11) позволяет преодолеть ограничение, которое затрудняет решение задачи аппроксимации для локальных КАИ. Это ограничение состоит в том, что максимум и ширина основания главного лепестка частотной характеристики локального звена зависят от значения параметра q одновременно.

Применение функций (11) дает возможность на первом этапе подобрать $a_{q,max}$, задавая приближенные значения $\Delta f = \Delta f_q$. Далее, по точному выражению для характеристики затухания локального звена можно уточнить значение Δf_q , и затем более точно подобрать $a_{q,max}$. Обычно достаточно 2–3 итераций.

Так как у базисных функций параметр Δf имеет различные значения, то базисные функции не являются ортогональными, и поэтому для вычис-

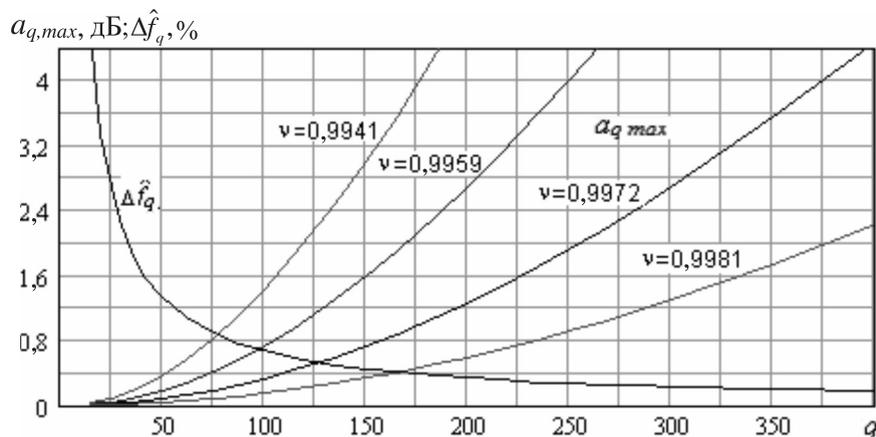


Рис. 3. Зависимость $\Delta \hat{f}_q = \Delta f/f_{34}$ и $a_{q,max}$ локальных звеньев от количества элементарных звеньев q для различных значений параметра ν

ления коэффициентов $a_{q,max}$ нужно использовать формулы, полученные для разложения заданных характеристик с помощью системы неортогональных базисных функций. Для среднеквадратичного критерия близости расчетные формулы приведены в [9]. Для чебышевского критерия близости можно использовать симплекс-метод и программы, описанные в работе А.А. Ланнэ [3]. На основе программы «Дробь 1», была разработана программа «Дробь- L» для пакета Matlab.

Методика синтеза корректоров на основе ОМСР

Для синтеза локального корректора должны быть заданы следующие исходные данные:

характеристика $a_{кор}(f)$, которую нужно воспроизвести в рабочей полосе корректирования $[f_a, f_b]$;

допустимая погрешность корректирования δa ;

реализуемое значение КРПП – ν .

В результате расчета должна быть найдена топология корректора и параметры локальных звеньев ($N_{зв}$, q_k и Δf_k).

Синтез корректора включает четыре процедуры.

1. Определение числа звеньев $N_{зв}$ и средних частот полос задерживания локальных звеньев.

2. Расчет длины оснований главных лепестков локальных звеньев Δf_k .

3. Расчет оптимальных значений параметров $q_{k, опт}$.

4. Оптимизация корректора.

Цель оптимизации – получение наименьшей погрешности корректирования путем уточнения средних частот и параметров q_k локальных звеньев.

Содержание перечисленных процедур уточнено в приведенных ниже примерах расчета корректоров.

Пример синтеза КАИ ВОУ на основе оптических многослойных решеток

Рассчитать топологию и параметры ОМСР, удовлетворяющей следующим требованиям.

• В рабочей полосе усиления ВОУ (в диапазоне длин волн) $f_a = 192 < f < f_b = 196$ ТГц ($\lambda_a = 1560$ нм $> \lambda > \lambda_b = 1528$ нм) задана частотная характеристика амплитудных искажений:

$$a_0(f) = 4,1 \sin^2(0,69f + 0,22) + 0,2. \quad (12)$$

• Аппроксимирующая функция не должна отклоняться от заданной функции затухания КАИ

более чем на $\pm 0,1$ дБ ($\delta a \leq 0,1$ дБ).

• Показатели преломления подводящих (нагрузочных) световодов $n_0 = (n_p \cdot n_c)^{1/2} = 1,446$, первого компонента (резонаторов) $n_p = 1,444$, второго компонента (связок) $n_c = 1,448$.

Синтез КАИ

1. Определение числа звеньев $N_{зв}$ и средних частот полос задерживания локальных звеньев.

По формуле (12) находим максимальное затухание корректируемой характеристики (4,3 дБ). По графику, изображенному на рис. 3, находим значение параметра $q = 390$ и относительную ширину главного лепестка $\Delta f/f_{34} = 0,0018$. Вычисляем $\Delta f = 0,348$ ТГц.

Тогда число локальных звеньев $N_{зв} = 4/(1,02 \times \Delta f/2) = 23$, поскольку средние частоты полос задерживания должны располагаться на расстоянии $\Delta f/2$.

С технологической точки зрения число локальных звеньев с различными параметрами должно быть минимальным, при этом ширина основания характеристик звеньев будет максимальной. С учетом графиков, приведенных на рис. 3, приходим к выводу, что заданную характеристику нужно разбивать на несколько частей. Если ее разбить на 8 частей, то корректор будет состоять из 8 секций, т. е. $N_c = 8$, и тогда в качестве заданной будем считать характеристику:

$$a_1(f) = a_0(f)/8. \quad (13)$$

Из рис. 4 видно, что максимальное затухание локального звена на частоте $f = 193,19$ ТГц будет равно 0,5375 дБ. По графику на рис. 3 находим значение параметра $q = 128$ и относительную ширину главного лепестка $\Delta f/f_{34} = 0,0052$. Вычисляем $\Delta f = 1,005$ ТГц, число звеньев в секции $N_{зв,c} = 4/(\Delta f/2) + 1 \approx 9$. При этом корректор будет состоять из $N_{зв} = N_{зв,c} \cdot N_c = 72$ локальных звеньев.

Частоту первого звена $f_{34,1}$ следует выбирать немного больше левой граничной частоты f_a , т. к. на частоте f_a должен быть экстремум погрешности при чебышевском приближении. Вначале целесообразно взять расстояние до частоты f_a не более 10 % от величины шага df . Поэтому выберем $f_{34,1} = 192,050$ ТГц. Расположим средние частоты звеньев равномерно с шагом $df = 0,500$ ТГц. Частоты звеньев вычислим по формуле

$$f_{34,k} = f_{34,k-1} + df. \quad (14)$$

По формуле (13) вычислим требуемое затухание

Таблица 1

Параметры локальных звеньев

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{34,k}$	192,05	192,550	193,050	193,550	194,050	194,550	195,050	195,55	196,05
$a1(f_{34,k})$	0,282	0,445	0,533	0,506	0,376	0,202	0,0652	0,0269	0,105
q_k	92	116	127	124	107	77	43	27	56
Δf_k	1,390	1,113	1,010	1,038	1,222	1,712	2,986	4,827	2,328

Таблица 2

Частоты $f_{34,k}$ и параметры q_k локальных звеньев

k	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_{34,k}$	192,079	192,568	192,959	193,339	193,670	194,076	194,541	196,353
q_k	84	95	99	95	87	79	61	57

хание $a1(f_{34,k})$. По графику на рис. 3 найдем q_k и $\Delta f_k / f_{34,k}$. Вычислим $\Delta f_k = (\Delta f_k / f_{34,k}) f_{34,k}$.

Результаты расчетов параметров звеньев приведены в табл. 1.

2. Расчет длин оснований главных лепестков локальных звеньев.

Для расчета приемлемых значений параметров Δf_k используем характеристики, подобные расчетной ($a1(f)$) и имеющие меньшие значения ординат.

Задаваясь уровнем уменьшения ординат, например, 10, 20 и 30 %, следует рассчитать несколько вариантов параметров Δf_k . Результаты расчета удобно представлять в виде таблиц, ана-

логичных табл. 1.

3. Расчет оптимальных значений параметра $q_{k,опт}$.

Расчет значений q_k произведем с помощью метода, изложенного в [9], для всех вариантов параметров Δf_k и выберем из них наилучший. В данном примере наилучший вариант получен при уменьшении ординат на 30 %, т. е. при расчете параметров $\Delta f_{k,опт}$ и q_k вместо (13) использована характеристика $a1^*(f) = 0,7 \cdot a1(f)$.

4. Оптимизация КАИ.

Полученное в п. 3 решение использовано в качестве нулевого приближения. Окончательное решение получено с помощью методов оптимиза-

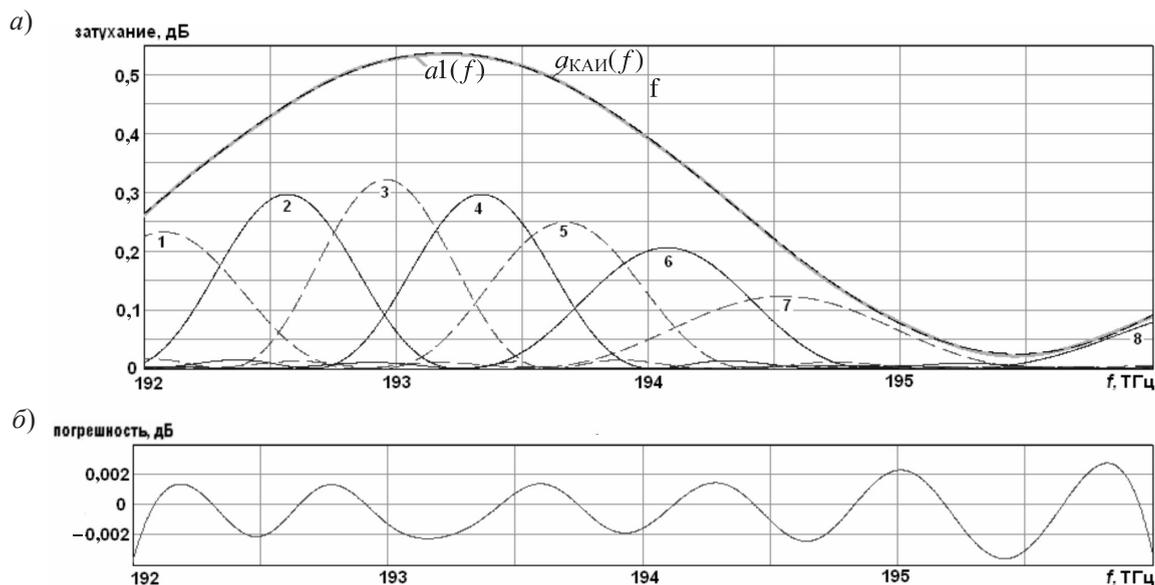


Рис. 4. Частотные зависимости:

a – исходной характеристики затухания $a1(f)$, характеристики корректора $a_{КАИ}(f)$ и локальных звеньев (1–8); b – погрешность корректирования $\delta(f) = a_{КАИ}(f) - a1(f)$

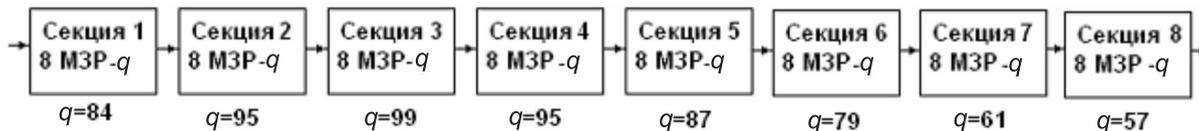


Рис. 5. Топология локального корректора

ции. Процедура оптимизации использует случайный поиск. В ходе оптимизации удалось также уменьшить число звеньев $N_{зв} = 8$. Параметры локальных звеньев после оптимизации приведены в табл. 2, а характеристики затухания и погрешность корректирования – на рис. 4.

Погрешность корректирования секции, как следует из рис. 4, не превышает 0,0035 дБ, а для всего корректора из 8 секций погрешность 0,028. При этом число локальных звеньев в секции $N_{зв,с} = 8$.

Число локальных звеньев $N_{зв} = 64$ (рис. 5).

Общее число слоев $N_{слоев} = 5\,256$, а общая длина ОМСР равна $(\lambda_0/4) \cdot N_{слоев} = 3\,942$ мкм ≈ 4 мм.

В статье рассмотрен новый метод синтеза амплитудных корректоров, основанный на применении оптических многослойных решеток. Разработаны оба этапа процедуры синтеза: решение задач аппроксимации и реализации. Пример расчета локального корректора амплитудных искажений подтверждает прикладную значимость основных теоретических положений статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапшин, Б.А. Новая теория и расчет фильтров и трансформаторов на отрезках передающих линий [Текст]/ Б.А. Лапшин. –СПб.: Наука, 1998. –175 с.
2. Белецкий, А.Ф. Теоретические основы электропроводной связи: Ч. 3. [Текст]/ А.Ф. Белецкий. –М.: Связьиздат, 1959. –390 с.
3. Ланнэ, А.А. Оптимальный синтез линейных электронных схем [Текст]/ А.А. Ланнэ. –М.: Связь, 1978. –336 с.
4. Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи [Текст]/ Р. Фриман; пер. с англ. –М.: Техносфера, 2003. –440 с.
5. Слепов, Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи [Текст]/ Н.Н. Слепов. –М.: Радио и связь, 2003. –300 с.
6. Lapshin, B.A. Synthesis of high frequency wave filters and transformers for communication systems [Text]/ B.A. Lapshin// 1* IEEE Int. Conf. On Circuits and Systems for Communications. –SPb, 2002. –P. 7.
7. Lapshin, B.A. Synthesis of wave analogue super narrow band filters [Text]/ B.A. Lapshin, V.A. Petrakov, A.V. Fedorov // ETV-05, The 7th Emerging Workshop: Circuit and Systems for 4G Mobile Wireless Communications. –SPb, 2005.
8. Арасланкин, И.Ф. Многоканальные системы передачи [Текст]/ И.Ф. Арасланкин, Б.А. Лапшин, А.Я. Макаренко. –СПб.: ВАС, 2007. –672 с.
9. Френкс, Л. Теория сигналов [Текст]/ Л. Френкс. –М.: Сов. радио, 1974. –344 с.
10. Лапшин, Б.А. Синтез оптических многослойных фильтров [Текст]/ Б.А. Лапшин, В.А. Петраков. // Компоненты и технологии. –СПб. –2006. –№ 10. –С. 50–55.

УДК 004.4+004.7

Ю.А. Богоявленский, А.С. Колосов

ОРГАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДДЕРЖКА ОБЪЕКТНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ГРАФА ИКТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ ПОСТАВЩИКА УСЛУГ ИНТЕРНЕТА

Интенсивное развитие аппаратуры и системного программного обеспечения (ПО) ИКТ-

инфраструктур (далее – Сеть) поставщиков сетевых услуг (ПСУ) требует расширения исследо-

ваний в области сетевого управления. В [1] говорится: «В настоящее время сетевое управление характеризуется недостатком информации о статусе и работоспособности сетей, лавиной данных (объемных, неоднозначных, неполных и противоречивых одновременно) и грубыми или неточными управляющими механизмами, чье воздействие трудно предсказуемо. ... Для изменения сегодняшнего статуса кво необходимы глубокие исследования в области сетевого управления».

Авторы [2] также обосновывают необходимость разработки формальных методов анализа сетей и экспериментальных платформ (ЭП, англ. термин *testbed*), обеспечивающих выполнение убедительных эталонных тестов в условиях реалистичных рабочих процессов. В [3] дан обзор широкого спектра ЭП.

Разрабатываемая в Петрозаводском государственном университете (ПетрГУ) ЭП Nest [4] предназначена для исследования моделей и методов управления Сетями на основе развивающейся и стандартизированной IETF измерительной технологии потоков данных [5, 6], которая широко используется для решения различных задач сетевого управления [7].

В зависимости от уровня (*tier*), ПСУ выполняют существенно различные функции в Интернет и, следовательно, характеристики и архитектура их Сетей имеют отличия, которые необходимо учитывать при разработке ЭП. Платформа Nest ориентирована на ПСУ, находящиеся по классификации [8], представленной в табл. 1, на третьем и четвертом уровнях (лПСУ).

Сети лПСУ принадлежат организациям средней величины и имеют небольшое число пограничных маршрутизаторов, обеспечивающих связь с Интернет. лПСУ ближе всех к пользователям, их основная функция – поставка услуг своему персоналу. Усложнение Сетей лПСУ (в англ. терминологии – *Enterprise Networks*) привело к существенному расширению исследований [9]

ориентированных на них методов управления и проектирования.

Данные об аппаратных элементах Сети и их связях (далее – граф Сети) являются базовым инструментом систем сетевого управления и ЭП. Знание актуального графа Сети позволяет идентифицировать формальные модели поведения входящих, исходящих и внутренних потоков данных, разрабатывать модели и методы решения большинства задач представленной ISO функциональной модели FCAPS. Например, задача планирования мощности лПСУ часто решается с помощью имитационных моделей, также использующих граф Сети [7].

Графы Сети современных лПСУ содержат тысячи элементов и связей, существенно меняются во времени, поэтому для их использования необходима система автоматизированного построения и хранения в БД.

Новым в представленном подходе является организация БД на основе объектной модели графа Сети, которая связана с объектными моделями организационной и пространственной структур лПСУ, что позволяет связывать узлы графа Сети с элементами этих структур в единой БД архитектуры организации, владеющей лПСУ.

В ЭП Nest граф Сети строится подсистемой Nestopo, которая, в отличие от предыдущих работ, не только обнаруживает, получая данные из таблиц MIB по протоколу SNMP, аппаратные элементы сети и связи между ними, но и размещает данные о графе в БД и поддерживает их актуальность.

Организация объектной базы данных графа Сети лПСУ

В статье предлагается для описания графа Сети использовать объектно-ориентированную модель данных, классы которой описывают множества возможных узлов и связей между ними. Порождаемые классами модели объекты, соответствующие узлам актуального графа Сети, определяются путем опроса данных MIB маршрутизаторов по протоколу SNMP.

Поведение потоков данных зависит от технических характеристик Сети и от поддерживаемых ею бизнес-процессов. Поэтому граф Сети должен отражать не только связи аппаратных элементов между собой, но и их связи с пространственными и административными единицами организации, владеющей лПСУ.

Таблица 1

Классификация уровней ПСУ

Номер и название уровня	Кол-во ПСУ
0. Плотное ядро	20
1. Транзитное ядро	129
2. Внешнее ядро	897
3. Малые региональные ПСУ	971
4. Локальные ПСУ	8898

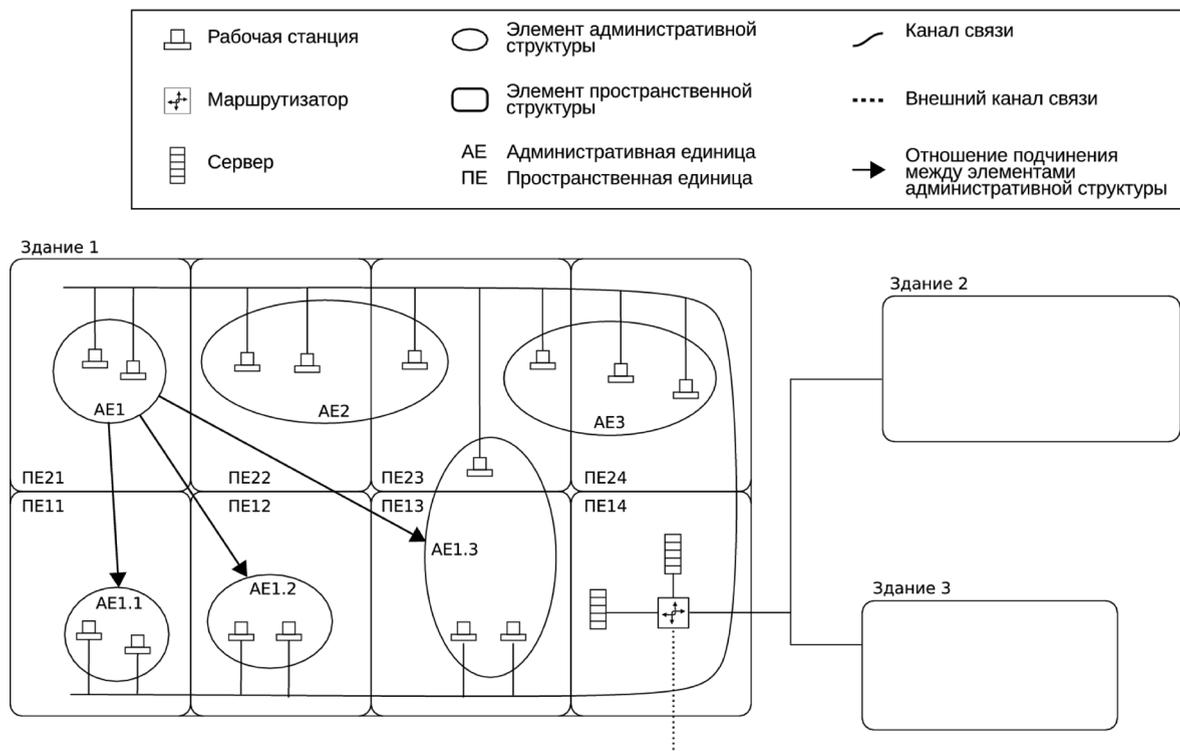


Рис. 1. Архитектура организации, владеющей ЛПСУ

Такие модели разрабатываются в рамках активно развиваемого подхода интегрированного моделирования архитектуры организации в целом (ИМАП – IEM – Integrated Enterprise Modeling), когда Сеть рассматривается как подсистема организации. Для реализации ИМАП разработаны опорные среды [10], стандарты [11], программные инструменты и, содержащие сотни классов, объектные модели данных CIM, SID [12], основанные на базовых стандартах ITIL и TOGAF.

Сложность этих моделей затрудняет их использование при разработке ЭП, поэтому модель данных строится на основе представленной на рис. 1 схемы архитектуры организации, владеющей ЛПСУ. Сеть располагается в пространстве нескольких зданий, при этом ее элементы обслуживают различные структурные единицы.

В работе используется простая трехструктурная объектно-ориентированная модель данных SON [4], являющаяся композицией трех моделей подсистем архитектуры ЛПСУ – пространственной (S – Spatial), организационной (O – Organizational) и аппаратно-сетевой (N – Network). Модель представлена на рис. 2 а в нотации UML. Класс Оссурасу связывает три модели, описывая часть помещения, которое принадлежит одной

организационной единице и содержит определенные устройства. Введение этого класса позволило избежать неудобных для реализации связей «многие ко многим».

SON позволяет как идентифицировать потоки данных через элементы этих компонент и агрегации элементов, так и, при необходимости, связывать эту модель с более сложными моделями архитектуры организации.

N-компонента модели SON – простая (8 классов) модель графа Сети (рис. 2 б), построенная согласно следующим требованиям:

- простота, расширяемость;
- явная связь с моделями организационной и пространственной подсистем ЛПСУ;
- идентификация всех аппаратных источников и приемников потоков данных;
- представление узлами графа Сети как элементарных (устройства), так и агрегированных (IP-подсети, виртуальные сети VLAN) источников и приемников потоков данных;
- представление связи между узлами на уровне маршрутов IP;
- характеризация элементарных узлов IP и MAC-адресами;
- возможность подключения алгоритмов построения графа канального уровня Сети.

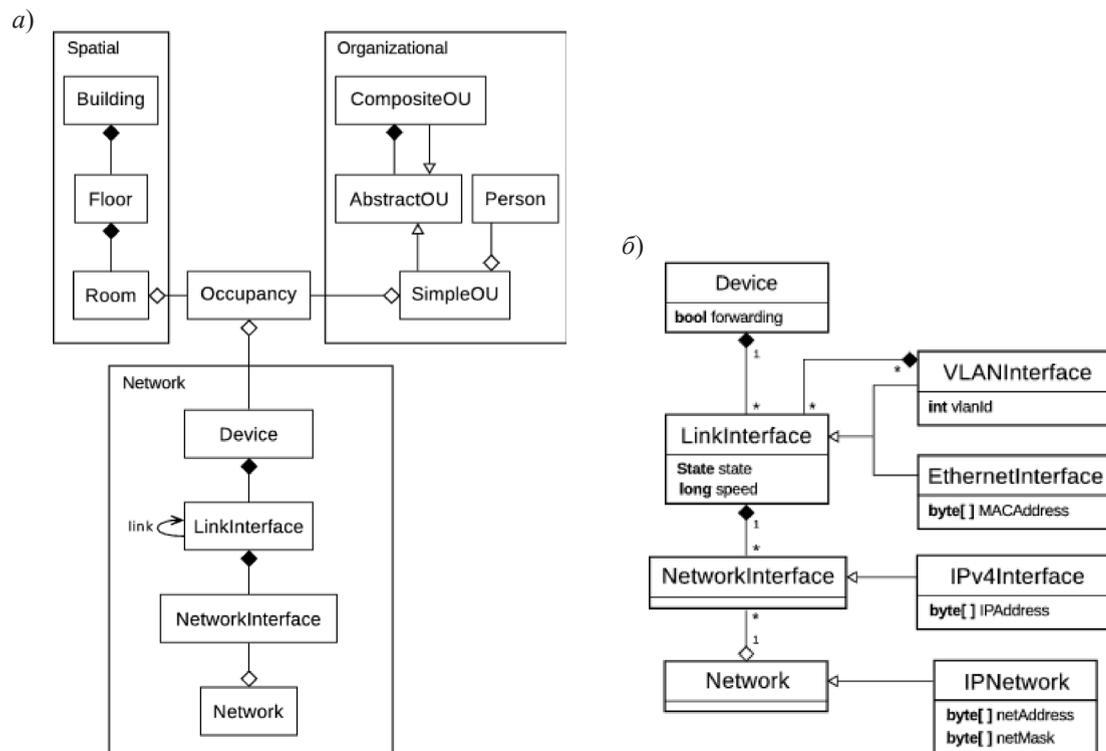


Рис. 2. Модель SON:

а – общая модель SON; б – N-компонента модели SON

В N-компоненте узлы графа на сетевом уровне представлены классами, описывающими устройства, IP-интерфейсы и IP-подсети. На канальном уровне – каналные интерфейсы и их связи между собой. Устройство, имеющее IP-адрес, описывается классом Device, его интерфейсы канального уровня – классом LinkInterface. Каждому интерфейсу канального уровня может назначаться несколько интерфейсов сетевого уровня (NetworkInterface), которые могут быть объединены в IP-подсети (класс IPNetwork – наследник класса Network). Наследниками класса LinkInterface являются классы VLANInterface и EthernetInterface. Класс IPv4Interface является наследником класса NetworkInterface. При этом класс VLANInterface агрегирует входящие в виртуальную сеть объекты класса LinkInterface.

Узлы графа Сети представляются конкретными объектами классов модели. Дуги графа считаются ненаправленными, строятся согласно связям между классами и содержательно интерпретируются по конкретному техническому смыслу этих связей, как это показано на рис. 3. Маршрутизатор D1 имеет каналные интерфейсы LI1, LI2, LI3. Последние два объединены в виртуальную

сеть V1, имеющую сетевой интерфейс NI1, принадлежащий подсети N2.

Алгоритм автоматизированной поддержки базы данных графа Сети

В англоязычной литературе рассматривалась задача «обнаружения топологии» (topology discovery) или построения «карты сети» (network mapping), вне связи с задачей хранения этих данных в БД. Наш алгоритм реализует задачу обнаружения совместно с задачей размещения в БД актуальных данных о графе Сети.

В ранних работах по алгоритмам обнаружения использовались такие инструменты, как ICMP (ping, traceroute), DNS. В 1999 г. в [13] предложен один из первых алгоритмов обнаружения топологии на уровне IP на основе данных MIB маршрутизаторов сети, поддерживаемых протоколом SNMP. Далее этот подход интенсивно развивался, и в [14] приведен обзор его современного состояния и предложен алгоритм обнаружения топологии на канальном и IP уровнях, а также сервисов на уровнях 4 и 7 модели OSI.

Отметим, что интенсивное развитие технологий канального уровня [15] и разнообразие

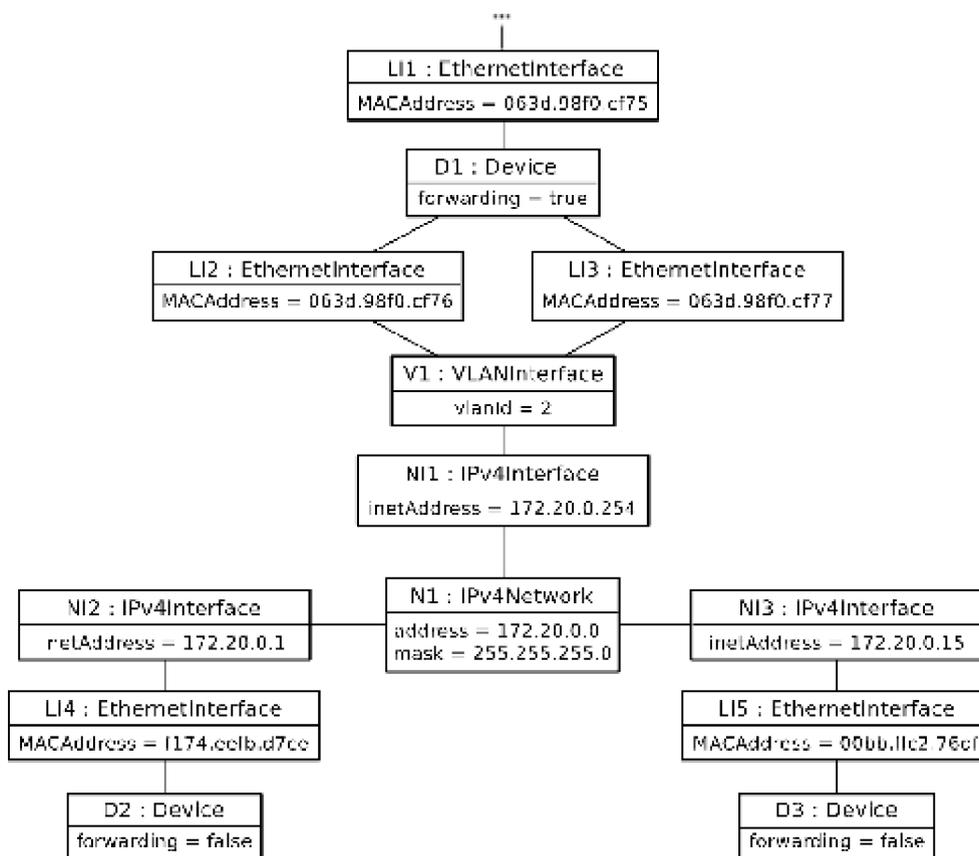


Рис. 3. Пример графа Сети в виде UML-диаграммы объектов

политик доступа к данным SNMP существенно усложняют алгоритмы построения графа Сети этого уровня. Разработку таких алгоритмов целесообразно вести на основе недавно стандартизованного протокола LLDP [16], специально разработанного для этих целей.

В алгоритме (рис. 4) представлен процесс построения графа Сети и записи его в объектную БД. На вход алгоритма подаются IP-адрес произвольного маршрутизатора ЛПСУ и параметры обращения по протоколу SNMP. Используются объекты MIB маршрутизаторов ifTable, ifXTable, ipAddrTable, ipNetToMediaTable, ipRouteTable и некоторые др.

Работа начинается с создания узла Device, описывающего начальный маршрутизатор. Затем из его MIB запрашивается таблица канальных интерфейсов ifTable и для каждого ее элемента создается узел LinkInterface и его связи с маршрутизатором. По данным таблицы сетевых адресов ipAddrTable для каждого узла LinkInterface создаются узлы назначенных ему сетевых интерфейсов – конкретных наследников класса Net-

workInterface (например IPv4Interface) и соответствующие связи. Затем, для каждого сетевого интерфейса с помощью маски подсети определяется ее адрес, создается узел подсети IPNetwork и его связь с узлом этого сетевого интерфейса.

Множество других сетевых интерфейсов, входящих в подсеть, описываемую созданным на предыдущем шаге узлом, определяется путем выбора из таблицы ipNetToMediaTable (ARP-кеш) записей устройств, IP-адреса которых входят в эту подсеть. Создаются узлы этих устройств, их канальных и сетевых интерфейсов, а также все необходимые связи между узлами.

Устройство, имеющее значение indirect в поле ipRouteNextHop таблицы ipRouteTable, выполняет маршрутизацию. Если к нему есть доступ по SNMP, то к представляющему его узлу применяется описанный выше алгоритм. В противном случае по данным полей таблицы ipRouteNextHop определяются подсети, получающие пакеты через это устройство, создаются соответствующие им узлы и их связи.

Перед созданием узла графа по атрибутам

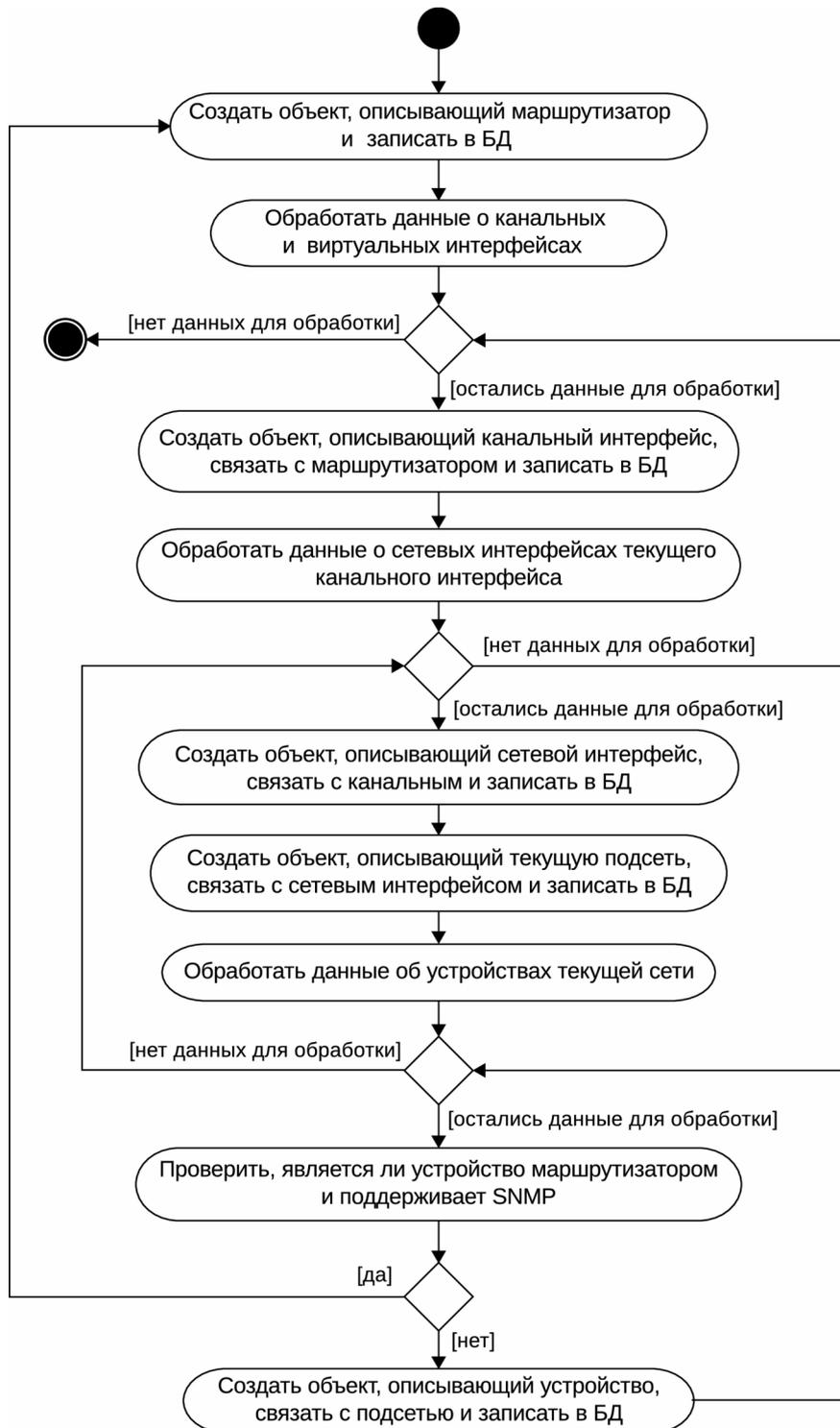


Рис. 4. Схема алгоритма построения графа Сети

объекта производится поиск для проверки присутствия этого узла в БД. В случае присутствия атрибуты и связи обновляются, иначе – создаются, после чего они записываются в БД.

Отметим, что проверка присутствия узлов в БД позволяет корректно представлять устройства, имеющие несколько сетевых адресов (multihoming). При обнаружении устройства вы-

полняется поиск созданных ранее объектов класса LinkInterface с MAC-адресом обнаруженного устройства. Если такой объект найден, то набор его сетевых интерфейсов обновляется.

В настоящее время разработка универсального алгоритма получения данных об идентификаторе виртуальной сети и наборах входящих в нее канальных интерфейсов затруднена использованием закрытых корпоративных стандартов и другими недостатками в реализациях соответствующих MIB. В представленном алгоритме методы получения данных выбираются в зависимости от типа маршрутизатора. Для маршрутизатора Cisco 7204 VXR набор канальных интерфейсов, соответствующих виртуальному, получается из стандартной таблицы ifStackTable.

В маршрутизаторах Cisco 1841 и Cisco Catalyst 37xx используются таблицы vmMembershipTable из MIB-модуля CISCO-VLAN-MEMBERSHIP-MIB, sviVlanInterfaceIndexTable из MIB-модуля CISCO-VLAN-IFTABLE-RELATIONSHIP-MIB.

Подсистема Nestopo для построения и заполнения БД графа Сети

БД реализована следующим образом. Конечным хранилищем графа является реляционная

СУБД. Для выполнения базовых операций (чтение, запись, поиск) в терминах объектного представления используется технология объектно-реляционного отображения Java Persistence API (JPA), реализованная в программном каркасе Hibernate. Генерация реляционной схемы, соответствующей объектной модели SON выполняется Hibernate автоматически. Запросы формулируются на языке JPQL и автоматически транслируются в SQL-запросы к нижележащей реляционной БД. Результатом запроса является набор объектов SON-модели, удовлетворяющих заданным условиям. Hibernate поддерживает более 25 различных реляционных СУБД. В настоящий момент Nest использует MySQL и Apache Derby.

Архитектура подсистемы Nestopo (рис. 5) основана на принципе изоляции кода. Для каждого класса модели графа Сети разработан независимый от других классов модели программный класс — провайдер, реализующий построение объектов этого класса. Такой подход существенно облегчает модификацию кода при изменениях модели графа Сети и процедур его построения и обеспечивает возможность частичного обновления БД.

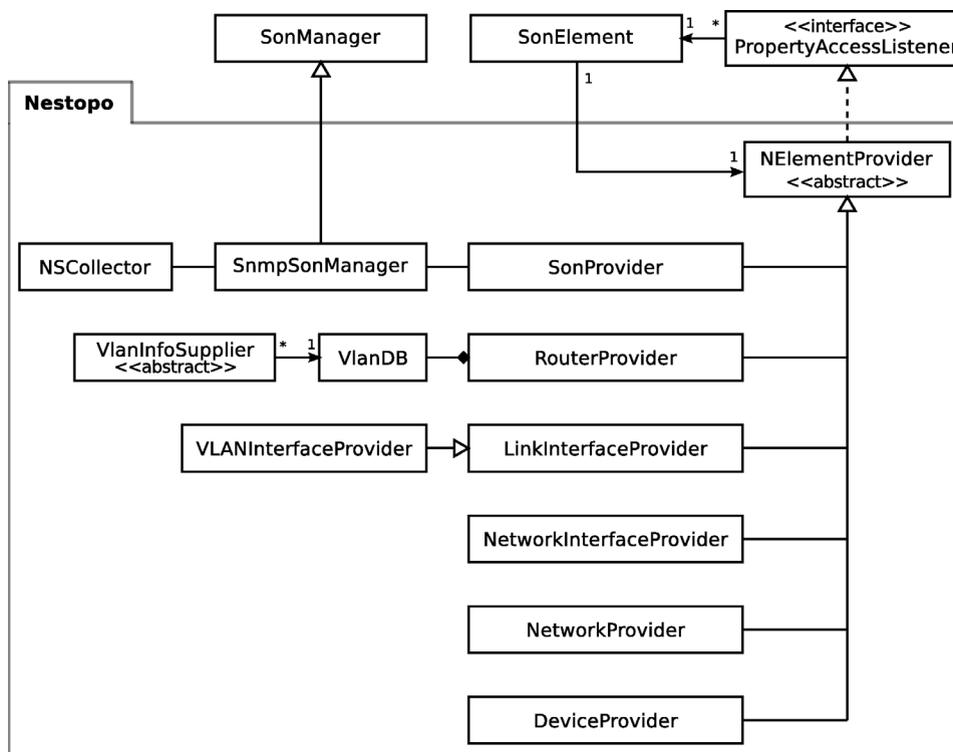


Рис. 5. UML-диаграмма классов подсистемы Nestopo

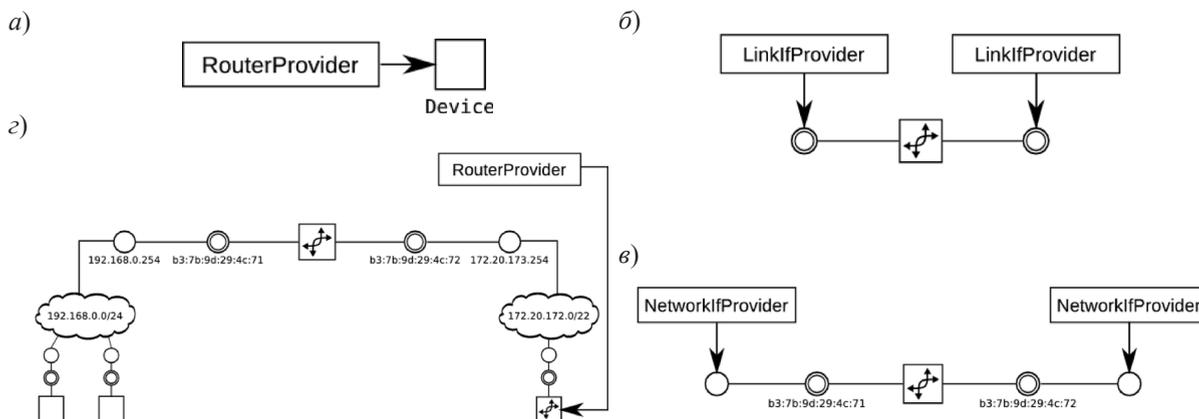


Рис. 6. Иллюстрация работы классов-провайдеров подсистемы Nestopo

Подход реализован с использованием паттернов проектирования «Издатель-Подписчик» [17] (реакция на обращение к SON-элементу) и «обращение управления» (inversion of control) [18] (выполнение построения объекта в момент обращения к нему).

Все объекты SON-модели (наследники класса SonElement) выступают в роли издателя уведомлений о событиях обращения к своим атрибутам. При создании в ходе алгоритма нового SON-элемента, создается также соответствующий провайдер (наследник класса NElementProvider), который подключается к создаваемому узлу в качестве подписчика. При получении уведомления провайдер начинает сбор данных для заполнения атрибутов SON-элемента.

Рассмотрим пример. При первом обращении к атрибутам объекта, описывающего корневой маршрутизатор (рис. 6 а), провайдер RouterProvider устанавливает SNMP-соединение, определяет значения атрибутов устройства и создает связи с пустыми узлами класса LinkInterface. На следующем этапе (рис. 6 б) провайдеры класса LinkIfProvider определяют значения атрибутов канальных интерфейсов и их связи. Далее (рис. 6 в, г) аналогичным образом строятся узлы сетевых интерфейсов, подсетей и принадлежащих им устройств.

Алгоритмы определения конфигурации VLAN маршрутизатора реализованы в наследниках абстрактного класса VlanInfoSupplier, результат их работы доступен посредством объекта класса VlanDB.

Представленная реализация позволяет обновлять БД графа Сети без полного перестроения, что позволяет вести учет изменений графа. Ак-

туальность данных в БД обеспечивается за счет периодических запусков подсистемы.

Nestopo реализована на платформе Java. Для доступа к MIB по протоколу SNMP используется библиотека SNMP4J. Для вызова процедуры обновления БД реализован интерфейс командной строки. Исходный код представлен в 42 файлах, содержит 55 классов (из них 11 анонимных), 2774 LOC.

Тестирование и эксперименты

Цель экспериментов – получение оценок времени построения графа, объема порождаемого сетевого трафика, адекватности получаемого графа. Выполнено построение графа для различных участков вычислительной сети ПетрГУ: 1) ЛВС кафедры информатики и математического обеспечения (один опрашиваемый маршрутизатор); 2) ЛВС учебных корпусов ПетрГУ (два маршрутизатора); 3) вся вычислительная сеть ПетрГУ (три маршрутизатора).

Результаты эксперимента приведены в табл. 2. В первой колонке указан номер участка сети, во второй – количество обнаруженных устройств, в третьей и четвертой – общее время работы подсистемы и время работы алгоритма построения графа Сети без учета времени, затраченного на сетевое взаимодействие и обращения к маршрутизаторам, не поддерживающим SNMP, в пятой и шестой колонках – объем сетевого трафика, потребовавшегося для получения данных от маршрутизаторов. Все построенные графы соответствовали данным системных администраторов о реальном графе Сети.

Подсистема Nestopo используется сотрудниками вычислительного центра ПетрГУ совместно

Таблица 2

**Результаты тестирования подсистемы для различных конфигураций
(Intel Xeon 2.50 ГГц, ОЗУ 1 Гб, ОС Linux 2.6.34, JRE 1.6.0_23)**

№	Количество устройств	Время выполнения, с	Время построения графа, с	Исходящий трафик, Кб	Входящий трафик, Кб
1	38	12	5,8	5,44	19,29
2	1359	47	32,6	38,97	244,05
3	1454	73	34,9	66,84	407,63

с системой обнаружения вторжений для решения задач управления безопасностью. При получении уведомления о вредоносной активности на каком-либо из узлов сети инженер обращается к ЭП Nest для получения сведений об этом узле, его местонахождении и административной принадлежности.

Представленные в статье метод организации объектной БД и алгоритм обеспечивают автоматизацию обнаружения графа сети ИКТ-инфраструктуры локальных и малых региональных поставщиков услуг Интернет и связей между ними на сетевом уровне с поддержкой базовых данных канального уровня и виртуальных сетей.

Включение объектной модели графа Сети в объектную модель архитектуры организации обеспечивает базу для совместного исследования потоков данных через аппаратные, административные и пространственные единицы организации и их агрегации.

Разработанная подсистема Nestopo обеспечивает автоматическое формирование БД графа Сети и поддержку ее в актуальном состоянии.

При изменении графа соответствующее частичное обновление БД выполняется без ее полного перестроения.

Экспериментальная эксплуатация подсистемы Nestopo показала ее хорошую производительность. Формирование БД графа Сети, содержащей более тысячи устройств, требует около одной минуты при незначительном потреблении сетевого трафика.

В будущем предполагается провести широкое экспериментальное исследование алгоритма для обоснования его надежности и эффективности на количественном уровне. Также будут предприняты усилия для получения формальной стратегии выполнения повторных запусков подсистемы, обеспечивающей актуальность БД; ЭП Nest будет опубликована в виде ПО с открытым кодом, в алгоритм предполагается включить процедуры построения графа канального уровня Сети.

Авторы благодарят М.А. Крышню за полезные идеи и обсуждения, В.А. Пономарева за системную поддержку, И.О. Суворова и И.А. Зиновика за помощь в выполнении экспериментов. Особая благодарность рецензенту, замечания которого помогли существенно улучшить качество данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cerf, V.** FIND Observer Panel Report [Электронный ресурс] / V. Cerf, B. Davie, A. Greenberg [et al.] // Tech. rep.: NSF NeTS FIND Initiative. –Apr. 2009. Режим доступа: http://www.nets-find.net/FIND_report_final.pdf
2. **Al-Shaer, E.** New Frontiers in Internet Network Management [Текст] / E. Al-Shaer, A. Greenberg, C. Kalmanek [et al.] // Computer Communication Rev. –Oct. 2009. –Vol. 39. –P. 37–39.
3. Report of NSF Workshop on Network Research Testbeds [Электронный ресурс] / –Nov. 2002. Режим доступа: http://www-net.cs.umass.edu/testbed_workshop/testbed_workshop_report_final.pdf
4. **Богоявленский, Ю.А.** Проект Nest: структурное представление системы поставщика сетевых услуг [Текст] / Ю.А. Богоявленский, М.А. Крышень, А.С. Ко-

лосов [и др.] // Матер. межвуз. конкурса-конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада «Технологии Microsoft в теории и практике программирования». –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. –С. 49–51.

5. **Claise, B.** Specification of the IP Flow Information Export (IPFIX) Protocol for the Exchange of IP Traffic Flow Information. RFC 5101 [Текст] / B. Claise. –IETF, 2008.

6. Cisco IOS NetFlow – Cisco Systems [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.cisco.com/go/netflow>

7. **Claise, B.** Network Management: Accounting and Performance Strategies [Текст] / B. Claise, R. Wolter. –Cisco Press, 2007. –P. 631.

8. **Subramanian, L.** Characterizing the Internet Hierarchy from Multiple Vantage Points [Текст] / L. Sub-

ramanian, S. Agarwal, J. Rexford [et al.] // Tech. Rep. UCB/CSD-1-1151. California: Computer Science Division (EECS) University of California Berkeley, Aug. 2001. –P. 12.

9. Proc. of USENIX INM/WREN'10 [Электронный ресурс] / –2010. Режим доступа: <http://www.usenix.org/event/inmwren10/tech/>

10. **Leist, S.** Evaluation of Current Architecture Frameworks [Текст] / S. Leist, G. Zellner // Proc. of SAC'06. –Dijon, France, 2006. –P. 1546–1553.

11. Enterprise integration – Framework for enterprise modelling. ISO 19439:2006 [Текст]. –ISO, Geneva, Switzerland, 2006.

12. **Brenner, M.** CMDB – Yet Another MIB? On Re-using Management Model Concepts in ITIL Configuration Management [Текст] / M. Brenner, M. Garschhammer, M. Sailer [et al.] // Proc. of 17th IFIP/IEEE International Workshop on Distributed Systems: Operations and Management (DSOM 06). –Springer, 2006. –P. 269–280.

13. **Siamwalla, R.** Discovering internet topology [Электронный ресурс] / R. Siamwalla, R. Sharma, S. Keshav // Режим доступа: <http://www.cs.cornell.edu/skeshav/papers/discovery.pdf>

14. **Pandey, S.** IP network topology discovery using SNMP [Текст] / S. Pandey, M.-J. Choi, S.-J. Lee [et al.] // Proc. of the 23 rd International conf. on Information Networking. –IEEE Press, 2009. –P. 33–37.

15. **Vaez-Ghaemi, R.** White Paper. Next-Generation Packet-Based Transport Networks (PTN) [Электронный ресурс] / R. Vaez-Ghaemi // Tech. rep.: JDS Uniphase Corporation, 2010. Режим доступа: <http://www.jdsu.com/ProductLiterature/next-generation-ptn-white-paper.pdf>

16. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Station and Media Access Control Connectivity Discovery. IEEE Std 802.1AB-2009 [Текст]. –IEEE, 2009.

17. **Гамма, Э.** Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования [Текст] / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон [и др.]. –СПб.: Питер, 2001. –368 с.

18. **Fowler, M.** Inversion of Control Containers and the Dependency Injection pattern [Электронный ресурс] / M. Fowler. –Режим доступа: <http://www.martinfowler.com/articles/injection.html>

ИНТЕГРАЦИЯ ГИС В КОРПОРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Практически в каждой организации, занимающейся аналитической обработкой больших объемов разнородной информации, функционирует несколько информационных систем (ИС), созданных в различное время различными разработчиками, на базе различных технологий. Каждая из этих ИС содержит собственную базу данных, в которой располагается структурированная информация, связанная с тем или иным аспектом деятельности организации.

При построении различных классов современных ИС, обрабатывающих информацию о территориально распределенных природных и техногенных объектах, необходимо наличие данных о точном местоположении объектов, их взаимном расположении и взаимосвязи. Используемая при этом информация носит преимущественно пространственный характер, она разнородна и распределена территориально, поэтому при создании современных корпоративных систем обработки информации в качестве технологической основы целесообразно использовать геоинформационные системы (ГИС), позволяющие с единых методических позиций описывать как пространственные, так и атрибутивные характеристики различных объектов, процессов и явлений.

Будучи относительно новым продуктом, ГИС внедряются в уже существующую информационную инфраструктуру организаций (предприятий), которая, как правило, уже содержит одну или несколько баз данных (БД). При этом, использование ГИС в качестве общекорпоративного информационного технологического ресурса совместно с другими более традиционными информационными ресурсами позволяет в полной мере учитывать присущую пространственной информации

географическую «природу» в уже использующихся и новых корпоративных системах обработки информации.

Характерная особенность пространственных данных, используемых в ГИС, – их относительно высокая структурированность. В отличие от обычной реляционной БД, не накладывающей никаких ограничений на структуру хранимых в ней отношений, все объекты (слои), хранящиеся в базе пространственных данных (БПД), имеют минимальный общий набор атрибутов, характеризующий их положение в пространстве, и другие геометрические характеристики (например, длину или площадь), при этом, для описания одного класса объектов, как правило, используется несколько отношений. Кроме того, географические объекты могут объединяться в тематические группы по признаку наличия между ними особых пространственных (топологии) или логических отношений, при этом структура отношений для хранения пространственных данных об объектах разных классов в значительной степени совпадает, т. к. объекты расположены в общем пространстве и имеют однотипные пространственные атрибуты.

Таким образом, для современных корпоративных систем обработки информации характерна тенденция комплексного использования разнородной (пространственной и атрибутивной) информации и, как следствие, повышение требований к интегрируемости используемых информационных систем и совершенствованию механизмов предоставления, обработки и анализа данных [1].

Важность и сложность интеграции разнородных (пространственных и атрибутивных) данных приводят к необходимости разработки новых

подходов и методов для их совместного описания. С этой целью в [2] был предложен новый способ описания больших массивов информации на основе специально введенных многомерных информационно-объектов (МИО) и операций над ними.

Основная идея данного многомерного подхода заключается в обобщении реляционного подхода, при котором несколько различных отношений с одинаковой структурой предлагается размещать в некоторый новый многомерный информационный объект.

Многомерный информационный объект обозначается как

$$T_i^n, \quad (1)$$

где T – имя МИО; n – размерность МИО; i – индекс (номер) МИО при рассмотрении совокупности МИО. МИО размерности n как единица хранения данных определяется рекурсивно через МИО меньшей размерности. МИО позволяют более компактно и удобно описывать данные на этапе логического проектирования БД и должны включать и обобщать известные информационные объекты, такие, как элемент данных, запись, файл, домен, кортеж, отношение. При этом физический смысл МИО для малых размерностей будет следующим:

T^0 – множество, состоящее из одного элемента – константы;

T^1 – множество МИО размерности ноль (T^0) (запись, вектор, домен, кортеж);

T^2 – множество МИО размерности один (T^1) и т. д.

В общем случае, T^n – множество МИО размерности $(n - 1)$:

$$T^n = \{T_i^{n-1}\}_{i=\overline{1,k}}. \quad (2)$$

Таким образом, в зависимости от размерности МИО может описывать отдельный параметр, таблицу, класс пространственных объектов или всю базу данных.

Для описания внутренней структуры МИО используется понятие схемы МИО, представляющей собой множество, значения которого задают порядок вхождения МИО размерности $n - 1$ (с учетом порядка вхождения в них МИО меньших размерностей) в МИО размерности n . В общем случае схема МИО размерности n будет определяться соотношением

$$S^n = S(T^n) = \{S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, S_n\}, \quad (3)$$

где S^n – схема МИО размерности n ; $S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, S_n$ – элементы схемы МИО размерности n .

Для реализации основных функций по обработке пространственных и атрибутивных данных, представленных в виде совокупности МИО, вводятся операции над ними: порождение, проецирование, добавление, разделение, удаление и объединение. Вид и применение этих операций существенно зависят от одинаковости структуры используемых в них МИО.

Объекты T_i^n, T_j^n считаются однотипными, если выполняется равенство:

$$S(T_i^n) = S(T_j^n), \quad (4)$$

в противном случае объекты являются разнотипными.

Для получения МИО размерности $n + 1$ из однотипных МИО размерности n вводится операция порождения:

$$T^{n+1} = \{T_i^n\} * Y_{i=\overline{1,k}}, \quad (5)$$

где множество Y задает порядок вхождения T_i^n в T^{n+1} , а $S(T^{n+1}) = \{S(T_i^n), Y\}$.

Для организации поиска хранящейся в одном МИО информации вводится операция, обратная операции порождения, которую назовем *проецированием МИО*, а результат выполнения операции проецирования назовем *проекцией исходного МИО*.

Определим проекцию МИО размерности n со схемой $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, S_n\}$ на i_0 -й элемент схемы S_n как МИО размерности $n - 1$ со схемой $\{S_1, S_2, \dots, S_{n-1}\}$, который входит под номером в совокупность порождающих МИО в (5) и обозначим

$$\Pi_{S_{n,i_0}}(T^n) = T_{i_0}^{n-1}. \quad (6)$$

Если элемент схемы S_n содержит k элементов

$$S_n = \{S_{n,1}, S_{n,2}, \dots, S_{n,i_0}, \dots, S_{n,k}\}, \quad (7)$$

то существует k проекций T^n на элементы схемы S_n

$$\Pi_{S_{n,i}}(T^n) = T_i^{n-1}, \quad i = \overline{1,k}. \quad (8)$$

Совокупность всех проекций T^n на все элементы схемы S_n будем называть *проекцией T^n на S_n* и обозначать

$$\Pi_{S_n}(T^n) = \{T_i^{n-1}\}, \quad i = \overline{1,k}. \quad (9)$$

Таким образом, проекцией МИО T^n на схему S_n является множество порождающих его T_i^{n-1} .

В процессе эксплуатации корпоративной ин-

формационной системы ее БД будет пополняться новой информацией, поэтому количество множеств T_i^{n-1} в (2) и (5) со временем, уже при существующем T^n , будет изменяться. Так как T^n определяется рекурсивно, то достаточно показать добавление к множеству $\{T_i^{n-1}\}$, $i = \overline{1, k}$ еще одного T_{k+1}^{n-1} с такой же схемой:

$$S(T_{k+1}^{n-1}) = S(T_i^{n-1}) = (S_1, S_2, \dots, S_{n-1}), i = \overline{1, k}. \quad (10)$$

Тогда операция добавления T_{k+1}^{n-1} к T^n , которую обозначим

$$T^n = T^n \cup T_{k+1}^{n-1}, \quad (11)$$

приводит лишь к изменению элемента S_n схемы

$$S^n = S(T^n) = (S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, S_n), \quad (12)$$

добавлением в него еще одного элемента S_{nk+1} .

Очевидно, что к вновь полученному по соотношению (11) МИО можно добавлять еще один T_{k+2}^{n-1} , что приведет к изменению элемента S_n из (12) еще на один элемент. Выполняя эту операцию b раз, можно к исходному T^n со схемой (12) добавить b однотипных МИО:

$$T_{k+1}^{n-1}, T_{k+2}^{n-1}, \dots, T_{k+b}^{n-1}, \quad (13)$$

тогда получим

$$T^n = T^n \cup (T_{k+1}^{n-1} \cup (T_{k+2}^{n-1} \cup \dots \cup (T_{k+b}^{n-1}) \dots)), \quad (14)$$

причем схема по-прежнему удовлетворяет (12), а элемент S_n будет иметь вид

$$S_n = (S_{n1}, S_{n2}, \dots, S_{nk}, S_{n(k+1)}, \dots, S_{n(k+b)}). \quad (15)$$

Операция добавления предназначена для формализации процедуры добавления новых данных в существующий МИО T^n . Введенная операция позволяет как добавлять в существующий T^n один T_i^{n-1} , так и объединять два однотипных объекта T_1^n и T_2^n [3]:

$$T_3^n = T_1^n \cup T_2^n, \quad (16)$$

при этом

$$S(T_3^n) = S(T_1^n) = S(T_2^n), \quad (17)$$

а последний элемент схемы результирующего МИО T_3^n является объединением последних элементов схем МИО T_1^n и T_2^n .

И, наконец, операция удаления – процедура, обратная добавлению, которая заключается в исключении из множества однотипных МИО в (2) одного МИО $T_{i_0}^{n-1}$, и уменьшения их количества на единицу, т. е. $k = k - 1$. При этом изменяется элемент S_n схемы (12) удалением из нее одного

элемента S_{i_0} . Так как порядок элементов в схеме несущественен, то для простоты обозначения будем считать, что удаляется последний элемент, т. е. $i_0 = k$. В противном случае, при удалении произвольного элемента S_{i_0} , оставшиеся просто необходимо перенумеровать. Обозначим операцию удаления

$$T^n = \frac{T^n}{T_{i_0}^{n-1}}, \quad (18)$$

так что по-прежнему

$$\begin{aligned} S(T^n) = S^n &= (S_1, S_2, \dots, S_n), \\ S_n &= (S_{n1}, S_{n2}, \dots, S_{nk-1}). \end{aligned} \quad (19)$$

Учитывая замечания, описанные в [1], можно ввести операцию удаления из T_1^n его части T_2^n :

$$T_3^n = \frac{T_1^n}{T_2^n}, \quad (20)$$

что фактически соответствует разделению одного МИО на два однотипных МИО, поэтому эту операцию в случае $b > 1$ будем называть *разделением МИО*.

Логическое описание данных предназначено для представления конечным пользователям единой связной картины обо всей информации, хранящейся в корпоративной системе обработки информации: атрибутивные и пространственные данные, метаданные. Отдельные части этой информации можно описывать в виде однотипных МИО. Объединение различных частей данных, хранящихся в различных МИО (однотипных разной размерности и разнотипных), должно быть обеспечено соответствующими операциями над ними.

МИО, включающие в себя атрибутивные данные, и МИО, включающие в себя пространственные данные, будут разнотипными как с точки зрения семантики хранимой информации, так и с точки зрения различия их схем.

Для организации совместного описания этих данных без нарушения целостности предлагается объединять хранимые в разнотипных МИО данные в один более крупный МИО.

Рассмотрим операцию объединения разнотипных МИО различных размерностей на примере конкретной предметной области – природопользовании и охране окружающей среды.

В задачах, связанных с контролем состояния природных ресурсов и охраной окружающей среды, большое значение имеет пространственная информация.

Отличительной особенностью пространственных данных, используемых в ГИС, является то, что одни и те же географические объекты могут быть представлены слоями разных типов (точечными, линейными и полигональными), в зависимости от степени детализации пространственных данных.

Точечный географический объект характеризуется парой координат X, Y . В зависимости от масштаба рассматриваемой территории, в качестве таких объектов могут рассматриваться водозабор, скважина.

Линейный географический объект характеризуется совокупностью атрибутивных характеристик линейного объекта и набором узловых точек ломаной линии, представляющей этот объект. Примеры таких объектов: реки, границы муниципальных округов, горизонтали рельефа.

Полигональный географический объект характеризуется совокупностью атрибутивных характеристик полигонального объекта и совокупностью замкнутых линий, ограничивающих его контуры. Такими объектами могут быть представлены территории, занимаемые определенной особо охраняемой природной территорией, озером, рекой или целой республикой.

В качестве примера объединения двух разнотипных МИО приведем организацию хранения информации об ежедневных данных по уровням подъема воды в реках, которые используются для построения ежедневного гидрологического бюллетеня, отражающего выход рек на пойму на текущую дату.

T_g^2 – МИО размерности 2, описывающий точечный слой с данными о расположении гидрологических постов контроля (гидропостов) (рис. а) со схемой:

$$S_g^2 = S(T_g^2) = (G, P),$$

где G – множество гидропостов; P – множество характеристик гидропоста (X, Y, Z , номер поста, класс и т. д.).

T_L^3 – МИО размерности 3, содержащий ежедневные данные об уровнях подъема воды на гидропостах за определенный промежуток времени (рис. б) со схемой

$$S_L^3 = S(T_L^3) = (G, I, D),$$

где G – множество гидропостов; I – множество полученных измерений по уровням воды; D – дата.

Так как $S_G^2 \neq S_L^3$, то T_G^2 и T_L^3 являются раз-

нотипными, их нельзя объединить в один более крупный МИО на принципах, изложенных ранее. Однако, учитывая то, что в T_G^2 и T_L^3 хранится информация об одних и тех же объектах – гидропостах, что отражается наличием в обеих схемах одного и того же элемента G , предлагается их объединить по этому общему элементу.

Структура этого нового МИО приведена на рис. в и задается множествами (элементами схем) G, P, I, D , поэтому он является МИО размерности 4, объединяющим два разнотипных МИО размерности 2 и 3, что обозначается соотношением:

$$\hat{T}_0^4 = T_G^2 \cup T_L^3, \quad (21)$$

где G – общий элемент схемы, по которому происходит объединение.

Саму процедуру получения \hat{T}_0^4 из T_G^2 и T_L^3 назовем *операцией объединения двух разнотипных МИО*.

Чтобы отличать результат объединения двух однотипных МИО от объединения двух разнотипных МИО, назовем последний *всерным МИО (ВМИО)*.

Под схемой ВМИО будем понимать множество S , задающее порядок вхождения исходных МИО в результирующий ВМИО. Считая, по-прежнему, что схема первого МИО $S_G^2 = (S_1^G, S_2^G)$, а схема второго $S_L^3 = (S_1^L, S_2^L, S_3^L)$, при этом $S_1^L = S_2^G = G$ и что G как элемент схем для T_G^2 и T_L^3 один и тот же, тогда схема \hat{T}_0^4 :

$$\hat{S}_0^4 = (S_1^G) \cup (S_2^G) \cup (S_2^L, S_3^L), \quad (22)$$

или

$$\hat{S}_0^4 = (G, P, I, D). \quad (23)$$

Заметим, что при объединении разнотипных МИО размерность результирующего ВМИО отличается от суммы размерностей исходных МИО на количество общих элементов их схем, по которым проводится объединение.

В общем случае введенная соотношениями (21)–(23) операция позволяет производить объединение двух разнотипных МИО произвольной размерности.

Объединение возможно в том случае, когда схемы объединяемых МИО содержат хотя бы один одинаковый элемент.

Пусть T^n – МИО размерности n , имеющий схему

а)

Объекты (G)	$S_{G_1}^G$	ID гидропоста	Название	...	X	Y	Z
	$S_{G_2}^G$	ID гидропоста	Название	...	X	Y	Z

T_G^2

б)

Объекты (G)	$S_{L_1}^L$	ID гидропоста	Гидропост	Уровень на 8-00	Изм. воды за сутки	Ожид. макс. уровень	Примечание
	$S_{L_2}^L$	ID гидропоста	Гидропост	Уровень на 8-00	Изм. воды за сутки	Ожид. макс. уровень	Примечание

Дата: 1, ..., 30

T_L^3

в)

Точечный слой «Гидропосты»	X	Y	Z	...	Название	ID гидропоста	Гидропост	Уровень на 8-00	Изменение воды за сутки	Ожид. макс. уровень	Примечание
	...	...	...	...	Уфа	...	Уфа	22	+6	479-630	...

	...	...	...	...	Гумбино	...	Гумбино	...	...	240-340	...

Уровни воды

Дата: 1, ..., 30

\hat{T}_0^4

Графическая интерпретация результата объединения разнотипных МИО в один всеерный МИО

$$S^{n_1} = S(T^{n_1}) = (S_1^{n_1}, S_2^{n_1}, \dots, S_{n_1}^{n_1}), \quad (24)$$

T^{n_2} – МИО размерности, имеющий схему

$$S^{n_2} = S(T^{n_2}) = (S_1^{n_2}, S_2^{n_2}, \dots, S_{n_2}^{n_2}). \quad (25)$$

Обозначим через S^k подмножество из k элементов схем S^{n_1} и S^{n_2} , входящих в оба множества (24) и (25):

$$S^k = S^{n_1} \cap S^{n_2}. \quad (26)$$

Рассмотрим три наиболее важных возможных случая для множества S^k , определяющихся значениями k : $k = 1, k = 0, k > 1$.

1. $k = 1$. Тогда $S_1^{n_1}$ и $S_2^{n_2}$ содержат только один одинаковый элемент:

$$S^k = S^{n_1} \cap S^{n_2} = S_1^k. \quad (27)$$

Будем считать, что этот единственный элемент является последним в схемах обоих операн-

дов, то есть $S_{n_1}^{n_1} = S_{n_2}^{n_2} = S_1^k$, тогда объединение T^{n_1} и T^{n_2} запишется

$$\hat{T}^{n_1 + n_2 - 1} = T^{n_1} \cup T^{n_2}, \quad (28)$$

а его схема

$$S(\hat{T}^{n_1 + n_2 - 1}) = \hat{S}^{n_1 + n_2 - 1} = S^{n_1 - 1} \cup S^k \cup S^{n_2 - 1}, \quad (29)$$

где

$$\begin{aligned} S^{n_1 - 1} &= (S_1^{n_1}, S_2^{n_1}, \dots, S_{n_1 - 1}^{n_1}), \\ S^{n_2 - 1} &= (S_1^{n_2}, S_2^{n_2}, \dots, S_{n_2 - 1}^{n_2}), \end{aligned} \quad (30)$$

или, по аналогии с (23)

$$\hat{S}^{n_1 + n_2 - 1} = (S_1^{n_1}, \dots, S_{n_1 - 1}^{n_1}, S_1^k, S_1^{n_2}, S_{n_2 - 1}^{n_2}). \quad (31)$$

2. $k > 1$, тогда S^{n_1} и S^{n_2} содержат k одинаковых элементов

$$S^k = S^{n_1} \cap S^{n_2} = (S_1^k, S_2^k, \dots, S_k^k). \quad (32)$$

Будем считать по-прежнему, что эти элементы находятся в конце схемы

$$S_{n_1 - k + i}^{n_1} = S_{n_2 - k + i}^{n_2} = S_i^k, \quad i = \overline{1, k}. \quad (33)$$

Обозначим

$$\begin{aligned} S^{n_1 - k} &= (S_1^{n_1}, S_2^{n_1}, \dots, S_{n_1 - k}^{n_1}), \\ S^{n_2 - k} &= (S_1^{n_2}, S_2^{n_2}, \dots, S_{n_2 - k}^{n_2}), \end{aligned} \quad (34)$$

тогда объединение T^{n_1} и T^{n_2} в общем случае запишется

$$\hat{T}^{n_1 + n_2 - k} = T^{n_1} \cup T^{n_2}, \quad (35)$$

а его схема

$$\begin{aligned} S(\hat{T}^{n_1 + n_2 - k}) &= \hat{S}^{n_1 + n_2 - k} = \\ &= S^{n_1 - k} \cup S^k \cup S^{n_2 - k}. \end{aligned} \quad (36)$$

или, по аналогии с (31)

$$\begin{aligned} \hat{S}^{n_1 + n_2 - k} &= (S_1^{n_1}, \dots, S_{n_1 - k}^{n_1}, S_1^k, \dots, \\ &S_k^k, S_1^{n_2}, \dots, S_{n_2 - k}^{n_2}). \end{aligned} \quad (37)$$

3. $k = 0$, тогда S^{n_1} и S^{n_2} не содержат одинаковых элементов

$$S^k = S^{n_1} \cup S^{n_2} = \{\emptyset\}. \quad (38)$$

Тогда по смыслу T^{n_1} и T^{n_2} между хранящимися в них данными нет связи и операция их объединения не имеет смысла.

Таким образом, для интеграции атрибутивных и пространственных данных в корпоративных системах обработки информации в рамках концепции многомерных информационных объектов можно

воспользоваться операцией объединения разнотипных МИО различных размерностей. Результатом такой интеграции будет «всерный» МИО.

Введенная операция объединения разнотипных МИО позволяет объединять логически взаимосвязанную атрибутивную и пространственную информацию, хранящуюся в разнотипных МИО, в единый ВМИО, с сохранением целостности данных.

Операция объединения справедлива и для множества, состоящего из произвольного числа попарно связанных разнотипных информационных объектов $T^{n_1}, T^{n_2}, \dots, T^{n_b}$ со схемами $S^{n_i} = S(T^{n_i})$, так что $S^{n_i} \neq S^{n_j}$, при $i \neq j, i, j = \overline{1, b}$.

Пусть $S^k = S^{n_i} \cap S^{n_j} \neq \{\emptyset\}, i = \overline{2, b}$. Выполняя введенную выше операцию объединения $(b - 1)$ раз, T^{n_1} можно объединить со всеми связанными с ним многомерными информационными объектами

$$\begin{aligned} \hat{T}^{n_1 + n_2 + \dots + n_b - k_2 - \dots - k_b} &= \\ &= T^{n_1} \cup T^{n_2} \cup T^{n_3} \cup \dots \cup T^{n_b}. \end{aligned} \quad (39)$$

Операция разделения МИО вводится как обратная по отношению к объединению, при этом разделение производится только по тем элементам схемы, по которым ранее было произведено объединение.

Введенный набор операций над однотипными и разнотипными МИО: порождение, проектирование, добавление, разделение, удаление и объединение позволяет осуществить ввод, рациональное хранение атрибутивных и пространственных данных в корпоративных системах обработки информации, а также организовать эффективный поиск информации по запросам пользователей. Введенный набор операций над МИО дает возможность построения на их основе языка управления данными, представленными в виде множества МИО.

Предложенный подход использовался для совместного описания пространственных и атрибутивных данных при разработке ГИС природных ресурсов и ее интеграции в автоматизированную систему поддержки принятия решений по управлению природными ресурсами и охране окружающей среды Республики Башкортостан, что позволило описать разнородную информацию о природных ресурсах в рамках единой многомерной модели данных, которая позволит в более компактной форме по сравнению с реляционной моделью данных описать предметную область.

В статье рассмотрен подход к интеграции атрибутивных и пространственных данных в корпоративных системах обработки информации на основе нового типа структур данных, который назван *многомерным информационным объектом*, при этом, с одной стороны, предлагаемый многомерный подход является развитием технологии многомерного анализа данных – OLAP, но, с другой стороны, имеет свои особенности. Проведенный анализ опубликованных работ по теме технологии многомерного анализа данных позволяет сделать следующие выводы.

В технологии OLAP на сегодняшний день отсутствует возможность компоновки и объединения объектов разнотипной структуры.

Для технологии OLAP не характерно использование разнородных данных, содержащихся внутри объекта.

В OLAP отсутствует формализованное описание (на математическом языке) операций по манипулированию данными, особенно хранящимися в различных элементах (двух «кубах») ММД.

Основные достоинства многомерного подхода, описываемого в статье:

1) ММД получили формализованное описание операций по манипулированию данными, хранящимися в различных элементах (двух «кубах») ММД, сохранив при этом все достоинства ММД, введенной Э.Коддом;

2) введенные операции над разнотипными ММО, в частности, операция объединения разнотипных ММО, позволяют описать каждый тип географического объекта в виде одного ММО, достичь общности описания слоев объектов разных типов, упростить описание структуры существующих баз данных систем обработки информации, сделать модель данных обозримой и понятной.

Из сказанного выше следует основное отличие технологии OLAP от разработанного многомерного подхода, которое заключается в следующем: OLAP в большей степени ориентирован на обеспечение максимальной эффективности для приложений оперативной аналитической обработки информации, в то время как ММО в большей мере используется для логического описания разнородных (пространственных и атрибутивных) данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, С.В. Интеграция геоинформационных систем в корпоративные информационные системы крупных предприятий и организаций [Текст] / С.В. Павлов, Р.З. Хамитов, О.И. Христовуло // Вестник УГАТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – Уфа: Изд-во Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та, 2007. – Т.9. – № 2(20). – С. 50–57.
2. Gvozdev, V.E. Multidimensional Data Bases of

Earth Surface Conditions [Текст] / V.E. Gvozdev, O.I. Khristodulo, S.V. Pavlov // Proc. of the the 46th International Astronautical Congress. – Oslo, Norway. – 1995. – P. 28.

3. Гвоздев, В.Е. Информационное обеспечение контроля и управления состоянием природно-технических систем: Учеб. пособие [Текст] / В.Е. Гвоздев, С.В. Павлов, И.У. Ямалов. – Уфа: Изд-во Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та, 2002. – 138 с.

УДК 621.321

И.С. Наумов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСАМИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Масштабы чрезвычайных ситуаций (ЧС) неуклонно растут, что заставляет обоснованно и своевременно вырабатывать контрмеры для предупреждения и ликвидации ЧС. Для этого создаются системы управления в условиях чрезвычайных ситуаций [1].

Для устойчивого развития любого предприятия и страны в целом необходимо принятие мер по сокращению ущерба, причиняемого ЧС, и количества ресурсов, используемых при его предупреждении и ликвидации. Эти меры должны опираться на теорию анализа и управления риском.

К сожалению, общество еще не овладело в достаточной степени механизмом управления столь большими системами, как «природа – техносфера – общество». Разноплановые задачи, которые должны решаться в интересах управления риском, опираются на такие наукоемкие сферы, как физические механизмы развития аварийных ситуаций и аварий, формирования опасных природных явлений, модели и методы прогноза силы, времени и места их возникновения, способы предотвращения их возникновения, снижения силы или смягчения последствий ЧС, экономические исследования, методы оптимального планирования.

Развитие системы предупреждения об опасных явлениях, способов уменьшения опасности и смягчения последствий ЧС считается одной из приоритетных областей деятельности на всех уровнях – международном, государственном, региональном и местном. Однако опасные природные и техногенные явления как источник чрезвычайных ситуаций могут прогнозироваться лишь на очень малых с точки зрения проведения превентивных мероприятий временных интервалах. Это приводит к необходимости использования в качестве исходных данных частот этих событий. Важное место в снижении риска техногенных ЧС занимают диагностика и профилактика возможных отказов объектов техносферы (планово-предупредительные мероприятия).

Необходимо совершенствование систем управления, ориентированных на локализацию и ликвидацию ЧС. Это совершенствование может обеспечиваться следующими параметрами: обоснованием производительности оборудования; обоснованием средств, необходимых для содержания личного состава и их оснащения средствами; обоснованием структуры систем локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Эффективный превентивный план формируется на основе оптимального распределения ресурсов, сил и средств, необходимых для реализации мероприятий с целью максимально возможного блокирования ЧС [2].

Основными критериями формирования оптимального превентивного плана по предупреждению и ликвидации последствий ЧС являются минимум ущерба, минимум общих затрат на реализацию превентивных мероприятий, минимум общего времени реализации оперативных мероприятий по ликвидации ЧС и ее последствий. В качестве ограничений используются ограничения

на общие объемы ресурсов, сил и средств, выделенных для реализации мероприятий, на наличие необходимых сил и средств в пунктах их дислокации, структурные ограничения на связи ЧС и проводимых мероприятий и др.

Первоочередные задачи в системе управления ЧС заключаются в нахождении оптимального (рационального) распределения имеющегося персонала и оборудования по объектам, на которых возникли ЧС, а также в определении необходимого состава персонала и оборудования и их количества для достижения поставленных целей.

Применение нормативных методов для решения задач такого класса может быть достаточно успешным.

Для разработки модели оценивания влияния значений параметров системы обеспечения ресурсами на результаты ликвидации ЧС необходимо определить взаимоотношение основных параметров системы, которое позволит осуществить математические постановки задач оптимизации параметров системы обеспечения ресурсами.

Рассмотрим систему, состоящую из N пространственно распределенных объектов, на которых с вероятностью $P_i (i = \overline{1, N})$, могут возникнуть чрезвычайные ситуации.

Чрезвычайная ситуация на i – объекте может быть локализована и ликвидирована в течение времени τ_i . В течение времени $\tau^{\max} = \max\{\tau_i\}$ возможно, одновременное развитие ЧС на множестве объектов $\{\Omega\}$ с вероятностью P^Ω . Имеется дорожная сеть, соединяющая объекты. Для локализации и ликвидации ЧС выделены ограниченные финансовые средства C_Σ , на которые для i -х объектов можно закупить x_{ij} ресурсов из V типов агрегатов, отличающихся по стоимости ($C_j, j = \overline{1, V}$) и производительности τ_j . Чрезвычайную ситуацию на i -м предприятии можно локализовать в течение времени τ_i , причем, чем позже начинаются мероприятия по локализации ЧС ($\tau_i = \tau_i - \tau_i^{\text{начала}}$) (при одной и той же производительности оборудования и одинаковом их количестве), тем больше будет ущерб от ЧС. Количество агрегатов, которые одновременно можно использовать на объекте для локализации ЧС, ограничено (x_i^{\max}).

Необходимо определить рациональную величину средств (C_Σ), оптимальный состав и количество агрегатов и их оптимальное распределение между объектами, обеспечивающее минимальный ущерб от ЧС, если общий ущерб от ЧС на i объектах равен сумме ущербов на каждом из i объектов.

В связи с тем, что ущерб от чрезвычайных ситуаций на объектах равен сумме ущербов на каждом объекте, финансовые средства, выделенные на локализацию и ликвидацию ЧС, равны сумме средств, выделенных для каждого объекта [3].

Закон распределения вероятности возникновения ЧС на i объектах в течение времени τ^{\max} равен i -кратной свертке законов распределений.

Предположим, что предотвращаемый ущерб от чрезвычайных ситуаций пропорционален производительности и располагаемому времени ликвидации ЧС, но т. к. одновременно возможно применение ограниченного количества агрегатов и располагаемое время ограничено, то предотвращаемый ущерб ограничен.

Для математической постановки задач оптимизации необходимо определить переменные, взаимосвязь которых рассматривается в модели.

Количество пространственно распределенных объектов N зависит от соотношения времени движения и располагаемого времени.

Граф дорожной сети $G(L, K)$ задается матрицей инцидентий $\|\tau_{(l,k)}^G\|$; $l \in L$; $k \in K$; $i = \overline{1, N}$; $k = \overline{1, N}$ (матрицей времени движения), значения параметров дуг определяют время движения по этой дуге и измеряются в единицах времени.

Матрица времени движения определяется из соотношения расстояния до объекта и скорости движения средств доставки ресурсов, обеспечивающих ликвидацию ЧС на объекте.

Матрица вероятностей ЧС на объектах $\|P_i\|$ определяется расчетным методом и уточняется по результатам эксплуатации аналогичных объектов.

С учетом допущения о том, что предотвра-

щаемый ущерб пропорционален времени использования ресурсов, а общая производительность предотвращения ущерба равна сумме производительностей отдельных ресурсов, то общий предотвращаемый ущерб равен:

$$U_i = \sum_j x_{ij} \pi_j \tau_i$$

Производительность j ресурсов на i -м объекте равна:

$$\Pi_i = \sum_j x_{ij} \pi_j$$

где $\|U_i\|$ – матрица ущербов от чрезвычайных ситуаций на объектах (определяется расчетным методом и уточняется по результатам ущербов от ЧС на аналогичных объектах, измеряется в денежных единицах); $\|x_{ij}\|$ – матрица количества агрегатов j -го типа; $\|\pi_i\|$ – матрица производительностей агрегата j -го типа (измеряется в ед. стоимости в ед. времени); $\|\tau_i\|$ – интервал времени развития процесса ЧС, в течение которого еще можно ликвидировать ЧС на i -м объекте и предотвратить максимальный ущерб (требуемое время). По истечении этого времени, что-либо делать поздно, можно лишь ликвидировать последствия [4].

Если располагаемое время меньше требуемого времени (оно зависит от производительности и допустимого ущерба), то на объектах необходимо стремиться к размещению части ресурсов, которые уменьшают скорость развития ЧС. Прибытие ресурсов с центральной базы и объектов, на которых в течение до τ_{\max} не может возникнуть чрезвычайная ситуация, позволяет обеспечить требуемую эффективность функционирования системы. В этом случае непредотвращенный ущерб:

$$U_i^\Sigma = \sum_{i \in \{\Omega\}} U_i^\Sigma \rightarrow \min;$$

$$U_i^\Sigma = U_i^{\max} - \left[\sum_{j=1}^V x_{ij} \pi_j \tau_i + \sum_{\substack{\forall k: k \neq i \\ \forall k: k \notin \{\Omega\} \\ \forall k: \tau_{iBk} < \tau_i}} \sum_{j=1}^V x_{kj} \pi_j (\tau_i - \tau_{iBk}) + \sum_{j=1}^V x_i \pi_j (\tau_i - \tau_{iBj}) \right],$$

где U_i^{\max} – максимальный ущерб на i -м объекте в результате ЧС; V – количество типов ресурсов для ликвидации ЧС.

Стоимость ресурсов для ликвидации ЧС на i -м объекте выражается суммарной стоимостью ресурсов всех типов:

$$C_i = \sum_j C_j x_{ij}$$

где $\|C_j\|$ – матрица стоимостей j -го типа ресурса, $j = \overline{1, L}$. Возможны однотипные ресурсы, но отличающиеся по стоимости (различные фирмы, различная производительность, надежность и т. п.); $\|X_i^{\max}\|$ – матрица, определяющая максимальное количество ресурсов, которое можно использовать на i -м объекте. Ограничение вызвано

тем, что ограничены площади для размещения ресурсов на объекте. Этот параметр измеряется в штуках.

Проведенная детализация позволяет перейти к решению задачи.

Необходимо провести предварительную оценку общих затрат на систему обеспечения ресурсами. Это обеспечивает исходную информационную основу для последующей оптимизации параметров системы. Для этого оценивается средний суммарный возможный ущерб от чрезвычайной ситуации при отсутствии обеспечения ресурсами процесса ее ликвидации. Выражение этого ущерба сопоставляется с объективными потребностями в ресурсах на предотвращение ожидаемого ущерба. Полученное выражение потребности в ресурсах приводится к форме затрат на их приобретение. Решение этой задачи не требует использования сложных формальных методов и базируется на известных моделях развития ЧС, применяемых в отношении конкретных промышленных объектов, данные о которых могут определяться по паспортам этих объектов. Кроме того, используются известные сведения о затратах на приобретение и ввод в эксплуатацию всех доступных видов ресурсов, а также об их производительности. Эти сведения могут быть конкретизированы для объектов, т. к. производительность и стоимость размещения ресурсов на различных объектах может

различаться. Полученные результаты становятся информационной основой для выработки решений об определении размера бюджетного финансирования на создание или совершенствование системы ликвидации ЧС и позволяют выработать предварительное заключение о степени совершенства существующей системы.

Реализация следующих этапов возможна только с использованием моделей и постановок задач, конкретизированных для каждой формы выбора оптимальных управляющих воздействий на структуру и параметры функционирования системы обеспечения ресурсами. В частности, необходимо определить целесообразные типы ресурсов и их количество, что требует конкретизации модели и постановки задачи для осуществления такого выбора.

При такой системе ликвидации ЧС можно с тем же объемом ресурсов обеспечить более низкий ущерб от ЧС, по сравнению с системой, у которой ресурсы распределены по объектам.

Таким образом, при разработке математических моделей для синтеза и оценки результатов функционирования системы обеспечения ресурсами требуется учитывать динамическую взаимосвязь параметров развития ЧС, ограничений на параметры элементов системы обеспечения запасами, характеристик района функционирования системы обеспечения запасами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Региональные проблемы безопасности с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф [Текст]. –М.: МГФ «Знание», 1999. –672 с.

2. Махутов, Н.А. Анализ и управление безопасностью технических объектов на основе концепции рисков. Управление рисками, промышленная безопасность, контроль и мониторинг [Текст] / Н.А. Махутов. –М.: Изд-во

Науч.-пром. союза «РИСКОМ», 2010. –С. 2–5.

3. Порфирьев, Б.Н. Организация управления в чрезвычайных ситуациях [Текст] / Б.Н. Порфирьев. –М.: Знание, 1989. –57 с.

4. Концепция создания Единой автоматизированной системы антикризисного управления жизнедеятельностью государства в условиях повседневной деятельности, предупреждения и ликвидации ЧС [Текст]. –М.: МЧС, 2008. –137 с.

УДК 621.396.667

Л.Г. Доросинский, С.П. Литвиненко

СОВМЕСТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛА

Проблеме синтеза эффективного алгоритма совместного измерения угловых координат не-

скольких источников излучения с использованием адаптивных антенных решеток посвящено

большое количество работ, в которых задача решается детерминистским способом [1], путем анализа алгебраических свойств пространственной корреляционной матрицы [2], статистическими методами [3, 4] и т. д. Предлагаемые алгоритмы, как правило, оказываются достаточно сложными, что связано либо с чрезвычайно большим перебором допустимых вариантов решения, либо с громоздкими матричными вычислениями.

В данной статье рассматривается алгоритм многомерной оценки угловых координат, реализующий многоканальную (по числу пеленгуемых источников) итеративную процедуру измерения по методу максимального правдоподобия и отличающийся сравнительно несложной технической реализацией.

Предположим, что наблюдение поля сигналов и помех производится эквидистантной антенной решеткой, длина которой L , а число приемных элементов M . При N источниках сигналов, находящихся в дальней зоне приемной антенны и отличающихся своими комплексными амплитудами A_n и угловыми направлениями Θ_n ($n = 1, N$), вектор комплексных амплитуд в элементах решетки может быть представлен в виде

$$Y = \sum_{n=1}^N A_n X(\mu_n) + N, \quad (1)$$

где $X(\mu_n) = \|X_i(\mu_n)\| = \left\| \exp \left[i \frac{2\pi}{M-1} i \mu_n \right] \right\|$; $\mu_n = \frac{L}{\lambda} \sin \Theta_n$ – нормированная угловая координата n -го источника (λ – длина волны); N – вектор комплексных амплитуд помехи в элементах антенны.

Считая амплитуды и угловые координаты источников неслучайными неизвестными величинами, помеху гауссовой с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей $R = M\{NN^*\}$, запишем функцию правдоподобия для неизвестных параметров сигналов A_n и μ_n ($n = 1, N$):

$$P\{Y / A_1, \dots, A_N; \mu_1, \dots, \mu_N\} = \text{const} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[Y - \sum A_n X(\mu_n) \right]^* \times \right. \quad (2)$$

$$\left. \times R^{-1} \left[Y - \sum A_n X(\mu_n) \right] \right\},$$

где * – знак эрмитова сопряжения.

Преобразуем показатель (2) таким образом, чтобы выделить член, зависящий от амплитуды и угловой координаты только одного, например, m -го источника:

$$L_m = \frac{1}{2} |A_m|^2 X^*(\mu_m) R^{-1} X(\mu_m) - A_m Y_m^* R^{-1} X(\mu_m) + F_m(A_1, \dots, A_{m-1}, A_{m+1}, \dots, A_N; \mu_1, \dots, \mu_{m-1}, \mu_{m+1}, \dots, \mu_N), \quad (3)$$

где $Y_m = Y - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N A_n X(\mu_n)$; (4)

$F_m(\bullet)$ – функция, не зависящая от A_m и μ_m .

Для определения оценок максимального правдоподобия амплитуды A и угловой координаты μ m -го источника сигнала необходимо отыскать минимум выражения (3) по названным переменным. Преобразовав (3) к виду

$$L_m = X^*(\mu_m) R^{-1} X(\mu_m) \left| A_m - \frac{Y_m^* R^{-1} X(\mu_m)}{X^*(\mu_m) R^{-1} X(\mu_m)} \right|^2 - \frac{|Y_m^* R^{-1} X(\mu_m)|^2}{X^*(\mu_m) R^{-1} X(\mu_m)} + F_m, \quad (5)$$

замечаем, что L_m имеет минимальное значение при условии:

$$\hat{A}_m = Y_m^* R^{-1} X(\mu_m) / [X^*(\mu_m) R^{-1} X(\mu_m)]. \quad (6)$$

Подставляя найденную оценку амплитуды (6) в выражение (3) и дифференцируя по μ_m , получаем уравнение правдоподобия для оценки углового направления:

$$\text{Re} \left\{ \frac{Y_m^* R^{-1} V X(\mu_m)}{Y_m^* R^{-1} X(\mu_m)} \right\} \Big|_{\mu_m = \hat{\mu}_m} = 0, \quad (7)$$

где $V = 2\pi j / (M-1) \text{diag}(1, 2, \dots, M)$ – диагональная матрица.

Уравнение (7) легко решается численными методами, либо разложением (7) в степенной ряд в окрестности оцениваемого значения.

Оценки параметров других сигналов находятся аналогично, причем для вычисления (4) перед оценкой m -го сигнала по формулам (6), (7) используются соответствующие оценки всех остальных $N-1$ сигналов с целью компенсации (4) во входных данных m -го канала измерения.

Структурная схема оптимального алгоритма (рис. 1) состоит из N перекрестно связанных каналов, в каждом из которых производится вычитание оценок мешающих сигналов, полученных в соседних каналах, измерение параметров A и μ , формирование оценки $A X(\mu)$ «своего» сигнала, которая используется для соответствующей компенсации в других каналах.

Эффективность алгоритма исследовалась методом статистического моделирования на при-

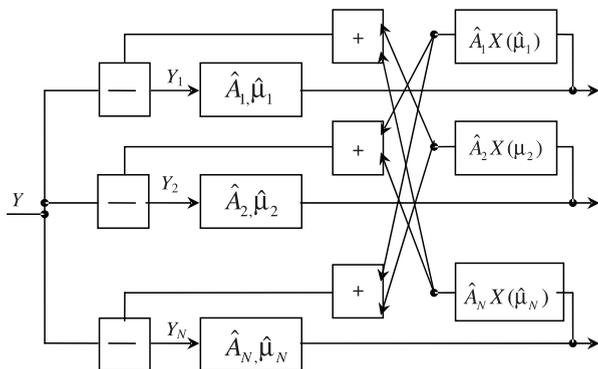


Рис. 1. Структурная схема оптимального алгоритма

мере решения задачи измерения координат двух источников с угловыми направлениями $\mu_1 = 0,2$ и $\mu_2 = -0,2$, что соответствует их разнесению на 0,23 ширины диаграммы направленности антенной решетки по нулям (рис. 2). В качестве начальных условий задавались значения $\mu_{0,1} = \pm 0,1$ (кривая 1), $\mu_{0,2} = \pm 0,05$ (кривая 2), $\mu_{0,2} = \pm 0,01$ (кривая 3). Шумы в элементах решетки некоррелированы. Отношение амплитуды сигнала к СКО шума 20 дБ. Оценки координат сходятся к истинным после 15...20 итераций при отличии задан-

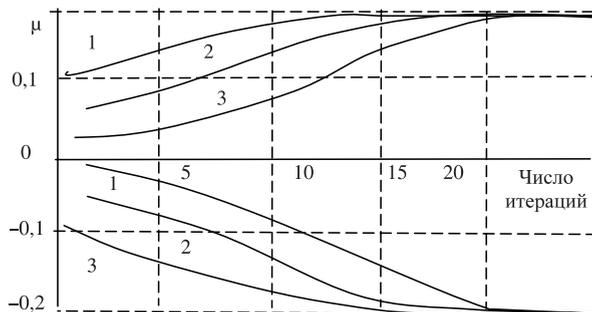


Рис. 2. Измерение координат двух источников излучения

ных значений координат от начальных условий алгоритма в 10 и более раз.

Таким образом, даже в тех случаях, когда сигналы не разрешаются по углу (в смысле рэлеевского критерия) при отношениях сигнал/шум, несущественно превышающих порог обнаружения, рассматриваемый алгоритм позволяет производить совместное измерение угловых координат при низких требованиях к точности установки начальных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фалькович, С.Е. Разрешение неизвестного числа сигналов [Текст] / С.Е. Фалькович, А.И. Коновалов // Радиотехника и электроника. –1982. –Т. 27. –№ 1. –С. 92–98.
2. Доманов, Ю.А. Оценка угловых координат нескольких источников сигналов из алгебраических свойств матрицы взаимных корреляционных моментов сигналов на выходах приемных элементов антенной решетки [Текст] / Ю.А. Доманов, Д.В. Коробко, Б.Н.

- Таурочинский //Радиотехника и электроника. –1985. –Т. 30. –№ 7. –С. 1362–1369.
3. Шинаков, Ю.С. Совместное обнаружение и разрешение неизвестного числа сигналов [Текст]/ Ю.С. Шинаков //Радиотехника и электроника. –1985. –Т. 30. –№ 6. –С. 1131–1139.
4. Davis, R.C. Angle estimation with adaptive arrays in external noise fields [Текст] / R.C. Davis, L.E. Brennan, L.S. Reed//IEEE Trans. –Vol. AES-12. –№ 2.

ОПТИМАЛЬНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Широкополосные сигналы давно и успешно применяются в системах подвижной связи и беспроводного доступа, в фиксированной и спутниковой связи, навигации и других областях радиотехники. К достоинствам этих сигналов относятся высокая степень достоверности передачи информации в условиях многолучевого распространения радиоволн и возможность получения ансамбля широкополосных сигналов, занимающих общую полосу частот. Если взаимнокорреляционные функции таких сигналов имеют незначительный уровень, то они могут одновременно передаваться в одной и той же полосе без значительных взаимных помех.

Для узкополосных сигналов проблема приема сигналов в условиях помех решается путем подстройки весовых коэффициентов в каналах обработки адаптивной антенной решеткой (ААР) [1–3]. Однако для широкополосных полезного и помеховых сигналов весовые коэффициенты, обеспечивающие подавление помех на некоторой частоте ω_1 , не будут таковыми на частоте ω_2 , т. к. «нули» диаграммы направленности антенной решетки смещаются или исчезают при изменении частоты. Таким образом, сложность пространственной обработки широкополосных сигналов заключается в том, что формирование «нуля» диаграммы направленности в заданном направлении приходится реализовывать в требуемом спектре частот, в котором производится обработка полезного сигнала или действует помеха.

В [1] рассматривается способ обработки широкополосных сигналов в присутствии широкополосных помех на основе многоотводных линий задержки. Однако вопросы выбора весовых коэффициентов в каналах обработки не рассматри-

ваются. Кроме того, отсутствуют соотношения, описывающие взаимосвязь получаемого решения с параметрами антенной решетки и сигнально-помеховой обстановки. В [2] также рассматривается проблема обработки широкополосных сигналов в условиях помех. Предлагается идея разделения сигнала на частотные составляющие с дальнейшей их обработкой. При этом в работе приведены обобщенные соотношения только для «прямоугольного» спектра мощности помехи. В [4] спектр широкополосного сигнала также предлагается разделить на частотные составляющие, но обработке уже подлежит только та составляющая, в которой сконцентрирована максимальная мощность принимаемого сигнала. Однако если спектр полезного сигнала и спектр помехового сигнала распределены равномерно во всей полосе частот, то выделить такую составляющую достаточно сложно, что делает данный метод неэффективным.

Таким образом, анализ научной литературы, посвященной обработке сигналов в адаптивных антенных решетках, показал, что теоретические вопросы оптимальной пространственной обработки сигналов в присутствии широкополосных помех высокой мощности требуют своего дальнейшего развития.

Цель статьи – исследование точности восстановления спектра широкополосного полезного сигнала, принимаемого в совокупности с помеховыми сигналами с различным спектром при различных методах пространственной обработки.

Рассмотрим N -элементную ААР с известной геометрией излучающего раскрытия, обеспечивающую прием широкополосного полезного сигнала в присутствии L широкополосных помех. Направ-

ление прихода θ_0, φ_0 и спектр полезного сигнала $C_0(\omega)$ являются известными, аналогичные параметры помеховых сигналов – неизвестными. Требуется определить совокупность весовых коэффициентов W в каналах ААР, обеспечивающих оптимальное подавление помеховых сигналов в соответствии с критерием минимизации среднеквадратической ошибки [1].

На основе формулировки критерия оптимальной обработки узкополосного сигнала по минимуму среднеквадратической ошибки [1] сформулируем аналогичный критерий для широкополосного сигнала в следующем виде:

$$\varepsilon^2 = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \left| C_0(\omega) - \sum_{l=1}^L W^T(\omega) X(\omega) \right|^2 d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |C_0(\omega)|^2 d\omega}, \quad (1)$$

где $C_0(\omega)$ – спектр полезного сигнала; $X(\omega)$ – спектр суперпозиции сигналов на выходах излучателей; $W(\omega)$ – вектор весовых коэффициентов в каналах обработки антенной решеткой; ω_1, ω_2 – границы полосы частот, в которой обрабатывается полезный сигнал.

Данное соотношение определяет точность восстановления спектра сигнала, принимаемого при наличии помех. Интеграл (1) принимает минимальное значение, когда подынтегральное выражение в числителе принимает минимальные значения на каждой частоте в полосе $\omega \in [\omega_1, \omega_2]$.

С учетом данного утверждения на основании результатов работ [1–3] оптимальная частотная зависимость весовых коэффициентов может быть представлена в виде

$$W_{\text{опт}}(\omega) = M^{-1}(\omega) S_0^*(\omega), \quad (2)$$

где $M^{-1}(\omega)$ – частотно-зависимая обратная ковариационная матрица помеховых сигналов; $S_0(\omega) = \exp(-i\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}(x_n \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + y_n \sin \theta_0 \times \sin \varphi_0))$ – управляющий вектор, обеспечивающий формирование заданной ДН в требуемой полосе частот; ε_0, μ_0 – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства; θ_0, φ_0 – углы направления прихода полезного сигнала; x_n, y_n – координаты n -го элемента антенной решетки.

При использовании классического метода синфазного суммирования сигналов излучателей с заданным амплитудным распределением весовые коэффициенты определяются зависимостью

$$W_{\text{опт}}(\omega) = S_0^*(\omega).$$

Для определения частотной зависимости оптимального вектора весовых коэффициентов представим соотношение для частотно-зависимой ковариационной матрицы помеховых сигналов в виде:

$$M(\omega) = \sigma^2 E + \sum_{l=1}^L |C_l(\omega)|^2 U_l^*(\omega) U_l^T(\omega), \quad (3)$$

где σ^2 – мощность тепловых шумов антенной решетки; $C_l(\omega)$ – спектр l -го помехового сигнала, $l = 1, \dots, L$; $U_l(\omega) = \exp(-i\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}(x_n \sin \theta_l \cos \varphi_l + y_n \sin \theta_l \sin \varphi_l))$ – вектор-столбец, элементами которого являются комплексные множители, учитывающие фазовый набег на каждом элементе антенной решетки.

Тогда обратная частотно-зависимая ковариационная матрица записывается так [1]:

$$M^{-1}(\omega) = \frac{1}{\sigma^2} \left(E - \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^L \alpha_{lp}(\omega) U_l^*(\omega) U_p^T(\omega) \right). \quad (4)$$

В соотношении (4) известны все члены за исключением частотно-зависимых коэффициентов $\alpha_{lp}(\omega)$, которые можно найти, используя свойства матриц [5]:

$$M(\omega) M^{-1}(\omega) = E. \quad (5)$$

Выражение для частотно-зависимого вектора весовых коэффициентов в этом случае после проведения математических преобразований с учетом соотношений для векторов $S_0(\omega)$ и $U_l(\omega)$ имеет вид:

$$W(\omega) = \frac{1}{\sigma^2} \left(E - \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^L \alpha_{lp}(\omega) U_l^*(\omega) U_p^T(\omega) \right) S_0^*(\omega). \quad (6)$$

Исследование возникающих закономерностей проведем на примере антенной решетки с круговым раскрытием из $N = 117$ излучателей, расположенных в узлах гексагональной сетки с шагом $0,65\lambda$ (λ – длина волны, соответствующая средней частоте диапазона полезного сигнала). Рассматривается прием полезного сигнала, представляющего собой 13-позиционную посылку на основе кода Баркера, приходящего с направления $\theta_0 = 0^\circ, \varphi_0 = 0^\circ$ в присутствии одного помехового сигнала. Полоса частот спектра полезного сигнала имеет границы $\omega_1, \omega_2 = 4,2\omega_1$. Модель помехового сигнала определяется направлением прихода $\theta_1 = 22^\circ, \varphi_1 = 90^\circ$ и спектром вида

$$C_1(\omega) = \begin{cases} 10^3, & \omega_1 < \omega < \omega_2, \\ 0, & \omega < \omega_1 \text{ и } \omega_2 < \omega, \end{cases}$$

$$C_1(\omega) = \begin{cases} 10^3, & 1,4\omega_1 < \omega < 2,8\omega_1, \\ 0, & \omega < 1,4\omega_1 \text{ и } 2,8\omega_1 < \omega, \end{cases}$$

$$C_1(\omega) = \begin{cases} 10^3, & \omega_1 < \omega < 1,4\omega_1 \text{ и } 2,8\omega_1 < \omega < \omega_2, \\ 0, & \omega < \omega_1, 1,4\omega_1 < \omega < 2,8\omega_1, \omega_2 < \omega. \end{cases}$$

Графики восстановленного после обработки спектра полезного сигнала, соответствующие данным сигнально-помеховым ситуациям, приведены на рис. 1–3 (пунктирная кривая – спектр сигнала в отсутствие помехи, сплошная – после обработки восстановления при наличии помехи). Во всех случаях на рисунках с индексом *a* показан восстановленный спектр сигнала при оптимальной обработке, на рисунках с индексом *б* – восстановление спектра сигнала с использованием классического метода пространственной обработки.

На рис. 1 представлены результаты моделирования восстановления спектра полезного сигнала при воздействии широкополосной помехи, мощность которой больше мощности полезного

сигнала на 40 дБ. При этом точность восстановления спектра составляет при использовании адаптивного и классического методов обработки $1,4 \cdot 10^{-3}$ и 0,066 соответственно. Среднеквадратическое отклонение восстановленного спектра от спектра полезного сигнала при действии помехи с узкополосным спектром, мощность которой на 43 дБ превосходит мощность полезного сигнала (рис. 2), составляет $1,3 \cdot 10^{-4}$ и 0,02. Точность восстановления спектра сигнала при действии помехи со спектром с провалом в центре, мощность которой на 42 дБ превосходит мощность полезного сигнала (рис. 3), составляет $4,4 \cdot 10^{-4}$ и 0,012.

Таким образом, результаты выполненного моделирования показывают, что точность восстановления спектра полезного сигнала при использовании адаптивного и классического методов обработки составляет $1,4 \cdot 10^{-3}$ и 0,066, соответственно, в случае первой сигнально-помеховой обстановки, $1,3 \cdot 10^{-4}$ и 0,02 – в случае второй

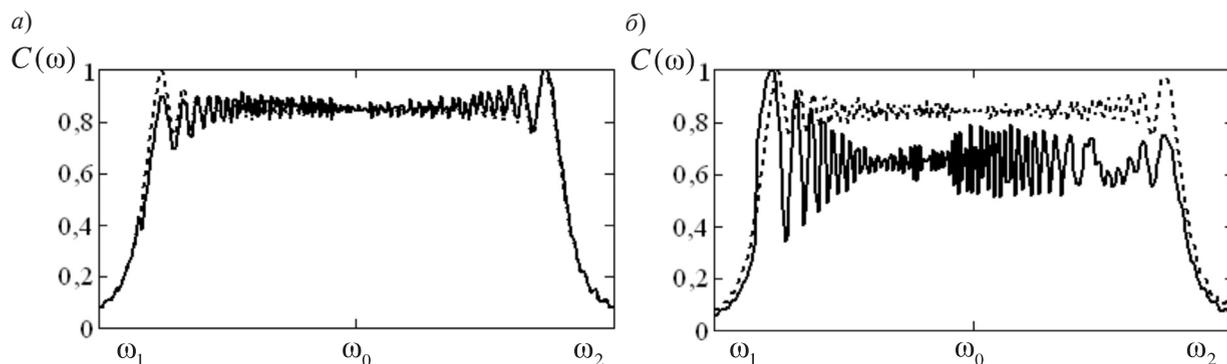


Рис. 1. Восстановление спектра сигнала при действии помехи со сплошным спектром, мощность которой на 40 дБ превосходит мощность полезного сигнала

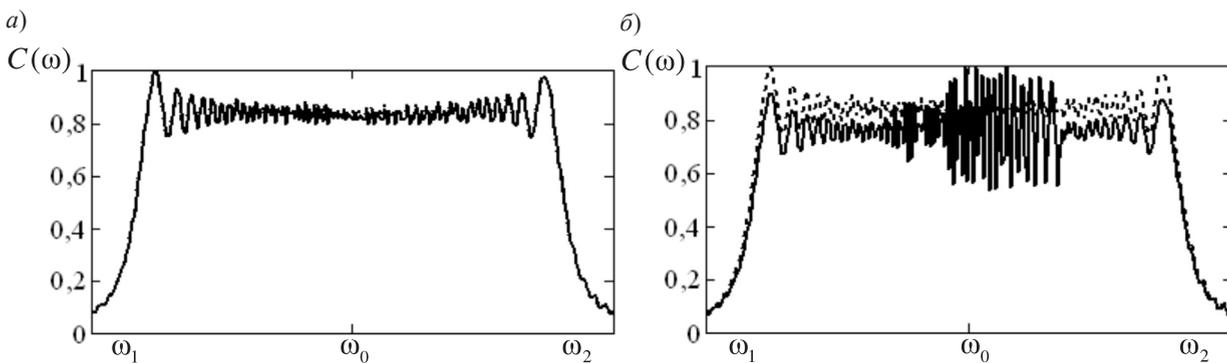


Рис. 2. Восстановление спектра сигнала при действии помехи с узкополосным спектром, мощность которой на 43 дБ превосходит мощность полезного сигнала

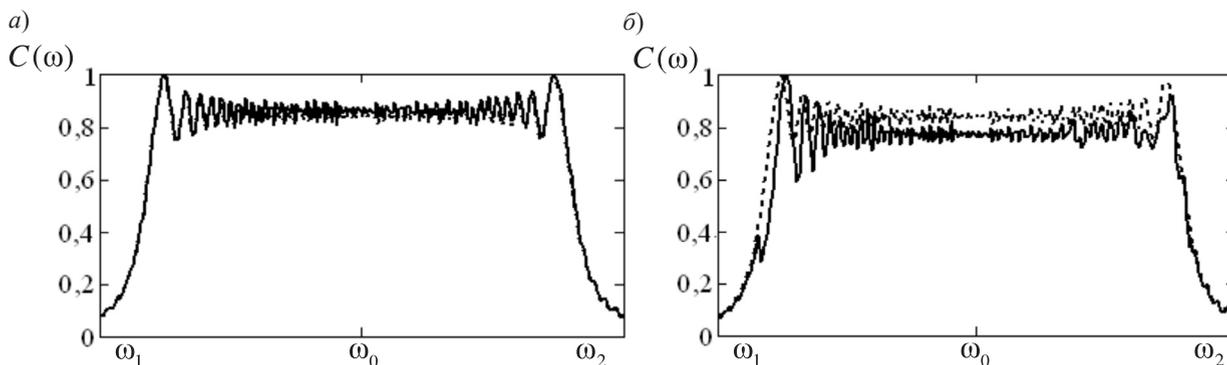


Рис. 3. Восстановление спектра сигнала при действии помехи со спектром с провалом в центре, мощность которой на 42 дБ превосходит мощность полезного сигнала

сигнально-помеховой обстановки, $4,4 \cdot 10^{-4}$ и 0,012 – в случае третьей сигнально-помеховой обстановки. Предложенная оптимальная пространственная обработка широкополосных сигналов в адаптивных антенных решетках позволя-

ет уменьшить среднеквадратическое отклонение восстановленного спектра от спектра полезного сигнала в зависимости от сигнально-помеховой обстановки по сравнению с классическим методом в 47, 153 и 27 раз соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монзинго, Р.А. Адаптивные антенные решетки [Текст]/ Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер. –М.: Радио и связь, 1986. –448 с.
2. Пистолькорс, А.А. Введение в теорию адаптивных антенн [Текст]/ А.А. Пистолькорс, О.С. Литвинов. –М.: Наука, 1991. –200 с.
3. Журавлёв, А.К. Обработка сигналов в адаптивных антенных решетках [Текст] / А.К. Журавлёв, А.П. Лукошин, С.С. Поддубный. –Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. – 237 с.
4. Серебряков, Г.В. Обработка широкополосных сигналов в антенных решетках в частотно-селективном канале распространения [Текст] / Г.В. Серебряков // Актуальные проблемы статистической радиофизики. –Н. Новгород. –2004. –Т. 3. –С. 97–103.
5. Воеводин, В.В. Матрицы и вычисления [Текст]/ В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. –М.: Наука, 1984. –320 с.

УДК 621.396.677.8

В.П. Акимов, С.Б. Глыбовский, В.К. Дубрович

ОТРАЖАЮЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ НА ОСНОВЕ ЛАМИНИРОВАННОЙ СЕТКИ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НИТЕЙ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ НЕРОВНОСТЕЙ РЕФЛЕКТОРОВ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

В теории и практике антенн хорошо известен факт ухудшения направленных свойств зеркальной антенны в результате отличия профиля ее рефлектора от идеального. Искажение формы рефлектора может быть как детерминированным (в явном виде описывается некоторой функцией координат поверхности), так и случайным. Случайные искажения рефлектора связаны с качеством изготовления поверхности и ее последующей обработки и определяются, в основном, технологическим процессом. Кроме того, случайные искажения могут возникать под влиянием погодных условий при окислении металлической поверхности рефлектора. Детерминированные

случайные искажения рефлектора связаны с качеством изготовления поверхности и ее последующей обработки и определяются, в основном, технологическим процессом. Кроме того, случайные искажения могут возникать под влиянием погодных условий при окислении металлической поверхности рефлектора. Детерминированные

искажения могут появиться из-за испытываемых рефлектором механических напряжений вследствие различных нагрузок (гравитационных, ветровых и т. д.), а также тепловой деформации.

Как случайные, так и детерминированные искажения приводят к ограничению частотного диапазона антенны, что связано с ухудшением характеристик поля излучения с повышением частоты. Простейшая оценка показывает, что для получения коэффициента усиления параболического зеркала, отличного от максимально достижимого не более чем на несколько процентов, необходимо обеспечить точность изготовления профиля не хуже $1/32$ длины волны. Соблюдение данного требования для антенн большого размера (с диаметром рефлектора от нескольких метров и более) становится особенно затруднительным. Поэтому на практике частотный диапазон многих больших зеркальных антенн и радиотелескопов ограничен сантиметровыми волнами. Тем не менее, возникает необходимость адаптации уже существующих зеркал к работе в более высокочастотной области спектра.

В данной статье предлагается один из возможных путей расширения рабочего диапазона зеркальных антенн с применением вторичного рефлектора, выполненного из ламинированной сетки с металлическими нитями. Последние, образуя регулярную микросетку, придают подобной структуре требуемые отражательные свойства. Расстояние между соседними нитями должно быть много меньше длины волны. Для придания структуре прочности микросетка ламинирована слоем диэлектрика. Кроме того, ламинирующий слой не допускает изменения электродинамических свойств поверхности под влиянием окисления. Применение сетки из тонких металлических упругих нитей для корректирующего рефлектора позволяет достичь значительно более точного исполнения профиля отражающей поверхности относительно заданной математической формы по сравнению с цельно-металлическими листами при наличии у этих листов пластических деформаций, обусловленных технологией их изготовления. Корректирующий рефлектор может устанавливаться непосредственно на исходный металлический рефлектор с целью адаптации уже существующих зеркал к работе в более высокочастотном диапазоне.

Для реализации описанной корректирующей поверхности необходимы методы расчета, учитывающие геометрические и материальные па-

раметры ламинированной сетки и позволяющие точно описать ее отражательные свойства. Ввиду сложности структуры (размер ячейки сетки много меньше длины волны, в то время как размер самого рефлектора – много больше) численные методы решения задачи оказываются неприменимыми из-за огромной трудоемкости вычислений. Поэтому возникает необходимость разработки нового численно-аналитического подхода, пригодного даже для расчета радиотелескопов (размеры которых могут в сотни тысяч раз превосходить длину волны). Кроме того, получение результатов в аналитическом виде позволит выявить зависимость свойств антенны, оборудованной вторичным рефлектором, от параметров ламинированной сетки и неровностей профиля первичного зеркала.

Для анализа параболической антенны с корректирующим рефлектором в работе используется токовый метод, в приближении которого поле падающей волны наводит в каждой точке рефлектора такие же токи, какие наводились бы на бесконечном экране, лежащем в касательной плоскости. Поэтому для анализа дифракции плоской волны на параболическом рефлекторе, покрытом ламинированной сеткой, вначале была решена задача об отражении плоской волны от соответствующей бесконечной плоской структуры.

Геометрия рассматриваемого плоскопараллельного отражателя приведена на рис. 1 а. Структура представляет собой плоский бесконечный слой диэлектрика шириной δ с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r , без омических потерь и магнитной проницаемостью, равной единице. Внутри ровно посередине слоя располагается плоская сетка из металлических нитей. Рассматриваются две конфигурации нитей: сетка с квадратными ячейками и идеальными электрическими контактами нитей в узлах (далее – сетка типа 1) и сетка из параллельных нитей (сетка типа 2). Расстояние между соседними нитями в каждом случае равно α , каждая нить считается цилиндрическим проводником с радиусом r_0 . Металл нитей имеет проводимость σ_i и магнитную проницаемость μ_i . Также выбраны следующие приближения: $r_0 \ll \alpha$; $\alpha \ll \lambda$, где $\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}}$ – длина волны в диэлектрике; f – частота; $\alpha \ll \delta/2$. Указанные неравенства соответствуют реальным требованиям прочности и высокой отражающей способности структуры.

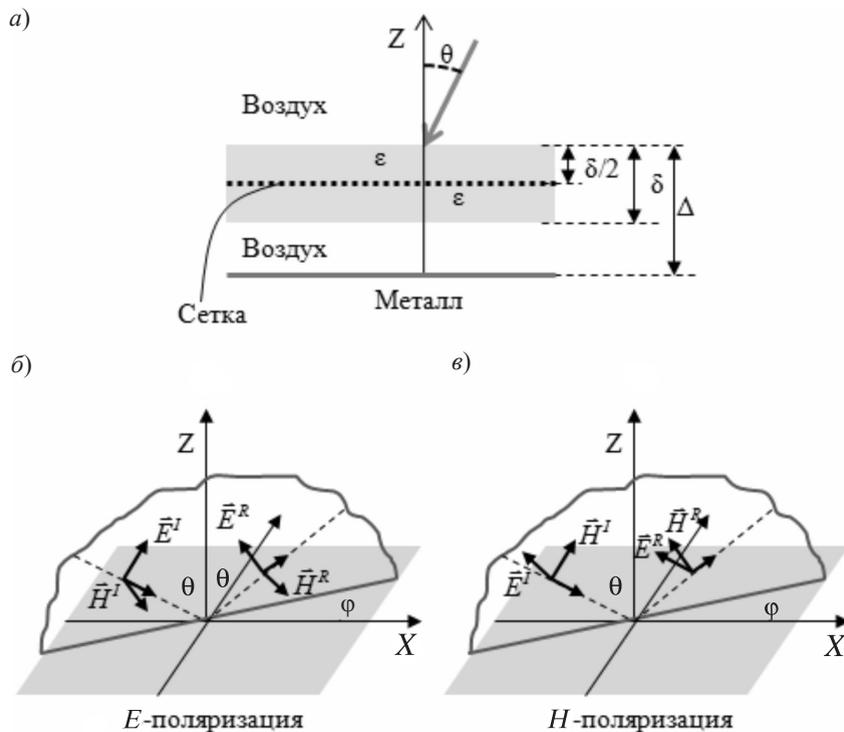


Рис. 1. Иллюстрация к задаче о плоском корректирующем рефлекторе:
а – геометрия плоской отражающей структуры; б – направление векторов
E-поляризации; в – направление векторов H-поляризации

Слой с сеткой внутри расположен над полупространством, заполненным металлом, который считается идеально проводящим, причем выполняется условие $\Delta \geq \delta$ (между диэлектрическим слоем и металлической плоскостью может существовать воздушный зазор). Падающее поле – плоская волна, волновой вектор которой образует угол θ с нормалью к структуре, причем отдельно рассматриваются два типа поляризации, показанные вместе с выбранной системой координат на рис. 1 б, в. В общем случае отражательные свойства плоской структуры характеризуются четырьмя коэффициентами отражения: R^{EE} , R^{HH} , R^{EH} и R^{HE} – отношениями комплексных амплитуд электрического поля отраженной и падающей волн для различных типов их поляризаций, показанных на рис. 1 б, в. Причем в силу взаимности среды $R^{EH} = -R^{HE}$.

Выбранные параметры металлической сетки таковы, что для нее справедливы усредненные граничные условия Конторовича. В соответствии с данным подходом реальное распределение токов вдоль нитей сетки можно заменить эквивалентной непрерывной функцией распределения – усредненными токами. Поле усредненных

токов при этом воспроизводит реальное поле токов нитей уже на расстоянии, равном нескольким периодам сетки. Так как полутолщина ламинирующего слоя считается много большей периода сетки, то взаимодействием токов сетки с границами раздела воздух–диэлектрик пренебрегается. Для сетки типа 1 усредненные граничные условия имеют следующий вид с учетом того, что сетка находится внутри диэлектрика [1]:

$$\vec{E}_t^{\text{расс}} = -\vec{E}_t^{\text{пад}} + i\eta\kappa \cdot \left[(1+F)\vec{j} + \frac{1}{2k^2} \text{grad}(\text{div} \vec{j}) \right];$$

$$\vec{j} = [\vec{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2)]; \quad \vec{E}_{t1} = \vec{E}_{t2}, \quad (1)$$

где $\vec{E}_t^{\text{расс}}$ – поле, рассеянное нитями сетки; $\vec{E}_t^{\text{пад}}$ – поле падающей волны; \vec{j} – усредненная плотность тока на поверхности, занимаемой сеткой; \vec{E}_1, \vec{H}_1 – полные поля в слое над сеткой; \vec{E}_2, \vec{H}_2 – полные поля в слое под сеткой;

$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \eta_0$ – волновое сопротивление диэлектрической среды; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $\eta_0 = 120\pi$ Ом;

$\kappa = \frac{\alpha}{\lambda} \ln\left(\frac{\alpha}{2\pi r_0}\right)$ – параметр сетки; $\epsilon_0 = 8,85$ пФ/м;

$F = \frac{\mu_i \cdot \Psi}{4 \ln(\alpha / 2\pi r_0)}$ – величина, характеризующая влияние скин-эффекта при конечной проводимости нитей сетки; значение Ψ пропорционально поверхностному сопротивлению цилиндрического проводника и находится по следующей формуле [2]:

$$\Psi = \frac{(1-i)}{r_0} \sqrt{\frac{8}{\omega \mu_0 \mu_i \sigma_i}} \cdot \frac{J_0 \left[r_0 \cdot (1-i) \sqrt{\omega \mu_0 \mu_i \sigma_i / 2} \right]}{J_1 \left[r_0 \cdot (1-i) \sqrt{\omega \mu_0 \mu_i \sigma_i / 2} \right]}.$$

Следует заметить, что усредненные граничные условия для сетки типа 1 не содержат какого-либо выделенного направления в горизонтальной плоскости и не зависят от ориентации нитей. Далее приведены усредненные граничные условия для сетки типа 2 с направлением нитей вдоль оси ОХ:

$$E_x^{\text{расс}} = -E_x^{\text{пад}} + i\eta \kappa \cdot \left[(1+F) j_x + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 j_x}{\partial x^2} \right];$$

$$j_y = 0; \quad (2)$$

$$\vec{j} = [\vec{n} \cdot (\vec{H}_1 - \vec{H}_2)]; \quad \vec{E}_{i1} = \vec{E}_{i2}.$$

Здесь, в отличие от изотропной сетки, рассеянное поле связано лишь с составляющей усредненных токов, параллельной направлению нитей, что говорит о зависимости отражательных свойств сетки из параллельных нитей от ориентации плоскости падения волн.

Использование метода усредненных граничных условий позволяет свести рассматриваемую задачу к типичному анализу слоистой структуры [3], содержащей в данном случае 5 слоев, и 4 границы раздела, на каждой из которых заданы известные граничные условия. На сетке векторы поля связаны соотношениями (1) или (2) в зависимости от ее типа, в то время как на остальных границах раздела (диэлектрик–воздух и воздух–металл) справедливы формулы Френеля для коэффициентов отражения. При этом следует учитывать, что волна, падающая под углом θ к нормали, распространяется внутри воздушного

зазора под тем же углом, а внутри ламинирующего слоя – под углом θ_1 , удовлетворяющим закону Снеллиуса: $\sin(\theta_1) = \sin(\theta) \cdot \sqrt{\epsilon_r}$.

Анализ слоистой структуры производится следующим образом: поле в каждом слое представляется в виде суммы многократно переотраженных плоских волн. При этом по принципу суперпозиции внутри каждого слоя можно рассматривать две пары результирующих волн, имеющих ортогональную поляризацию и противоположные направления распространения. На плоскости сетки результирующие волны связаны усредненными граничными условиями, причем для сетки типа 1 связаны только одноименные поляризации, а для сетки типа 2 E - и H -поляризованные волны оказываются связанными друг с другом. В результате последовательного рассмотрения отражения от каждой из границ получается система уравнений, однозначно связывающая комплексные амплитуды E - и H -компонент электрического поля падающей и отраженной от многослойной структуры волн, что позволяет получить аналитические выражения для коэффициентов отражения структуры в следующем виде:

$$R^{EE} = f^{EE} + (1 + f^{EE}) \frac{\sqrt{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r}}{\cos(\theta)} \cdot \gamma \cdot C^{EE};$$

$$R^{EH} = -R^{HE} = (1 - f^{HH}) \cdot \gamma \cdot C^{EH}; \quad (3)$$

$$R^{HH} = f^{HH} + (1 - f^{HH}) \cdot \gamma \cdot C^{HH},$$

где $\gamma = \exp\left(-i \frac{k_0 \delta}{2} \sqrt{\epsilon_r - \sin^2(\theta)}\right)$; f^{EE} , f^{HH} – коэффициенты отражения от границы воздух–диэлектрик, рассчитываемые по формулам Френеля:

$$f^{EE} = \frac{\eta_0 \cdot \cos(\theta) - \eta \cdot \sqrt{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r}}{\eta_0 \cdot \cos(\theta) + \eta \cdot \sqrt{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r}};$$

$$f^{HH} = \frac{\eta \cdot \cos(\theta) - \eta_0 \cdot \sqrt{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r}}{\eta \cdot \cos(\theta) + \eta_0 \cdot \sqrt{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r}};$$

функции C^{EE} , C^{EH} , C^{HH} определяются по-разному в зависимости от типа сетки

$$C^{EE} = \frac{\gamma \cdot (1 - f^{EE}) \cos(\theta) \left[\tilde{R}^{EE} (1 + \gamma^2 \tilde{R}^{HH} f^{HH}) - \gamma^2 \tilde{R}^{EH} \tilde{R}^{HE} f^{HH} \right]}{(1 + \gamma^2 \tilde{R}^{EE} f^{EE}) (1 + \gamma^2 \tilde{R}^{HH} f^{HH}) - \gamma^4 \tilde{R}^{EH} \tilde{R}^{HE} f^{EE} f^{HH}};$$

$$C^{EH} = \frac{\gamma \cdot \tilde{R}^{EH} \left(\frac{(1 - f^{EE}) \cos(\theta)}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r}} - \gamma f^{EE} C^{EE} \right)}{1 + \gamma^2 \tilde{R}^{HH} f^{HH}};$$

$$C^{HH} = \frac{\gamma \cdot (1 + f^{HH}) \left[\tilde{R}^{HH} (1 + \gamma^2 \tilde{R}^{EE} f^{EE}) - \gamma^2 \tilde{R}^{EH} \tilde{R}^{HE} f^{EE} \right]}{(1 + \gamma^2 \tilde{R}^{EE} f^{EE}) (1 + \gamma^2 \tilde{R}^{HH} f^{HH}) - \gamma^4 \tilde{R}^{EH} \tilde{R}^{HE} f^{EE} f^{HH}},$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}^{EE} &= R_{MESH}^{EE} + (1 - R_{MESH}^{EE}) \cdot \gamma \cdot C_{11} - R_{MESH}^{EH} \cdot \gamma \cdot C_{21}; \\ \tilde{R}^{EH} &= R_{MESH}^{EH} + (1 + R_{MESH}^{HH}) \cdot \gamma \cdot C_{21} - R_{MESH}^{EH} \cdot \gamma \cdot C_{11}; \\ \tilde{R}^{HE} &= -R_{MESH}^{EH} + (1 - R_{MESH}^{EE}) \cdot \gamma \cdot C_{12} - R_{MESH}^{EH} \cdot \gamma \cdot C_{22}; \\ \tilde{R}^{HH} &= R_{MESH}^{HH} + (1 + R_{MESH}^{HH}) \cdot \gamma \cdot C_{22} - R_{MESH}^{EH} \cdot \gamma \cdot C_{12}, \end{aligned}$$

где

$$C_{11} = \frac{(1 - R_{MESH}^{EE})P + \gamma(R_{MESH}^{EH})^2}{QP + \gamma^2(R_{MESH}^{EH})^2}; \quad C_{12} = R_{MESH}^{EH} \cdot \frac{P + \gamma \cdot (1 + R_{MESH}^{HH})}{QP - \gamma^2(R_{MESH}^{EH})^2};$$

$$C_{21} = (1 - C_{11}\gamma)R_{MESH}^{EH} \cdot P^{-1}; \quad C_{22} = (1 + R_{MESH}^{HH} - C_{12} \cdot \gamma \cdot R_{MESH}^{EH})P^{-1};$$

$$P = (\gamma \cdot \hat{R}^{HH})^{-1} - \gamma \cdot R_{MESH}^{HH}; \quad Q = (\gamma \cdot \hat{R}^{EE})^{-1} - \gamma \cdot R_{MESH}^{EE},$$

$$\hat{R}^{EE} = -f^{EE} + \frac{\gamma_0^2 \cdot (1 - (f^{EE})^2) R_{Me}^E}{1 - \gamma_0^2 f^{EE} R_{Me}^E}; \quad \hat{R}^{HH} = -f^{HH} + \frac{\gamma_0^2 \cdot (1 - (f^{HH})^2) R_{Me}^H}{1 - \gamma_0^2 f^{HH} \cdot R_{Me}^H},$$

$$\gamma_0 = \exp(-ik_0(\Delta - \delta)\cos(\theta)), \quad k_0 = \frac{2\pi f}{c}.$$

$R_{MESH}^{EE}, R_{MESH}^{HH}, R_{MESH}^{EH} = -R_{MESH}^{HE}$ – коэффициенты отражения плоской волны от сетки, зависящие от топологии ее нитей. Для сетки с квадратной ячейкой и идеальными электрическими контактами нитей в узлах справедливы следующие соотношения с учетом направления распространения волн внутри ламинирующего слоя:

$$R_{MESH}^{EE} = \left[1 + i \frac{2\kappa}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r}} \left(1 + F - \frac{\sin^2(\theta)}{2\epsilon_r} \right) \right]^{-1};$$

$$R_{MESH}^{HH} = - \left[1 + i2\kappa \cdot \sqrt{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r} \cdot (1 + F) \right]^{-1};$$

$$R_{MESH}^{HE} = R_{MESH}^{EH} = 0.$$

Для сетки из параллельных нитей, направленных вдоль оси OX, справедливы следующие выражения:

$$R_{MESH}^{EE} = \frac{(1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r) \cdot \cos^2(\varphi)}{(1 - \cos^2(\varphi) \sin^2(\theta) / \epsilon_r) \cdot \left\{ 1 + 2i\kappa \cdot \cos(\theta) \cdot \left[1 + F (1 - \cos^2(\varphi) \sin^2(\theta))^{-1} \right] \right\}};$$

$$R_{MESH}^{HH} = -R_{MESH}^{EE} \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi)}{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r};$$

$$R_{MESH}^{EH} = R_{MESH}^{EE} \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta) / \epsilon_r}},$$

$R_{Me}^E = 1$ и $R_{Me}^H = -1$ – коэффициенты отражения соответствующих поляризаций плоской волны

от границы воздух–металл в приближении бесконечной проводимости металла.

Указанные коэффициенты отражения приведены к верхней плоскости структуры.

По полученным формулам проведены численные расчеты при отсутствии омических потерь в системе для различных комбинаций ее параметров. В случае использования сетки типа 1 кросс-поляризационные коэффициенты отражения равны нулю, а модули коэффициентов отражения по основным поляризациям равны единице. На рис. 2 а представлены типичные графики зависимости фазы коэффициента отражения R^{EE} при нормальном падении от ширины воздушного зазора между ламинирующим слоем и металлической плоскостью для структуры с сеткой типа 1. В качестве параметра выступает размер ячейки сетки. Частота равна 50 ГГц. В качестве других характеристик системы выбраны следующие: $r_0 / \alpha = 1 / 15$, $\delta = 1,73$ мм, $\epsilon_r = 2$. На рис. 2 б представлены те же зависимости, однако в качестве параметра выступает угол падения волны θ , в то время как размер ячейки постоянен и равен $0,1\lambda$.

Следует заметить, что полученные коэффициенты отражения от структуры с сеткой типа 1 не зависят от ориентации плоскости падения, т. е. от угла φ , что объясняется изотропностью дан-

ного типа сетки. Как видно из рис. 2 а, при изменении ширины зазора наблюдаются чередующиеся участки изменения фазы, а также участки быстрого изменения фазы (резонансы). Из рис. 2 а видно также, что чем мельче ячейка сетки, тем более пологими становятся участки медленного изменения фазы, в пределе приближаясь к отрезкам горизонтальных прямых, отстоящих друг от друга на величину, кратную 360° . Это соответствует переходу сетки в сплошной металлический экран с коэффициентами отражения, не зависящими от величины воздушного зазора. Фаза коэффициента отражения по H -поляризации ведет себя аналогично. Можно говорить, что отражательные свойства структуры в пределах участка медленного изменения фазы близки к идеальному отражателю – сплошному металлическому экрану, причем, чем плотнее сетка, тем ближе, что и следовало ожидать. Ширина участка медленного изменения фазы также увеличивается с уплотнением сетки, приближаясь к половине длины волны в воздухе. На основании сказанного можно сделать следующий вывод: если первичный рефлектор (нижняя металлическая плоскость на рис. 1 а) имеет неровности, а корректирующий рефлектор из ламинированной сетки – идеально

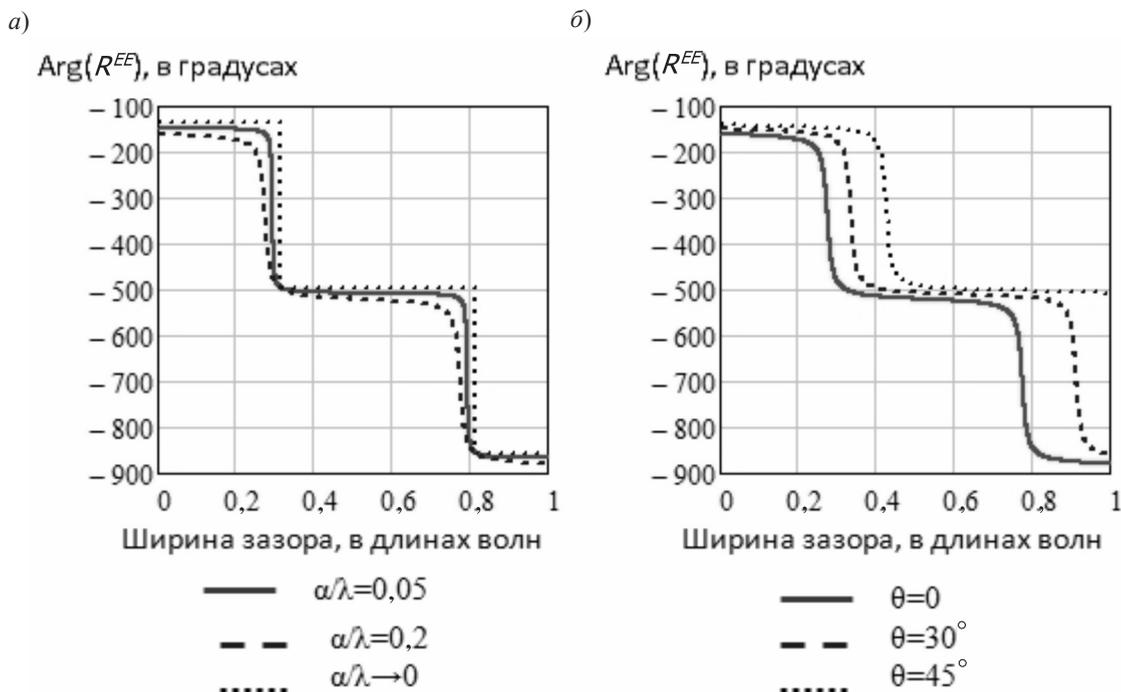


Рис. 2. Зависимости фазы коэффициента отражения E -поляризации для случая сетки типа 1 от ширины воздушного зазора: а – при нормальном падении волны; б – при наклонном падении волны

плоский, то эффективной коррекции можно достичь, когда отклонение профиля от плоскости (меняющееся от точки к точке и определяющее ширину воздушного зазора) остается в пределах одного из участков медленного изменения фазы. Следует также заметить, что при работе в диапазоне углов падения ширина участка медленного изменения фазы уменьшается, что понятно из рис. 2 б. При несоблюдении данного условия за счет резонансов внутри плоскопараллельной структуры могут возникнуть существенные фазовые ошибки на поверхности рефлектора.

Далее рассмотрим фазовые характеристики коэффициента отражения структуры, содержащей сетку типа 2. В этом случае, как показано ниже, проявляется анизотропия сетки, что приводит не только к переходу части энергии падающей волны в ортогональную поляризацию, но и к существенному искажению фазовых характеристик. На рис. 3 а представлены зависимости фазы коэффициента отражения R^{EE} от ширины воздушного зазора для нормального падения при $\alpha / \lambda = 0,2$. Остальные параметры аналогичны выбранным ранее (см. рис. 2). Параметром здесь выступает угол ориентации плоскости падения волны φ относительно направления нитей сетки. Видно, что если плоскость падения не параллельна нитям, то происходит заметное искажение участков медленного изменения фазы. Кроме того, поведение модуля коэффициента отражения, изображенное на рис. 3 б, говорит о наличии резонансного перехода энергии падающей волны в ортогональную составляющую (модуль R^{EE} при определенных

значениях ширины зазора заметно меньше единицы). Эти факторы ввиду быстрого изменения фазы не позволяют использовать данный тип сетки для коррекции неровных рефлекторов.

Полученные коэффициенты отражения (3) описывают плоские бесконечные корректирующие рефлекторы с различными видами сетки внутри. Но на основании полученных формул могут быть проанализированы и неплоские рефлекторы конечных размеров в приближении физической оптики по аналогии с токовым методом для цельнометаллических зеркал [4]. Здесь следует учитывать, что первичный и корректирующий рефлектор образуют структуру, многократно переотражающую падающую плоскую волну. Уровень поля отраженных волн падает с ростом порядка переотражения ввиду излучения, а также из-за омических потерь в системе. При наклонном падении переотраженные волны распространяются вдоль структуры. Согласно приближению токового метода, токи, наводимые полем падающей волны в каждой точке рефлектора, такие же, какие наводились бы на бесконечном рефлекторе, лежащем в касательной плоскости.

Данный подход может быть применим для рассматриваемой задачи только когда расстояние вдоль структуры, на котором уровень поля переотраженных волн убывает достаточно сильно, много меньше радиуса кривизны ее поверхности в точке падения волны, что справедливо для зеркал большого размера в миллиметровом диапазоне.

Еще одно отличие от цельнометаллического зеркала состоит в том, что внешняя поверхность

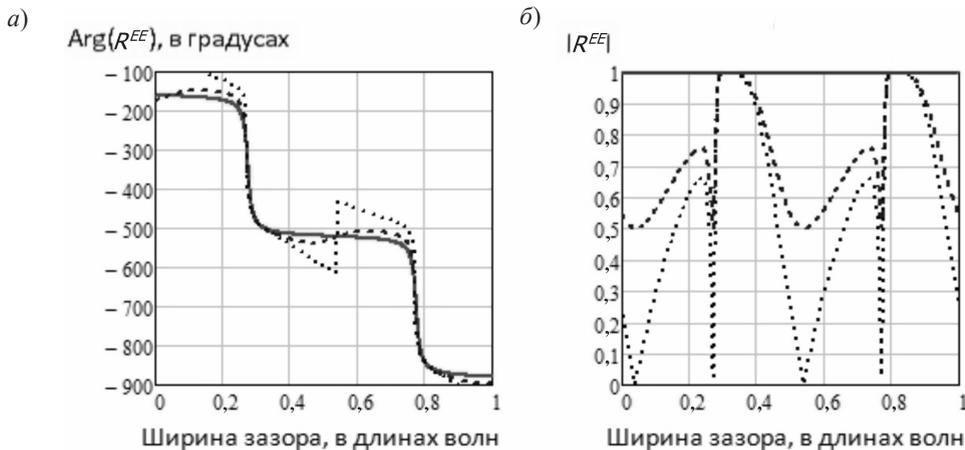


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения E -поляризации для случая сетки типа 2 от ширины воздушного зазора при различных ориентациях плоскости падения:

a – фаза; b – амплитуда

(—) $\varphi = 0$; (---) $\varphi = 30^\circ$; (.....) $\varphi = 45^\circ$

корректирующего рефлектора представляет собой границу раздела воздух–диэлектрик. Поэтому касательная составляющая электрического поля на ней не равна нулю. Однако в соответствии с принципом эквивалентности наличие касательных составляющих полей может описываться фиктивным распределением электрических и магнитных токов по поверхности корректирующего рефлектора, создающих вторичное поле в точке наблюдения. На основании найденных ранее коэффициентов отражения в каждой точке поверхности S рефлектора можно найти поле отраженной волны \vec{E}^R, \vec{H}^R . Затем дифракционное поле в точке наблюдения ищется в интегральном виде [5]:

$$\vec{E}^S \cdot \vec{a} = \int_S ([\vec{n} \cdot (\vec{H}^I + \vec{H}^R)] \cdot \vec{E}^D + [\vec{n} \cdot (\vec{E}^I + \vec{E}^R)] \cdot \vec{H}^D) \cdot dS, \quad (4)$$

где \vec{n} – внешняя нормаль к поверхности рефлектора; \vec{E}^D, \vec{H}^D – поля точечного электрического диполя с моментом \vec{a} , расположенного в точке наблюдения, вычисляемые по известным выражениям [2] в точке интегрирования по поверхности S .

Описанным выше способом была решена задача о дифракции плоской волны на идеальном металлическом параболоиде, покрытом корректирующим рефлектором из ламинированной сетки. Последний установлен таким образом, что полная толщина корректирующего слоя – расстояние между точками на параболоиде и поверхности корректирующего рефлектора, измеряемое по общей нормали, постоянно, и равно Δ , как показано на рис. 4 а (внутренняя структура соответствует рис. 1 а).

При таком определении формы корректирующего рефлектора его внешняя поверхность уже не является параболоидом вращения, однако, как

показано далее, может быть описана в параметрическом виде при выборе системы координат, проиллюстрированном на рис. 4 а. При этом поверхностный интеграл (4) сводится к двойному интегралу по сферическим углам ϑ и φ . Каждой точке на поверхности исходного рефлектора со сферическими координатами $(R_0, \vartheta_0, \varphi_0)$ единственным образом соответствует точка на поверхности корректирующего рефлектора с координатами (R, ϑ, φ) , таким образом, что данные две точки соединяются отрезком нормали, общей для поверхностей обоих рефлекторов. Учитывая наличие общей нормали можно упростить выражения, получаемые для касательных составляющих поля на поверхности корректирующего рефлектора путем перехода в (4) к интегрированию в координатах ϑ_0, φ_0 . Связь координат определяется следующими выражениями:

$$\vartheta = \vartheta_0 + \arccos \left[\frac{R_0 - \Delta \cos(\vartheta_0 / 2)}{\sqrt{R_0^2 + \Delta^2 - 2\Delta \cdot R_0 \cos(\vartheta_0 / 2)}} \right];$$

$$\varphi = \varphi_0,$$

где функция $R_0(\vartheta_0) = 2F / (1 + \cos(\vartheta_0))$ описывает параболическую поверхность первичного рефлектора с фокусным расстоянием F . Поверхность корректирующего рефлектора описывается приведенной ниже формулой:

$$R^2 = R_0^2 + \Delta^2 - 2\Delta \cdot R_0 \cos(\vartheta_0 / 2).$$

Элемент площади при интегрировании по поверхности корректирующего параболоида, как было показано, равен

$$dS = R^2 \cdot \sin(\vartheta) \Psi(\vartheta_0) d\vartheta_0 d\varphi_0 / \cos(\vartheta - \vartheta_0 / 2),$$

$$\Psi(\vartheta_0) = 1 - \left[1 - \left(\frac{R_0 - \Delta \cos(\vartheta_0 / 2)}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} R^{-2} \times$$

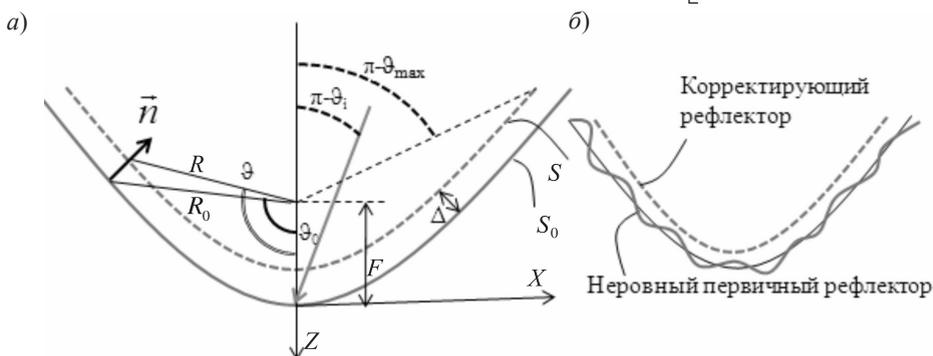


Рис. 4. Иллюстрация к задаче о коррекции параболического рефлектора: а – к задаче о параболическом рефлекторе, покрытом вторичным корректирующим рефлектором; б – схема коррекции неровного параболического рефлектора

$$\times \left[R \left(\frac{F \sin(\vartheta_0/2)}{\cos^3(\vartheta_0/2)} + \frac{\Delta \sin(\vartheta_0/2)}{2} \right) - \left(\frac{R_0 - \Delta \cos(\vartheta_0/2)}{2R} \right) \left(\frac{2R_0 F \sin(\vartheta_0/2)}{\cos^3(\vartheta_0/2)} - \frac{2\Delta F \sin(\vartheta_0/2) \cos(\vartheta_0/2)}{\cos^3(\vartheta_0/2)} + \Delta R_0 \sin(\vartheta_0/2) \right) \right].$$

Для вычисления касательных составляющих поля на поверхности S в точке с координатами (R, ϑ, φ) можно воспользоваться следующей формулой для вектора нормали:

$$\vec{n} = -\sin(\vartheta_0/2) \cos(\varphi) \vec{x}_0 - \sin(\vartheta_0/2) \sin(\varphi) \vec{y} - \cos(\vartheta_0/2) \vec{z}_0.$$

Поле волны, падающей под углом θ_i к оси

$$r = \sqrt{(R \sin(\vartheta) \cos(\varphi) - x_0)^2 + (R \sin(\vartheta) \sin(\varphi) - y_0)^2 + (R \cos(\vartheta) - z_0)^2}.$$

В результате применения описанного выше подхода можно получить решение для поля в произвольной точке наблюдения, достаточно отдаленной от поверхности зеркала, в следующем виде:

$$\begin{aligned} \vec{E}^S(x_0, y_0, z_0) = & \frac{ik_0}{4\pi} \int_0^{\vartheta_{MAX}} \int_0^{2\pi} \frac{\vec{\Omega}(\vartheta_0, \varphi_0) R^2 \sin(\vartheta) \Psi(\vartheta_0) d\vartheta_0 d\varphi_0}{\cos(\vartheta - \vartheta_0/2)} \times \\ & \times \exp[i\Phi(\vartheta_0, \varphi_0)] d\vartheta_0 d\varphi_0; \\ \Phi(\vartheta_0, \varphi_0) = & k_0 R \cdot [(\sin(\vartheta_i) \sin(\vartheta) \cos(\varphi) + \cos(\vartheta_i) \cos(\vartheta)) - r]. \end{aligned} \quad (5)$$

Вид функции $\vec{\Omega}(\vartheta_0, \varphi_0)$ здесь не приводится в силу громоздкости. Интеграл (5) может быть рассчитан численно, например, методом Гаусса определенного порядка.

Таким образом, был построен численно-аналитический подход для анализа параболического рефлектора, покрытого вторичным корректирующим рефлектором из ламинированной

OZ, как показано на рис. 4 а, и поляризованной в плоскости XOZ, соответствует следующему выражению:

$$\vec{E}^I = E_0 [\sin(\vartheta_i) \vec{z}_0 + \cos(\vartheta_i) \vec{x}_0] \times \exp[ik_0 R \cdot (\sin(\vartheta_i) \sin(\vartheta) \cos(\varphi) + \cos(\vartheta_i) \cos(\vartheta))].$$

Также при вычислении значений коэффициентов отражения, определяющих \vec{E}^R , \vec{H}^R , в (4) следует учитывать зависимость направления векторов E - и H -поляризованных полей от точки на поверхности S . Для нахождения поля точечного диполя, расположенного в точке наблюдения, входящего в выражение (4), можно использовать известные формулы [2], при этом ограничиваясь учетом слагаемых порядка $1/k_0 r$, где r – расстояние от точки наблюдения (x_0, y_0, z_0) до текущей точки интегрирования (R, ϑ, φ) :

сетки металлических нитей. Преимущество представленного алгоритма расчета заключается в возможности его расширения для анализа качества коррекции неровных рефлекторов (см. рис. 4 б) на основании уже полученных формул. При этом учет детерминированных или случайных неровностей сводится к замене во всех выражениях постоянной толщины корректирующего рефлектора Δ на некоторую функцию поверхностных координат $\Delta(\vartheta, \varphi)$. Она может иметь определенный вид с целью учета конкретного вида деформаций зеркала, либо быть случайной функцией, имеющей заданное максимальное отклонение и радиус корреляции. В последнем случае возможно использование алгоритма генерации случайных поверхностей методом квазисплайнов и анализ набора реализаций [6]. Кроме того, могут учитываться и неровности самого корректирующего рефлектора путем возмущения фазовой функции $\Phi(\vartheta_0, \varphi_0)$ в выражении (5) аналогичным методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Конторович, М.И.** Электродинамика сетчатых структур [Текст] / М.И. Конторович, М.И. Астрахан, В.П. Акимов [и др.]. –М.: Радио и связь, 1987. –135 с.
2. **Пименов, Ю.В.** Техническая электродинамика: Учеб. пособие для вузов [Текст] / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов; под ред. Ю.В. Пименова. –М.: Радио и связь, 2000. –536 с.
3. **Бреховских, Л.М.** Волны в слоистых средах [Текст] / Л.М. Бреховских. –М.: Наука, 1973. –341 с.
4. **Кюн, Р.** Микроволновые антенны [Текст] / Р. Кюн. –Л.: Судостроение, 1967. –518 с.
5. **Каценеленбаум, Б.З.** Высокочастотная электродинамика [Текст] / Б.З. Каценеленбаум. –М.: Наука, 1966. –240 с.
6. **Семенков, О.И.** Основы автоматизации проектирования поверхностей с использованием базисных сплайнов [Текст] / О.И. Семенков, В.П. Васильев. –Мн.: Наука и техника, 1987. –167 с.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ТУРБУЛИЗАЦИЕЙ СТРУИ ПОТОКОМ ИОНОВ

Электропневматические системы управления широко применяются в различных отраслях промышленности [1–3]. Для связи электрических и пневматических подсистем используются электропневматические преобразователи. Наличие в конструкции преобразователя инерционных и ненадежных подвижных элементов существенно ухудшает статические и динамические характеристики системы. Для увеличения быстродействия и надежности электропневматических преобразователей прежде всего необходимо устранить все подвижные элементы из процесса преобразования сигналов. Это осуществлено в разработанных струйных электрогазодинамических (ЭГД) преобразователях [4].

Принцип действия данных струйных ЭГД электропневматических (ЭПП) и электрогидравлических (ЭГП) преобразователей основан на турбулизации изначально ламинарной затопленной струи газа (жидкости) потоками униполярных ионов. Униполярные потоки ионов создаются в среде, окружающей струю, в резко неоднородном поперечном к струе электрическом поле при приложении к игольчатым электродам высокого электрического напряжения. При этом знак ионов (отрицательный или положительный) определяется электрическим потенциалом острия игольчатого электрода. Поток ионов, двигаясь в электрическом поле и достигая поверхности струи, передает ей количество своего движения, возмущает с помощью такого ЭГД воздействия струю и вызывает ее турбулизацию. Турбулизация струи газа (жидкости) создает хаотические трехмерные флуктуации поля скорости, приводящие к расширению струи с образованием так называемого *турбулентного конуса* [5], уменьшению ее кинетической энергии и падению давления в прием-

ном сопле. Это изменение давления в приемном сопле является выходным пневматическим (гидравлическим) сигналом преобразователей.

Общий принцип построения электропневматических преобразователей с турбулизацией струи встречно направленными потоками униполярных ионов разных знаков (ЭГД ЭПП с ТС) представлен на рис. 1.

Приемное сопло в ЭГД ЭПП с ТС располагается на расстоянии $x < x_{ic}$ (рис. 1 а), Здесь x_{ic} – расстояние от среза питающего сопла до точки самопроизвольной турбулизации свободной затопленной струи вследствие наличия в ней естественных возмущений (для заданного давления питания p_n).

Затопленная ламинарная струя теряет устойчивость и турбулизуется в пределах фиксированного расстояния x при повышении напряжения U на электродах до начального значения напряжения U_k возникновения коронного разряда в воздухе. При $U_k \leq U < U_{np}$ (U_{np} – напряжение пробоя межэлектродного промежутка) сечение перехода x_{ic} ламинарной струи в турбулентную условно (поскольку расстояние x между формирующим и приемным соплом меньше x_{ic}) смещается в сторону формирующего сопла и при определенных напряжениях (токах) достигает входного среза приемного сопла. С этого момента при дальнейшем увеличении тока I (напряжения на электродах) давление в приемном сопле $p_{вых}$ начинает быстро уменьшаться при постоянном давлении питания p_n вследствие уменьшения кинетической энергии струи при ее расширении и эффектов обратных потоков (рис. 1 в).

При проектировании струйных ЭГД ЭПП с ТС следует стремиться, чтобы статическая характеристика преобразователя (см. рис. 1 в) имела

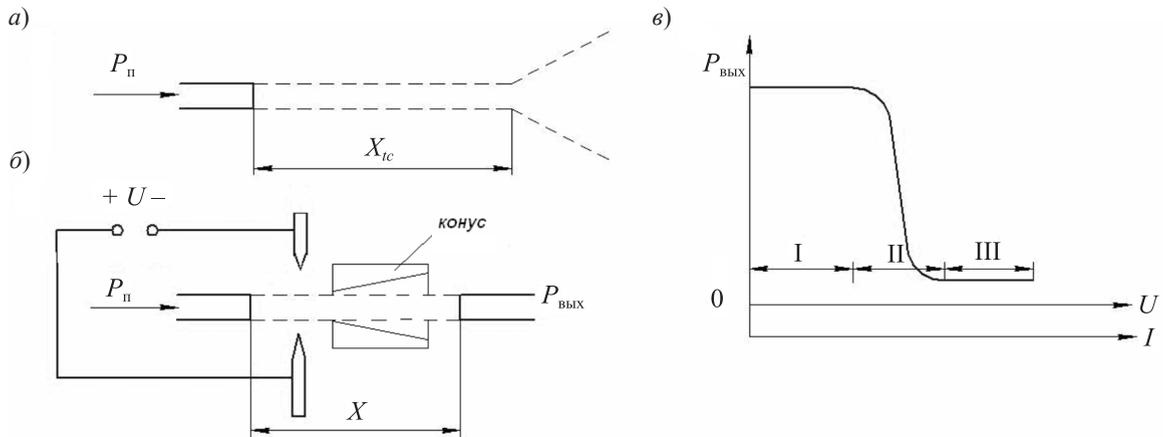


Рис. 1. Общий принцип построения ЭПП с турбулизацией струи встречно направленными потоками ионов разных знаков:
а, б – организация ЭГД воздействия; в – вид статической характеристики ЭГД ЭПП с ТС

для устойчивой работы достаточно протяженный участок I, необходимую крутизну участка II (при использовании ЭПП с ТС в логических цепях эта крутизна должна быть максимальной). Участок III должен быть таким, чтобы обеспечить минимальное давление на выходе $p_{\text{ВЫХ}}$ преобразователя.

Для обеспечения минимального давления выхода $p_{\text{ВЫХ}}$ между приемным и питающим соплами размещается промежуточный конус (см. рис. 1 б).

Цель данной работы – нахождение динамических характеристик ЭПП с ТС потоком униполярных ионов.

Экспериментально снятая с использованием шлейфового осциллографа МПО-2 типичная переходная характеристика ЭПП с ТС встречно направленными потоками униполярных ионов разных знаков при нагрузке на глухую камеру объемом $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ представлена на рис. 2.

Как видно из рис. 2, у ЭПП с ТС при включении и отключении имеет место чистое запаздывание, соответственно $\tau_{\text{вкл}}$, $\tau_{\text{откл}}$. При этом:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{вкл}} &= t_1 + t_2 + t_3 + t_4; \\ \tau_{\text{откл}} &= t'_1 + t'_2 + t'_3 + t'_4, \end{aligned} \quad (1)$$

где t_1, t'_1 – время от момента подачи (снятия) напряжения U до момента возникновения (угасания) короны, соответственно; t_2, t'_2 – время движения головных (хвостовых) ионов ионного облака во внешней зоне короны до ближайшей поверхности свободной струи, отсчитанное от момента зажигания (угасания) короны, соответственно; t_3, t'_3 – время потери устойчивости струи и начала турбулизации – начала условного перемещения турбу-

лентного конуса в сторону формирующего сопла; t_4, t'_4 – время условного перемещения турбулентного конуса до входного среза приемного сопла.

Определяем по данным переходным характеристикам время чистого запаздывания τ (см. рис. 2) как время, в течение которого функция $p_{\text{ВЫХ}}(t)$ ($p_{\text{ВЫХ}}$ – давление на выходе ЭГД ЭПП с ТС) от $t = 0$ до $t = \tau$ не превышает $0,001 p_{\text{ВЫХ}}(\infty)$. В нашем случае $\tau_{\text{вкл}} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, а $\tau_{\text{откл}} = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

На рис. 3 представлены переходные характеристики ЭГД ЭПП с ТС в безразмерном виде без учета чистого запаздывания, полученные по экспериментально снятым переходным характеристикам (см. рис. 2).

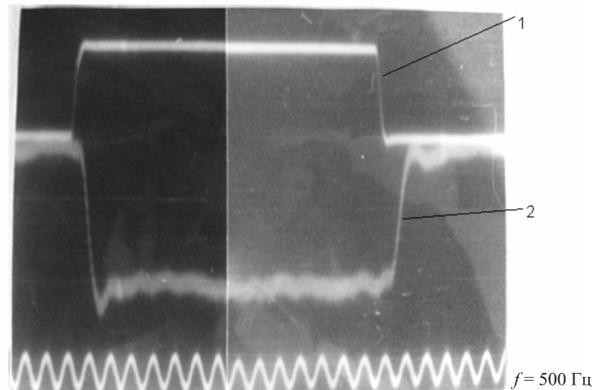


Рис. 2. Экспериментально полученные переходные характеристики ЭПП с турбулизацией струи встречно направленными потоками униполярных ионов разных знаков
1 – переходная характеристика шлейфа осциллографа, регистрирующего выходное давление;
2 – выходной пневматический сигнал

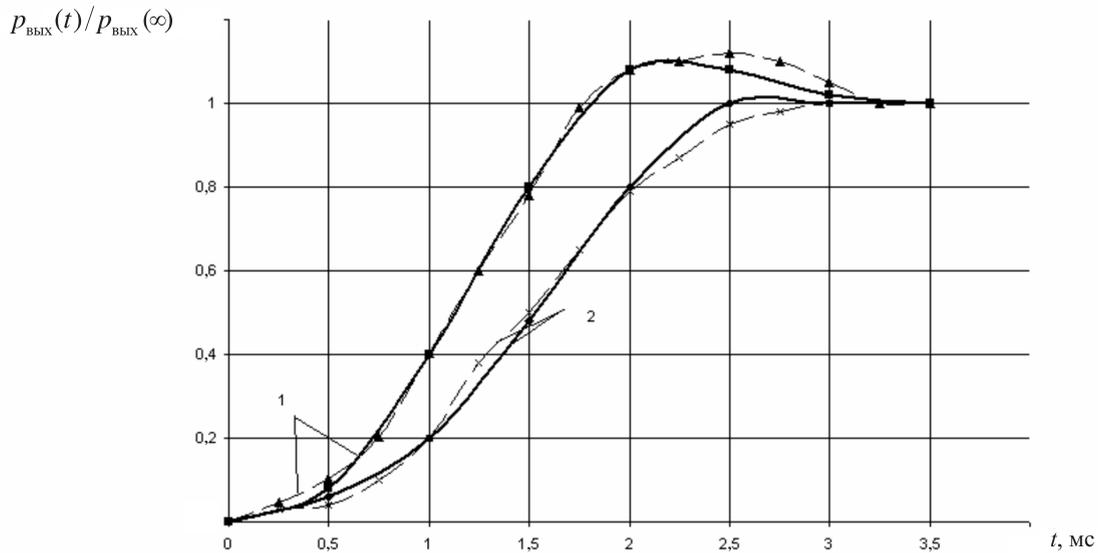


Рис. 3. Переходные характеристики ЭГД ЭПП с ТС в безразмерном виде
 1 – включение; 2 – выключение
 (—) – эксперимент; (---) – расчет

Тогда передаточная функция ЭГД ЭПП с ТС есть произведение двух передаточных функций: $W_1(s) = e^{-st}$, соответствующей звену чистого запаздывания, и $W_2(s)$, соответствующей функции $p_{\text{вых}}(t) = p_{\text{вых}}(t - \tau)$, для которой за начало отсчета принято время $t = \tau$:

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s). \quad (2)$$

По переходным характеристикам рис. 3 определяем с помощью метода площадей [6, 7] передаточную функцию $W_2(s)$.

Так как имеем объект с самовыравниванием (см. рис. 2 и 3), то для практических расчетов выбираем передаточную функцию вида [6, 7]:

$$W_2(s) = \frac{k}{T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}, \quad (3)$$

где k – коэффициент передачи, который определяется из статических характеристик ЭПП с ТС $p_{\text{вых}} = f(U)$; T_1, T_2, T_3 – неизвестные постоянные времени ЭГД ЭПП с ТС, определяемые методом площадей [6, 7]:

$$T_1 = \int_0^{\infty} (1 - \sigma) dt, \quad (4)$$

$$T_2^2 = T_1^2 \int_0^{\infty} (1 - \sigma)(1 - \theta) d\theta, \quad (5)$$

$$T_3^3 = T_1^3 \int_0^{\infty} (1 - \sigma) \left(1 - 2\theta + \frac{(\theta)^2}{2}\right) d\theta, \quad (6)$$

где σ – переходная характеристика ЭГД ЭПП с

ТС в безразмерном виде без учета чистого запаздывания $\sigma = p_{\text{вых}}(t)/p_{\text{вых}}(\infty)$; θ – безразмерное время $\theta = t/T_1$.

Можно перейти от интегралов (4)–(6) для определения постоянных времени ЭГД ЭПП с ТС к конечным суммам. Для этого разбиваем ось абсцисс рис. 3 на отрезки с интервалом времени $\Delta t = 0,25$ мс исходя из условия, что на протяжении всего графика функция $\sigma = p_{\text{вых}}(t)/p_{\text{вых}}(\infty)$ в пределах $2\Delta t$ мало отличается от прямой.

В этом случае соответствующие постоянные времени определяются [6, 7] по формулам:

$$T_1 = \Delta t \left(\sum_{i=0}^n [1 - \sigma(i\Delta t)] - 0,5 \cdot [1 - \sigma(0)] \right), \quad (7)$$

$$T_2^2 = T_1^2 \Delta \theta \left(\sum_{i=0}^n ([1 - \sigma(i\Delta \theta)][1 - i\Delta \theta]) - 0,5 \cdot [1 - \sigma(0)] \right), \quad (8)$$

$$T_3^3 = T_1^3 \Delta \theta \left(\sum_{i=0}^n ([1 - \sigma(i\Delta \theta)] \left[1 - 2i\Delta \theta + \frac{(i\Delta \theta)^2}{2} \right]) - 0,5 \cdot [1 - \sigma(0)] \right). \quad (9)$$

Перестраиваем функцию $(1 - \sigma)$ в другом масштабе времени (за переменную примем θ). Для этого предварительно заполняем табл. 1.

На рис. 4 представлена функция $1 - \sigma$ от параметра θ , построенная в соответствии с табл. 1.

На основании (7) с использованием табл. 1 получаем для включения ЭГД ЭПП с ТС посто-

Таблица 1

Расчет функции $(1 - \sigma)$ от безразмерного времени θ

Включение ЭПП с ТС				Отключение ЭПП с ТС		
$t, \text{мс}$	σ	$1 - \sigma$	$\theta = t/T_1$	σ	$1 - \sigma$	$\theta = t/T_1$
0	0	1	0,00	0	1	0,00
0,25	0,04	0,96	0,25	0,03	0,97	0,17
0,5	0,1	0,9	0,51	0,04	0,96	0,34
0,75	0,2	0,8	0,76	0,1	0,9	0,51
1	0,4	0,6	1,02	0,2	0,8	0,68
1,25	0,6	0,4	1,27	0,38	0,62	0,85
1,5	0,8	0,2	1,52	0,5	0,5	1,02
1,75	1	0	1,78	0,65	0,35	1,19
2	1,1	-0,1	2,03	0,8	0,2	1,36
2,25	1,1	-0,1	2,28	0,9	0,1	1,53
2,5	1,1	-0,1	2,54	1	0	1,69
2,75	1,08	-0,08	2,79	1	0	1,86
3	1,04	-0,04	3,05	1	0	2,03
3,25	1	0	3,30	1	0	2,20
3,5	1	0	3,55	1	0	2,37
		$\Sigma = 4,44$			$\Sigma = 6,4$	

янную времени $T_1 = 0,985 \cdot 10^{-3} \text{с}$, а для отключения – $T_1 = 1,475 \cdot 10^{-3} \text{с}$.

В табл. 2 и 3 приведен расчет дополнительных параметров, необходимых для расчета T_2, T_3 при включении и отключении ЭГД ЭПП с ТС, соответственно.

При помощи выражений (8) и (9) с использованием табл. 2 и 3 получаем:

для включения ЭГД ЭПП с ТС имеем

$$T_2^2 = 0,525 \cdot 10^{-6} \text{с}^2; T_3^3 = 0,105 \cdot 10^{-9} \text{с}^3;$$

для отключения ЭГД ЭПП с ТС имеем $T_2^2 = 0,94 \cdot 10^{-6} \text{с}^2; T_3^3 = 0,33 \cdot 10^{-9} \text{с}^3$.

Таким образом, с учетом (2), передаточная функция ЭПП с ТС встречно направленными потоками униполярных ионов разных знаков (см. рис. 1 б), имеет вид:

$$W(s) = \frac{ke^{-s\tau}}{T_3^3 s^3 + T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}, \quad (10)$$

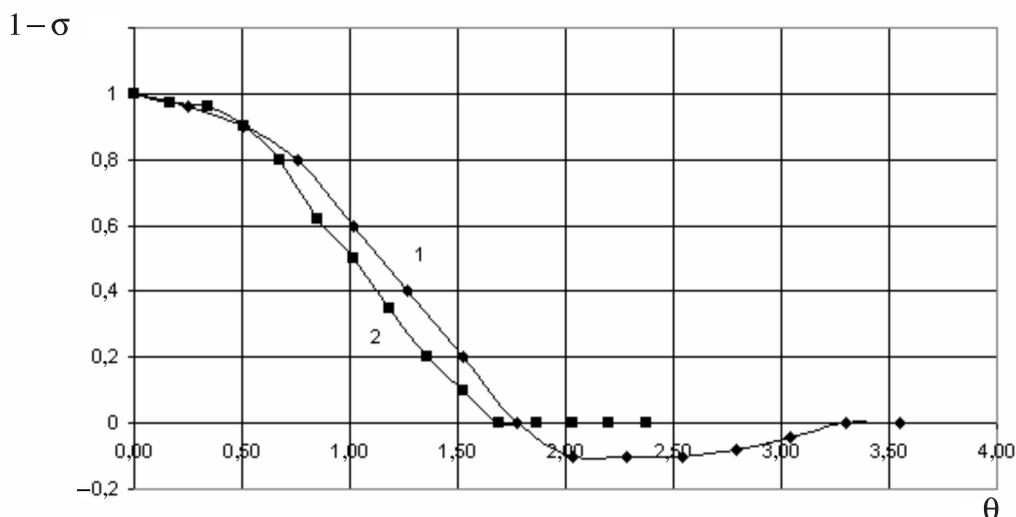


Рис. 4. Значения $1 - \sigma$ от величины безразмерного времени θ
1 – включение ЭГД ЭПП с ТС; 2 – отключение ЭГД ЭПП с ТС

Таблица 2

Расчет дополнительных параметров, необходимых для вычисления постоянных времени T_3^3, T_2^2 при включении ЭПП с ТС

θ	$1-\sigma$	$1-\theta$	$(1-\sigma) \cdot (1-\theta)$	$1-2 \cdot \theta + \frac{\theta^2}{2}$	$(1-\sigma) \cdot (1-2 \cdot \theta + \frac{\theta^2}{2})$
0,00	1	1,00	1	1,000	1,000
0,25	0,96	0,75	0,72	0,531	0,510
0,50	0,9	0,50	0,45	0,125	0,113
0,75	0,8	0,25	0,2	-0,219	-0,175
1,00	0,6	0,00	0	-0,500	-0,300
1,25	0,4	-0,25	-0,1	-0,719	-0,288
1,50	0,2	-0,50	-0,1	-0,875	-0,175
1,75	0	-0,75	0	-0,969	0,000
2,00	-0,1	-1,00	0,1	-1,000	0,100
2,25	-0,1	-1,25	0,125	-0,969	0,097
2,50	-0,1	-1,50	0,15	-0,875	0,088
2,75	-0,08	-1,75	0,14	-0,719	0,058
3,00	-0,04	-2,00	0,08	-0,500	0,020
3,25	0	-2,25	0	-0,219	0,000
3,50	0	-2,50	0	0,125	0,000
			$\Sigma = 2,765$		$\Sigma = 1,047$

где при включении ЭГД ЭПП с ТС в (10) имеем $\tau_{вкл} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $T_1 = 0,985 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $T_2^2 = 0,525 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2$; $T_3^3 = 0,105 \cdot 10^{-9} \text{ с}^3$, а при от-

ключении, соответственно, $\tau_{выкл} = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $T_1 = 1,475 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $T_2^2 = 0,94 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2$; $T_3^3 = 0,33 \cdot 10^{-9} \text{ с}^3$.

Таблица 3

Расчет дополнительных параметров, необходимых для вычисления постоянных времени T_3^3, T_2^2 при отключении ЭПП с ТС

θ	$1-\sigma$	$1-\theta$	$(1-\sigma) \cdot (1-\theta)$	$1-2 \cdot \theta + \frac{\theta^2}{2}$	$(1-\sigma) \cdot (1-2 \cdot \theta + \frac{\theta^2}{2})$
0,00	1	1,00	1	1	1
0,25	0,95	0,75	0,7125	0,53125	0,504688
0,50	0,9	0,50	0,45	0,125	0,1125
0,75	0,7	0,25	0,175	-0,21875	-0,15313
1,00	0,5	0,00	0	-0,5	-0,25
1,25	0,32	-0,25	-0,08	-0,71875	-0,23
1,50	0,1	-0,50	-0,05	-0,875	-0,0875
1,75	0	-0,75	0	-0,96875	0
2,00	0	-1,00	0	-1	0
2,25	0	-1,25	0	-0,96875	0
2,50	0	-1,50	0	-0,875	0
2,75	0	-1,75	0	-0,71875	0
3,00	0	-2,00	0	-0,5	0
3,25	0	-2,25	0	-0,21875	0
3,50	0	-2,50	0	0,125	0
			$\Sigma = 2,207$		$\Sigma = 0,896$

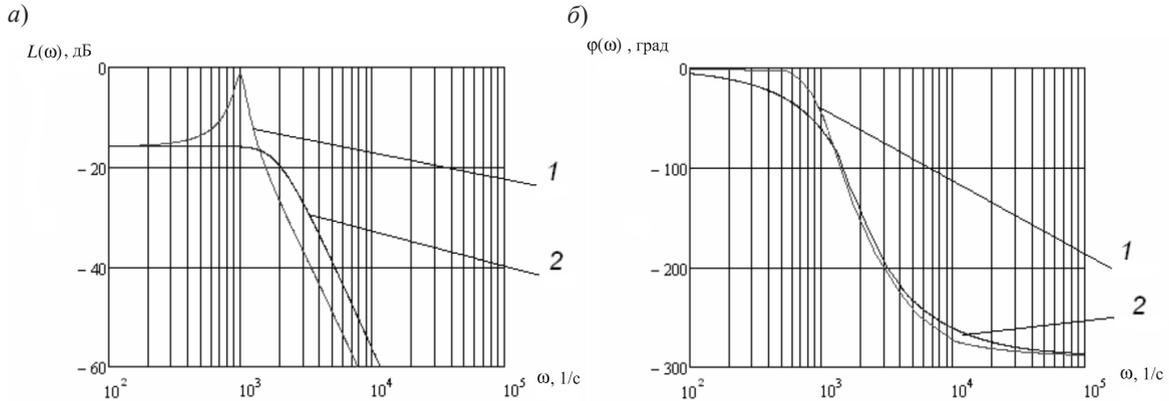


Рис. 5. Логарифмические частотные характеристики ЭГД ЭПП с ТС:
а – амплитудно-частотная; б – фазо-частотная
1 – при отключении ЭГД ЭПП с ТС; 2 – при включении ЭГД ЭПП с ТС

На основании передаточной функции (10) решением дифференциального уравнения третьего порядка методом Кордано при единичном ступенчатом входном сигнале находим выражение переходной характеристики для $t - \tau \geq 0$, представленной (см. рис. 3) в безразмерном виде:

$$\sigma(t - \tau) = \frac{p_{\text{вых}}(t - \tau)}{p_{\text{вых}}(\infty)} = 1 - Ae^{-a(t-\tau)} - \quad (11)$$

$$-(B \cos \omega_0(t - \tau) + C \sin \omega_0(t - \tau))e^{-c_1(t-\tau)},$$

где $A, B, C, a, c_1, \omega_0$ – постоянные величины.

Для ЭГД ЭПП с ТС имеем при включении преобразователя $A = 0,52; B = 0,48; C = 1,35; a = 2920; c_1 = 972; \omega_0 = 1243$, а при отключении, соответственно, $A = 1,26; B = -0,26; C = 1,1; a = 1252; c_1 = 810; \omega_0 = 1243$.

Рассчитанные по (10) переходные характеристики с достаточной для инженерных расчетов точностью совпадают с результатами эксперимента (см. рис. 3).

Соответствующие передаточной функции (3) логарифмические амплитудно-частотная $L(\omega)$ и фазо-частотная $\varphi(\omega)$ характеристики рассчитываются по формулам:

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{k}{\sqrt{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (T_1 \omega - T_3^3 \omega^3)^2}},$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{T_1 \omega - T_3^3 \omega^3}{1 - T_2^2 \omega^2}. \quad (12)$$

На рис. 5 а представлена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика, а на рис. 5 б – логарифмическая фазо-частотная характеристика для включения и отключения ЭГД ЭПП с ТС встречно направленными униполярными потоками ионов разных знаков, рассчитанная по выражениям (12) для коэффициента передачи $k = 0,16$ Па/В.

Таким образом, в данной работе экспериментально получены переходные характеристики ЭПП с ТС как при включении, так и при отключении. По переходным характеристикам найдены передаточные функции и частотные характеристики ЭПП с ТС для режимов включения и отключения. Эти данные необходимы при анализе электропневматических систем управления с разрабатываемыми преобразователями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харченко, А.Н. Разработка электропневматических следящих приводов для транспортных роботов на базе мехатронных компонентов [Текст] / А. Н. Харченко // Сб. тезисов XIX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием Экспериментальная робототехника. –СПб.: Высш. шк., 2008. –С. 56–60.
2. Батурич, В.А. Электромагнитный клапан для регулируемого импульсного напуска газа [Текст] / В.А. Батурич, А.Ю. Карпенко // Прикл. физ. –2010, –№ 1. –С. 120–123.
3. Бумагин, Г.И. ЭГД преобразователи энергии:

- Учеб. пособие [Текст] / Г.И. Бумагин, В.И. Суриков. –Омск.: ОмГТУ. –1999. –С. 70–72.
4. Нагорный, В.С. Численное моделирование турбулентности струи при ЭГД управлении струями в автоматических системах [Текст] / В.С. Нагорный, И.А. Машков //Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2010. –№ 2. –С. 182–186.
5. Нагорный, В.С. Электрофлюидные преобразователи [Текст] / В.С. Нагорный. –Л.: Судостроение, 1987. – 252 с.
6. Симою, М.П. Определение коэффициентов

передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования [Текст] / М.П. Симою. –М.: Автоматика и телемеханика, 1957. –Т. 18. –№ 6

7. Стефани, Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов [Текст] / Е.П. Стефани. –М.: Энергия, 1972. –С. 12–18.

УДК 681.5

Ю.В. Ильюшин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПОЛЯМИ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА

Туннельная печь – это электрическая, газовая, твердотопливная или иная печь непрерывного действия с обжиговым каналом, разделенным на зоны, имеющие постоянные температурные режимы. Туннельные печи конвейерного типа характеризуются постоянным движением изделия в обжиговом канале печи. В зависимости от назначения печи изделие может двигаться по вагонеткам на металлических рельсах или же на натяжной пластине, поверх которой укладываются изделия, подлежащие обработке.

Рассматривая современные электрические туннельные печи конвейерного типа, можно отметить большой расход потребляемой электроэнергии. Это связано с использованием сплошных нагревательных элементов, представленных как цилиндрические стержни из материалов на основе карбида кремния [1]. В случае, когда изделие меньше ширины вагонетки, процесс нагревания имеет большие потери, что приводит к неоправданному увеличению стоимости изделия. В связи с этим возникает необходимость разработки системы управления, оптимизирующей энергетические затраты и обеспечивающей равномерное распределение температурных полей по всему объему печи.

Постановка задачи

Поставим задачу проектирования системы управления температурным полем в рабочей зоне печи. При этом управление реализуется с

помощью импульсных нагревательных элементов (число таких элементов n). Использование импульсных нагревательных элементов обусловлено тем, что они имеют более простую схему технической реализации (по сути, реализуется релейный режим для каждого n -го нагревателя), и требуют меньшей аппаратной части, а значит, более надежны в эксплуатации.

Структурная схема системы управления приведена на рис. 1, где измерительное устройство снимает информацию о температурном поле в рабочей зоне камеры.

Рассмотрим математическую модель теплопроводности, решим задачу стабилизации температурного поля, составим функцию начального нагрева и промоделируем тепловой процесс. В общем виде для цилиндрического стержня математическая модель и граничные условия процесса передачи тепла выглядят следующим образом [2]:

$$T(0, r, t) = T(l, r, t) = 0; \quad (1)$$

$$T(x, R, t) = u(x, t); \quad \frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right); \quad (3)$$

$$0 < r < R; \quad 0 < x < l, \quad (4)$$

где $T(x, r, t)$ – функция, описывающая поведение температурного поля объекта управления; a^2 – за-



Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы регулирования

данный коэффициент температуропроводности материала объекта управления; R, l – заданные числа; x, r – координаты объекта управления; t – время; $u(x, t)$ – управляющее воздействие.

Так как температура в центре поперечного сечения стержня незначительно отличается от температуры его поверхности, предположим, что стержень достаточно тонкий, чтобы в любой момент времени температуру во всех точках поперечного сечения можно было считать одинаковой. Другими словами, будем считать цилиндр пространственно одномерным. При этом сохраним граничные условия, считая, что граница – это не только концы стержня, но и его боковая поверхность. Внесем указанное граничное условие в правую часть основного уравнения. Добавим нулевое начальное условие.

Решение задачи стабилизации температурного поля изотропного стержня

Рассмотрим задачу стабилизации температуры на уровне некоторого значения $T_{зад}$. В первоначальный момент времени $\tau_0 = 0$ включаются все нагревательные элементы. Каждый из импульсных нагревательных элементов оказывает влияние на все точки стержня. Значение температуры в произвольной фиксированной точке x_j для единичной мощности излучателя может быть рассчитано по функции Грина, представленной в виде бесконечного ряда Фурье [2]:

$$T(x_j, t, \tau_0) = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i, \quad (5)$$

где n – номер слагаемого ряда Фурье; k – количество членов ряда Фурье; l – длина стержня; t – время; x – точка расположения датчика температуры; ξ – точка расположения нагревательного элемента; τ – момент включения нагревательного элемента; d – количество источников; a^2 – заданный коэффициент температуропроводности материала объекта управления [3].

При увеличении времени t функция $T(x, t, \tau_0)$ будет убывать. В случае достижения в какой-то точке x_j значения $T_{зад}$ в момент времени τ_1 включается нагревательный элемент, соответствующий датчику с номером j , и оказывает влияние на все точки [4]. При этом продолжается действие всех нагревательных элементов, включенных при значении $\tau_0 = 0$. Таким образом, получим общий вид выходной функции:

$$T(x_j, t, \tau) = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \sum_{p=1}^k \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_p) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \times \sin \frac{\pi n}{l} \xi_{z(p)}, \quad (6)$$

где $p = 1, 2, 3, \dots$ – порядковый номер нагревательного элемента; $z(p)$ один из нагревательных элементов; τ_p – момент времени включения нагревательного элемента под номером $z(p)$. Или $T(x_j, t, \tau) = T(x_j, t, \tau_0) + \sum_p T(x_j, t - \tau_p)$.

Для нахождения времени и координат точки первого достижения функцией $T(x, t, \tau)$ значения $T_{зад}$, преобразуя выражение $T(x_j, t, \tau_0)$, получим:

$$T(x, t) = \frac{2}{l} \left(\exp \left[- \left(\frac{\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi}{l} x \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i + \exp \left[- \left(\frac{2\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{2\pi}{l} x \sum_{i=1}^d \sin \frac{2\pi}{l} \xi_i + \exp \left[- \left(\frac{3\pi a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{3\pi}{l} x \sum_{i=1}^d \sin \frac{3\pi}{l} \xi_i + \dots \right). \quad (7)$$

При четных значениях n положительные и отрицательные составляющие суммы $\sum_{i=1}^d \sin \frac{n\pi}{l} \xi_i$ взаимно исключают друг друга [5]. При нечетных значениях n , $\sum_{i=1}^d \sin \frac{n\pi}{l} \xi_i = \sum_{i=1}^{d/n} \sin \frac{n\pi}{l} \xi_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i$. Тогда получим:

$$T(x, t) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \frac{1}{2n-1} \exp \left[- \left(\frac{(2n-1)\pi a}{l} \right)^2 t \right] \times \sin \frac{(2n-1)\pi}{l} x \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i. \quad (8)$$

Преимущество полученной формулы в том, что действие нагревательных элементов выражается с помощью только одной первой гармоники ряда Фурье. Величина $\frac{2}{l} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i$ является постоянной относительно x и t . Ее значение зависит только от числа нагревательных элементов. При значениях $t = 0$, $k = 3$ и $\frac{2}{l} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i = 1$ формула (8) примет вид $T(x, 0) = \sin \frac{\pi}{l} x + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi}{l} x + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi}{l} x$. При росте времени t каждое из слагаемых формулы (11) будет убывать. Влияние на итоговую сум-

му второго слагаемого будет в $3 \times \exp\left[8\left(\frac{\pi a}{l}\right)^2 t\right]$ раз меньше первого [6]. С заданной точностью ε можно определить значение t^* , начиная с которого слагаемым с номером n можно пренебречь:

$$t^* \geq \frac{1}{n^2 - 1} \left(\frac{l}{\pi a}\right)^2 \ln \frac{1}{n\varepsilon}. \quad (9)$$

Таким образом, в момент времени $t \geq \frac{1}{8} \times \left(\frac{l}{\pi a}\right)^2 \ln \frac{1}{3\varepsilon}$ функция, определяющая распределение температурного поля, будет выражаться через одну первую составляющую ряда Фурье:

$$T(x, t) = \frac{2}{l} \exp\left[-\left(\frac{\pi a}{l}\right)^2 t\right] \sin \frac{\pi}{l} x \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i. \quad (10)$$

В этом случае функция, убывая, достигнет значения $T_{\text{зад}}$ в крайних точках установки датчиков. Пусть $x_{\text{кр}}$ – точка установки крайнего датчика, тогда время, при котором датчик впервые зафиксирует значение $T_{\text{зад}}$, можно определить по формуле:

$$\tau_1 = \left(\frac{l}{\pi a}\right)^2 \ln \left(\frac{2 \sin \frac{\pi}{l} x_{\text{кр}} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i}{l T_{\text{зад}}} \right), \quad (11)$$

при выполнении условия [7]:

$$2 \sin \frac{\pi}{l} x_{\text{кр}} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i \geq l T_{\text{зад}}. \quad (12)$$

В момент времени τ_1 нагревательный элемент, соответствующий крайним датчикам, вырабатывает сигнал:

$$T(x, t - \tau_1) = \frac{2}{l} \sum_{n=1}^k \exp\left[-\left(\frac{\pi a}{l}\right)^2 (t - \tau_1)\right] \times \sin \frac{\pi n}{l} x \sin \frac{\pi n}{l} \xi_{\text{кр}}. \quad (13)$$

Этот сигнал добавляется к имеющемуся значению $T(x, t)$. В результате наложения сигналов, при значении $t \geq \tau_1$ для середины отрезка, получим $T(x, t, \tau_1) = T(x, t) + 2T(x, t - \tau_1)$. Импульс, приложенный в момент τ_1 в точке ξ_1 , с течением времени $t > \tau_1$ оказывает воздействие на все точки отрезка. Время «прихода» максимума этого сигнала для всех точек различно. Это время зависит от расстояния между точкой включения нагревательных элементов и точкой наблюдения, а также от близости нагревательного элемента к концу отрезка. От длины отрезка зависит значение максимальной температуры, «дошедшей» от нагревательного элемента до точки наблюде-

ния [8]. В связи с тем, что на концах стержня во время всего процесса температура поддерживается равной нулю, максимальная температура с течением времени будет стремиться к середине стержня. В качестве точки наблюдения будем рассматривать точку $x = \frac{l}{2}$. Выражение функции нагревательного элемента применительно к неограниченной прямой имеет вид:

$$G(x, \xi, t - \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a^2 (t - \tau)}} \exp\left[-\frac{(x - \xi)^2}{4a^2 (t - \tau)}\right]. \quad (14)$$

Используя (14), получены формулы, выражающие время достижения максимального значения температуры в середине отрезка, при воздействии нагревательного элемента $\xi \in \left(0; \frac{l}{2}\right)$:

$$t_m = \begin{cases} \frac{\left(\frac{l}{2} - \xi_1\right)^2}{2a^2} + \tau_1; & \text{при } \frac{3l}{10} \leq \xi_1 \leq \\ \frac{\left(\frac{l}{10} - \xi_1\right)^2}{2a^2} + \frac{l^2}{25a^2} + \tau_1; & \text{при } \frac{l}{10} \leq \xi_1 \leq \\ \frac{\left(\frac{l}{10} - \xi_1\right)^2}{4a^2} + \frac{l^2}{25a^2} + \tau_1; & \text{при } 0 \leq \xi_1 \leq \end{cases} \quad (15)$$

В момент «прихода» максимума сигнала значение температуры в середине отрезка будет определяться формулой

$$T\left(\frac{l}{2}, t_m, \tau_1\right) = T\left(\frac{l}{2}, t_m\right) + 2T\left(\frac{l}{2}, t_m - \tau_1\right). \quad (16)$$

Отклонение температуры от заданного значения можно определить из равенства:

$$\Delta_1 = \left| T\left(\frac{l}{2}, t_m, \tau_1\right) - T_{\text{зад}} \right|. \quad (17)$$

Таким образом, основываясь на функции начального нагрева и законах поведения теплового процесса в пространственно одномерном объекте, поставим задачу поиска места и времени включения импульсных нагревательных элементов. В качестве объекта управления рассмотрим цилиндрический стержень радиуса R , длиной l и температуропроводностью материала a^2 (рис. 2). Нагревающим воздействием будем считать тепловой поток, создаваемый секционным нагревателем, распределенным по боковой поверхности цилиндра. Наблюдение за тем-

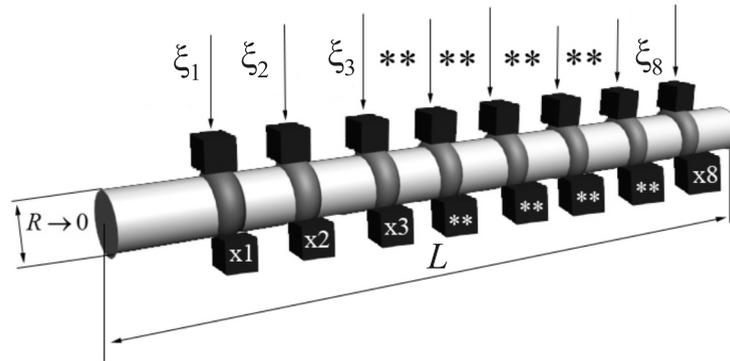


Рис. 2. Объект управления – цилиндрический стержень

пературой осуществим с помощью датчиков; условно примем, что они находятся на том же поперечном срезе, что и нагревательный элемент. Включение нагревательных элементов осуществляется с помощью релейных элементов. На концах стержня поддерживается нулевая температура.

Из граничных условий видно, что границы объекта имеют нулевую температуру, входное воздействие распространено по границе стержня и выполняется условие симметрии температурных полей.

Промоделируем поведение температурного поля в стержне согласно полученной функции (6). С этой целью для каждой секции туннельной печи выведем алгоритм расчета места и времени включения импульсного нагревательного элемента. Так как во всех секциях печи тепловые процессы одинаковы, разница заключается в заданной температурной кривой и времени нахождения в секции. Алгоритм идентичен для всех секций печи, отличаются только константы секции и входное значение функции, которым является выходное значение предыдущей функции. Для этого выра-

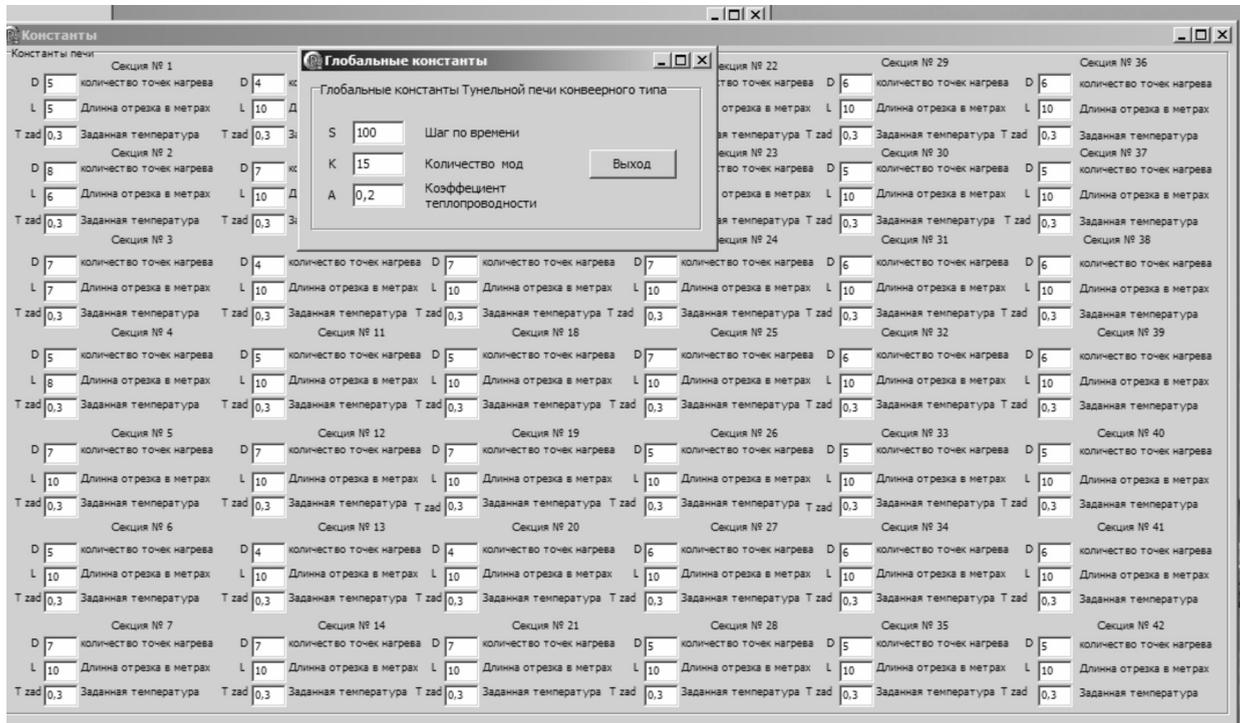


Рис. 3. Окно «констант печи» и «глобальные константы»

зим переменную ξ , определяющую местонахождение нагревательного элемента, и переменную t , определяющую время включения:

$$\xi = \arcsin\left(\frac{\frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{\pi n a}{l}\right)^2 (t - \tau)\right] \sin \frac{\pi n}{l} x}{G(x, t, \xi, \tau)}\right) \frac{l}{n\pi}; \quad (18)$$

$$\tau_1 = \left(\frac{l}{\pi a}\right)^2 \ln \left(\frac{2 \sin \frac{\pi}{l} x_{кр} \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l} \xi_i}{IT_{зап}} \right). \quad (19)$$

Проведем расчет значений температурного поля в каждой из сорока двух секций. Для этого в среде Delphi напишем программу, с помощью которой можно произвести расчет места и времени включения каждого нагревательного элемента для каждой из 42 позиций. Для этого программе необходим ввод 129 переменных (рис. 3), характеризующих физические параметры каж-

дой из секции печи (длина секции, необходимое значение температуры в секции, количество нагревательных элементов). Ввиду идентичности алгоритма для всех секций, покажем результат моделирования для первых четырех секций печи. Задавая различные параметры в разработанную программу, можно получить расчет мест нахождения нагревательных элементов в зависимости от заданной кривой температурного процесса.

Точность нахождения места установки нагревательного элемента будет зависеть от количества расположенных нагревательных элементов, т. к. программа будет включать только те нагревательные элементы, которые необходимы для вывода объекта управления на нужный температурный режим. Для подтверждения сделанных выводов проведем исследования процесса нагрева в цилиндре. Рассчитаем места

Место и время включения нагревательного элемента в координате x (м) во время t (с)

Длина секции, м			
5	6	7	8
Значение температурного поля			
Нагревательный элемент			
			Включился
4	1	1	1
9,43	10	20	25,3
3	8	6	9
9,33	10	20	25,3
2	6	5	6
9,27	10	20	25,3
2	6	4	4
9,26	10	20	25,4
2	6	4	4
9,23	10	20	25,3
3	8	4	4
9,23	10	20	25,2
4	1	5	5
9,23	10	20	25,4
		4	6
		30	25,1
		6	9
		30	25,1
		1	1
		30	24,7

включения нагревательных элементов для четырех секций различной длины, но с одинаковым числом нагревательных элементов. Введем первичные значения основных параметров объекта: $a^2 = 0,01 \text{ м}^2/\text{с}$; $x_1 = \xi_1 = 1 \text{ м}$; $T_{\text{зад}} = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$; $k = 10$; $d = 9$; $\xi_i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$. Зададим для каждой секции различную длину (5, 6, 7, 8 м). Полученные результаты показывают, что при фиксированной длине стержня включаются не все нагревательные элементы. Так, например, в секции 1 (см. табл.), длина которой составляет 5 м, включаются только 4, 3, 2 нагревательные элемента, следовательно, нет необходимости размещать там 10 нагревательных элементов.

Также стоит отметить тот факт, что согласно исследованиям время включения последующих нагревательных элементов приблизительно равно. Что, в свою очередь, указывает на то, что тепловые процессы, протекающие в изотропных телах, стабильны.

В статье рассмотрена возможность установки в электрических туннельных печах конвейерного типа секционных импульсных нагревателей.

Анализ результатов работы описанного программного комплекса по стабилизации темпера-

турных полей показал возможность вывода печи на необходимый температурный диапазон за счет использования импульсных нагревательных элементов и возможность стабилизации температурного поля в пределах допустимых значений. Рассмотрена зависимость температурного режима от длины секции.

Получены формулы для расчета места и времени включения температурных источников.

Разработанный программный комплекс может применяться для любых туннельных печей вне зависимости от технологического процесса.

Универсальность алгоритма программного продукта делает возможным его применение путем совместного использования с аппаратной частью туннельной печи.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что при конструировании туннельных печей конвейерного типа нет смысла в установке сплошных нагревательных элементов. Достаточно рассчитать места включения нагревательных элементов, установить в них импульсные точечные нагревательные элементы и включать их на основе релейного принципа управления для вывода секции на нужный режим работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карташов, Э.М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел [Текст] / Э.М. Карташов. –М.: Высш. шк., 2001. –550 с.
2. **Тихонов, А.Н.** Уравнения математической физики [Текст] / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. –М.: Наука, 1972. –736 с.
3. **Душин, С.Е.** Теория автоматического управления [Текст] / С.Е. Душин, Н.С. Зотов [и др.]; Под ред. В.Б. Яковлева. –М.: Высш. шк., 2003. –567 с.
4. **Першин, И.М.** Анализ и синтез систем с распределенными параметрами [Текст] / И.М. Першин. –Пятигорск: Изд-во РИА-КМВ, 2007. –244 с.
5. **Чернышев, А.Б.** Модификация критерия абсолютной устойчивости для систем с распределенными параметрами [Текст] / А.Б. Чернышев. –Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2008. –С. 49–69.
6. **Чернышев, А.Б.** Исследование нелинейных систем с распределенными параметрами [Текст] / А.Б. Чернышев. –Кисловодск: Изд-во МИЛ, 2009. – 208 с.
7. **Чернышев, А.Б.** Устойчивость распределенных систем с дискретными управляющими воздействиями [Текст] / А.Б. Чернышев, Ю.В. Ильюшин // Изв. Южного федерального ун-та. –Таганрог, 2010. –№ 12. –С 166–171.
8. **Чернышев, А.Б.** Исследование нелинейных распределенных систем управления температурными полями [Текст] / А.Б. Чернышев // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Сер. Техн. науки. Спецвыпуск. Математическое моделирование и компьютерные технологии. –Новочеркасск, 2004. –С. 57–60.

УДК 681.5

А.Л. Ляшенко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МЕТОДОМ РАСШИРЕННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

При решении многих практических задач, связанных с синтезом систем с распределенными параметрами (СРП), возникает необходимость в расчете настроек распределенных регуляторов. На сегодняшний день известны такие направления в решении проблемы синтеза регуляторов для распределенных систем [1], как аналитическое конструирование оптимальных регуляторов, частотный метод синтеза, параметрический синтез регуляторов.

При синтезе систем управления с распределенными параметрами в некоторых случаях возникает необходимость обеспечить заданный запас устойчивости, например, заданной степенью колебательности $m_{зад}$. Перечисленные выше методы синтеза такой возможности не предоставляют. Решение этой задачи можно найти с помощью расширенных частотных характеристик (РЧХ) [2, 3].

Знание области устойчивости для СРП позволяет ограничить область поиска оптимальных настроек. Поиск настроек может производиться путем сканирования (в т. ч. с переменным шагом) только области устойчивости.

Рассмотрим процедуру определения области устойчивости СРП на примере системы управления температурным полем объекта с распределенным регулятором, реализующим пропорционально-интегральный закон управления. Структурная схема системы управления изображена на рис. 1.

Объект управления представлен на рис. 2.

Математическая модель объекта управления имеет вид:

$$\frac{\partial Q(x, y, z, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \right.$$

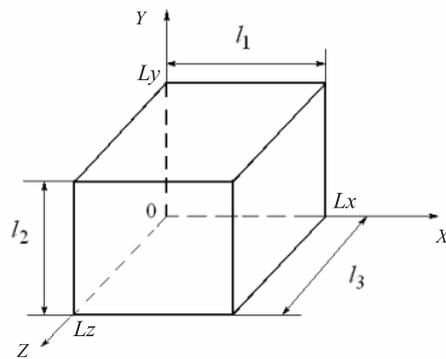


Рис. 2. Объект управления

$$\left. + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z.$$

Граничные и начальные условия задаются следующими соотношениями:

$$Q(x, 0, z, \tau) = Q(x, L_y, z, \tau) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q(0, y, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial Q(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} = 0,$$

$$\lambda \frac{\partial Q(x, y, L_z, \tau)}{\partial z} = U(x, y, \tau), \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$Q(x, y, z, 0) = 0. \quad (5)$$

Передаточная функция синтезируемого регулятора согласно [1] имеет вид:

$$W(x, y, p) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] +$$

$$+ E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p},$$

где E_1 – общий коэффициент усиления пространственно-усилительного звена; n_1 – весовой коэффициент ($n_1 \geq 1$); E_4 – общий коэффициент усиления пространственно-интегрирующего звена; n_4 – весовой коэффициент ($n_4 \geq 1$); ∇^2 – лапласиан.

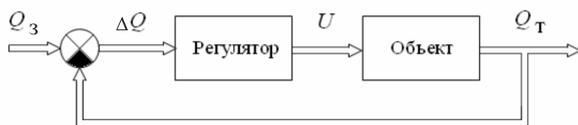


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Передаточная функция регулятора, записанная с использованием обобщенной координаты [1], может быть представлена в виде следующего соотношения:

$$W(G, p) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G \right] \cdot \frac{1}{p}, \quad 0 \leq G \leq \infty, \quad (6)$$

где $G = \Psi_\eta + \overline{\Psi}_\gamma$ – обобщенная координата.

Математическая модель объекта описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Передаточные функции таких объектов управления могут быть представлены в виде совокупности передаточных функций по каждой пространственной моде [1]. Известно [4], что для тепловых объектов управления передаточные функции по каждой моде входного воздействия могут быть аппроксимированы передаточными функциями вида:

$$W_\eta(p) = \frac{K_\eta}{T_\eta \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau_\eta p}, \quad (\eta = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

Значения параметров K_η , T_η , τ_η определяются по результатам численного моделирования. При определении указанных параметров для $\eta = 1, 3$ учитывались динамические свойства процесса распространения теплового поля внутри объекта.

Вычисленные значения равны:

$$K_1 = 0,7; \quad T_1 = 70; \quad \tau_1 = 6;$$

$$K_3 = 0,5; \quad T_3 = 67; \quad \tau_3 = 6.$$

Для частотного анализа методом расширенных частотных характеристик положим в (6) и (7) $p = \omega(j - m)$, получим:

$$W(G, m, \omega) = E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G \right] \cdot \frac{1}{\omega(j - m)},$$

$$W_\eta(m, \omega) = \frac{K_\eta}{T_\eta \cdot \omega(j - m) + 1} \cdot e^{-\tau_\eta \cdot \omega(j - m)}.$$

Запишем характеристическое выражение замкнутой системы:

$$D_\eta(G, p) = \left(E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right] p + E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G \right] \right) K_\eta e^{-\tau_\eta p} + p(T_\eta p + 1) =$$

$$= T_\eta p^2 + p + \left(E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right] p + E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G \right] \right) K_\eta e^{-\tau_\eta p}.$$

Подстановка $p = \omega(j - m)$ дает:

$$D_\eta(G, m, \omega) = T_\eta \omega^2 (j - m)^2 + \omega(j - m) + K_\eta \left(E_1 \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right] \omega(j - m) + E_4 \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G \right] (\cos \tau_\eta \omega - j \sin \tau_\eta \omega) e^{\tau_\eta \omega m} \right) =$$

$$= -T_\eta \omega^2 - j2T_\eta \omega^2 + T_\eta \omega^2 m^2 + j\omega - \omega m + jK_\eta E_1 \frac{n_1 - 1 + G}{n_1} \omega e^{\tau_\eta \omega m} \cos \tau_\eta \omega -$$

$$- K_\eta E_1 \frac{n_1 - 1 + G}{n_1} m e^{\tau_\eta \omega m} \cos \tau_\eta \omega +$$

$$+ K_\eta E_1 \frac{n_1 - 1 + G}{n_1} \omega e^{\tau_\eta \omega m} \sin \tau_\eta \omega +$$

$$+ jK_\eta E_1 \frac{n_1 - 1 + G}{n_1} m e^{\tau_\eta \omega m} \sin \tau_\eta \omega +$$

$$+ K_\eta E_4 \frac{n_4 - 1 + G}{n_4} e^{\tau_\eta \omega m} \cos \tau_\eta \omega -$$

$$- jK_\eta E_4 \frac{n_4 - 1 + G}{n_4} e^{\tau_\eta \omega m} \sin \tau_\eta \omega = \text{Re}_D + \text{Im}_D, \quad (9)$$

где

$$\text{Re}_D = -T_\eta \omega^2 + T_\eta \omega^2 m^2 - \omega m -$$

$$- K_\eta E_1 \frac{n_1 - 1 + G}{n_1} m e^{\tau_\eta \omega m} \cos \tau_\eta \omega +$$

$$+ K_\eta E_1 \frac{n_1 - 1 + G}{n_1} \omega e^{\tau_\eta \omega m} \sin \tau_\eta \omega +$$

$$+ K_\eta E_4 \frac{n_4 - 1 + G}{n_4} e^{\tau_\eta \omega m} \cos \tau_\eta \omega;$$

$$\text{Im}_D = -2T_\eta \omega^2 + \omega +$$

$$+ K_\eta E_1 \frac{n_1 - 1 + G}{n_1} \omega e^{\tau_\eta \omega m} \cos \tau_\eta \omega +$$

$$+ K_\eta E_1 \frac{n_1 - 1 + G}{n_1} m e^{\tau_\eta \omega m} \sin \tau_\eta \omega -$$

$$- K_\eta E_4 \frac{n_4 - 1 + G}{n_4} e^{\tau_\eta \omega m} \sin \tau_\eta \omega.$$

Приравнивание полученных выражений к нулю дает систему из двух уравнений. Решение

системы относительно общих коэффициентов усиления E_1 и E_4 дает следующий результат:

$$E_1 = \frac{[(T_\eta \omega(1 - m^2) + m)\sin \tau_\eta \omega - (1 - 2T_\eta m \omega)\cos \tau_\eta \omega]n_1}{(n_1 - 1 + G)K_\eta e^{\tau_\eta \omega m}}; \quad (10)$$

$$E_4 = \frac{\omega(1 + m^2)[T_\eta \omega \cos \tau_\eta \omega + (1 - T_\eta \omega m)\sin \tau_\eta \omega]n_4}{(n_4 - 1 + G)K_\eta e^{\tau_\eta \omega m}}. \quad (11)$$

Рассмотрим случай при значениях весовых коэффициентов $n_1 = 10\,000$, $n_4 = 10\,000$. Произведем расчеты при $\eta, \gamma = 1$, значении обобщенной координаты $G_1 = 12,56$ и степени колебательности $m_{\text{зад}} = 0,221$. Далее, изменяя частоту ω от нуля до бесконечности, по полученным выражениям (10, 11) в пространстве E_1 и E_4 строится граница заданной степени колебательности, которая называется *кривой равной степени колебательности*. Результаты моделирования показали, что точки, принадлежащие этой кривой, отвечают требованиям обеспечения запаса устойчивости заданной степени колебательности $m = m_{\text{зад}}$.

Полученная кривая равной степени колебательности делит всю плоскость настроек E_1 и E_4 на две области (рис. 3).

В связи с [2], настройки сосредоточенного регулятора, лежащие над кривой, соответствуют степени колебательности меньше заданной $m < m_{\text{зад}}$, а настройки, лежащие под кривой, соответствуют степени колебательности больше заданной $m > m_{\text{зад}}$.

Рассмотрим случай при значениях весовых коэффициентов $n_1 = 10\,000$, $n_4 = 10\,000$, значении обобщенной координаты $G_1 = 12,56$ и, изменяя значение степени колебательности, произведем построение линий равной степени колебательности. Примем следующие значения степени колебательности: $m = 0$, $m_{\text{зад}} = 0,221$, $m_1 = 0,119$, $m_2 = 0,336$.

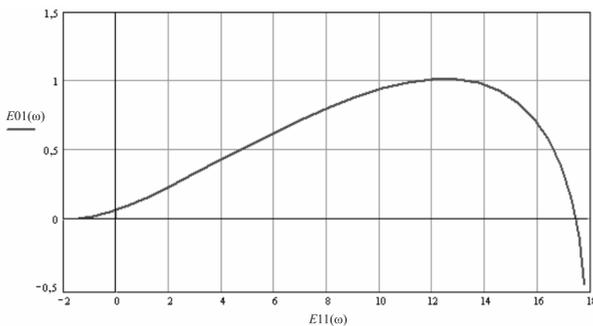


Рис. 3. Линия равной степени колебательности при $m_{\text{зад}} = 0,221$

Задание различных значений степени колебательности позволяет получить семейство кривых, причем $m > m_{\text{зад}}$, а $m < m_{\text{зад}}$, и все они располагаются ниже внешней кривой, ограничивающей область настроек регулятора и построенной при запасе устойчивости $m = 0$. Результаты моделирования показали, что внутри этой области система регулирования будет устойчивой.

Разработанная методика применена для определения области устойчивости системы управления температурными полями защитного термокожуха для видеокамеры охранного телевидения. Полная математическая модель рассматриваемого объекта управления представлена в [5]. Для указанного объекта рассчитаны настройки распределенного ПИ-регулятора. Как показали результаты синтеза, настройки распределенного регулятора располагаются в области устойчивости, рассчитанной с помощью представленной выше методики.

Данная методика может использоваться для определения области допустимых значений настроек распределенных ПИ-регуляторов и решения вопроса обеспечения устойчивости для систем с распределенными параметрами заданной структуры и распределенным регулятором, реализующим пропорционально-интегральный закон управления.

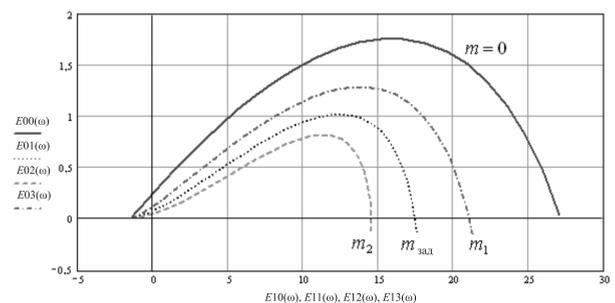


Рис. 4. Линии равной степени колебательности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Першин, И.М.** Анализ и синтез систем с распределенными параметрами [Текст] / И.М. Першин. –Пятигорск: Изд-во РИА на КМВ, 2007. –244 с.
2. **Лазарева, Т.Я.** Основы теории автоматического управления: Учеб. пособие [Текст] / Т.Я. Лазарева, Ю.Ф. Мартемьянов. –Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. –308 с.
3. **Ляшенко, А.Л.** Частотный анализ объектов с распределенными параметрами с помощью расширенных частотных характеристик [Текст] / А.Л. Ляшенко // Матер. VI науч. конф. Управление и информационные технологии (УИТ–2010). –СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2010. –С. 65–70.
4. **Рапопорт, Э.Я.** Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами [Текст] / Э.Я. Рапопорт. –М.: Высш. шк., 2003. –299 с.
5. **Ляшенко, А.Л.** Математическое моделирование распределенного объекта управления с подвижным источником воздействия [Текст] / А.Л. Ляшенко, О.И. Золотов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 1 (115). –С. 113–117.

ИЕРАРХИЯ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Задачи проектирования специальных грузоподъемных механизмов и машин (СГПМ) так или иначе связаны с созданием базы данных (БД) объектно-реляционного типа, предназначенной для хранения информации об объектах СГПМ и связях между ними. Объекты в реляционных таблицах БД могут быть как независимыми друг от друга (так называемые «плоские» таблицы), так и вложенными (иерархические данные с логическими связями «предок-потомок»).

Существуют различные методы моделирования иерархии в реляционных БД [2], но они не всегда эффективны применительно к проектированию СГПМ. Классификация объектов СГПМ имеет разветвленную древовидную структуру, а отдельные механизмы СГПМ, в свою очередь, имеют собственную иерархию, как, например, системы изменения вылета стреловых кранов (рис. 1). Современные БД на промышленных предприятиях представляют собой огромные хранилища данных, которые непрерывно наращиваются в процессе эксплуатации.

При проектировании создаются новые конструкции СГПМ, а для их описания применяется все больше технических характеристик [1]. Применительно к СГПМ классические методы организации иерархии оказываются неэффективными, а иногда полностью неработоспособными по причине наличия рекурсии.

В данной статье предложен ряд новых методов моделирования иерархических данных в реляционных БД, отличающихся большей эффективностью и устойчивостью к возможным ошибкам в логических связях. Даны практические рекомендации по выбору наиболее подходящей модели данных при проектировании СГПМ.

Теоретический анализ методов организации иерархии данных

Классическая реализация неограниченной иерархии данных показана на рис. 2. Множеством допустимых ссылок на предков (PARENT_ID) является диапазон значений первичного ключа (ID) плюс одно пустое значение (NULL), используемое для обозначения отсутствия родительского объекта:

$$V = \{v_0\} \cup P = \{v: v \in P \vee v_0\},$$
$$P = \{1, \dots, k\},$$
$$V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_k\},$$
(1)

где V – множество значений ссылок на предков; P – диапазон значений первичного ключа, $P = \{1, \dots, k\}$; k – максимально допустимое значение P ; v_0 – значение, обозначающее отсутствие родительского элемента, $v_0 = \emptyset$.

Структура со ссылкой на предка имеет целый ряд недостатков:

- необходимость рекурсивных запросов при получении полного пути от произвольного узла до корня дерева;

- наличие рекурсии при вычислении уровня вложенности объекта;

- сложность получения потомков, особенно не-прямых;

- отсутствие контроля правильности ссылок на родителя, ошибочные значения которых могут привести к закливанию рекурсивных запросов;

- удаление и переподчинение иерархических объектов тоже крайне проблематично, поскольку надо обеспечить целостность ветви потомков, чтобы в таблице не осталось объектов-«сирот».

Например, для иерархии систем изменения вылета стреловых кранов (см. рис. 1) все механизмы-потомки третьего поколения (гидрав-

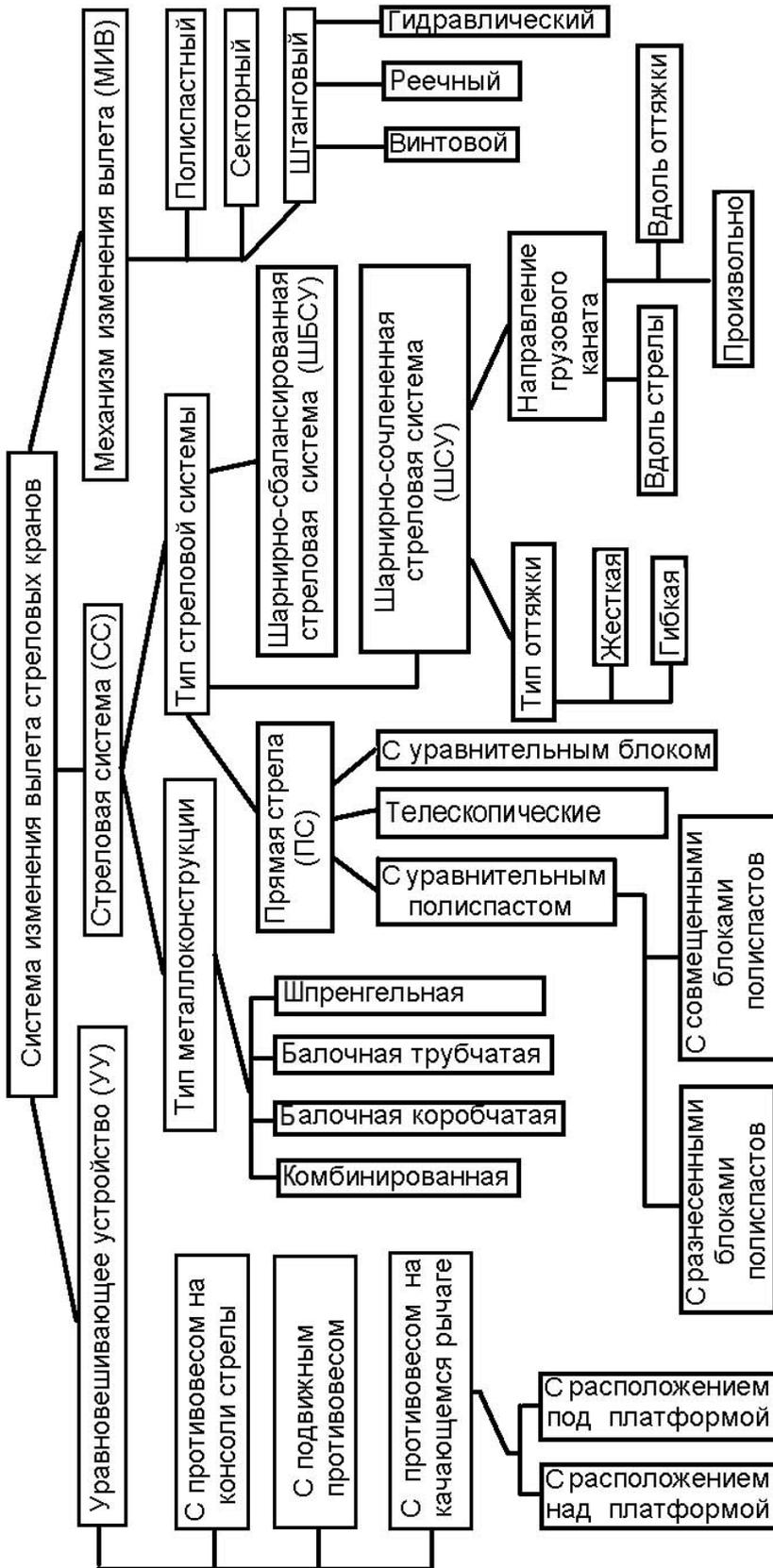
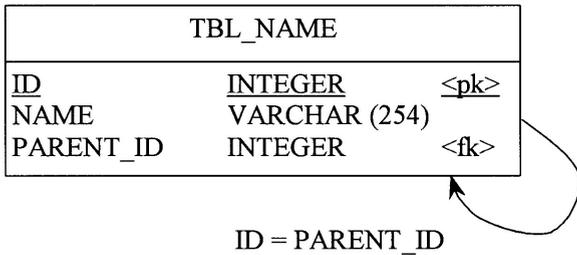


Рис. 1. Иерархия системы изменения вылета стреловых кранов



ID = PARENT_ID

Рис. 2. Модель со ссылкой на предка и неограниченной иерархией

лический, речной, винтовой, шпренгельный и т. д.) можно получить посредством следующего рекурсивного SQL-запроса:

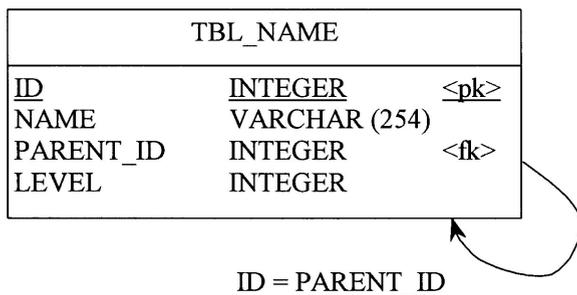
```
SELECT * FROM TBL_NAME WHERE
    PARENT_ID IN
    (SELECT ID FROM TBL_NAME WHERE
        PARENT_ID IN
        (SELECT ID FROM TBL_NAME WHERE
            PARENT_ID IS NULL))
```

Проблему быстрого получения уровня вложенности можно решить добавлением в структуру со ссылкой на предка (см. рис. 2) нового поля (LEVEL) для хранения уровня иерархии объекта, как показано на рис. 3.

Тогда SQL-запрос (2) на выборку всех механизмов изменения вылета стреловых кранов третьего поколения не содержит рекурсию:

```
SELECT * FROM TBL_NAME WHERE
    LEVEL = 3
```

Другой модификацией структуры со ссылкой на предка (см. рис. 2) является иерархия с хранением границ ветви (рис. 4). Эта реализация отличается наличием двух полей (ID_LOW и ID_HIGH) для указания начала и конца диапазона первичных ключей, где содержатся все потомки.



ID = PARENT_ID

Рис. 3. Модель иерархии с хранением уровня вложенности

С ростом размера таблицы данных возникает опасность того, что модификация одного объекта иерархии или целой ветви повлечет за собой регенерацию всех первичных ключей. Однако в SQL-запросе рекурсия отсутствует. В следующем примере иерархии СГПМ (см. рис. 1) выбираются все уравновешивающие устройства:

```
SELECT * FROM TBL_NAME
WHERE ID_LOW >= 1 AND ID_HIGH <= 3
```

Несмотря на отсутствие рекурсии в SQL-запросах, модели (рис. 3 и 4) по-прежнему содержат рекурсивную связь ID = PARENT_ID. Поэтому данные решения половинчатые. На больших наборах данных, какими являются СГПМ, рекурсия приводит к значительному снижению производительности и даже отказу в обслуживании сервера БД, что совершенно недопустимо в системах масштаба предприятия.

Безрекурсивные методы моделирования иерархических объектов

Чтобы целиком избавиться от рекурсивной связи в структуре данных, предлагается ввести дополнительные ограничения.

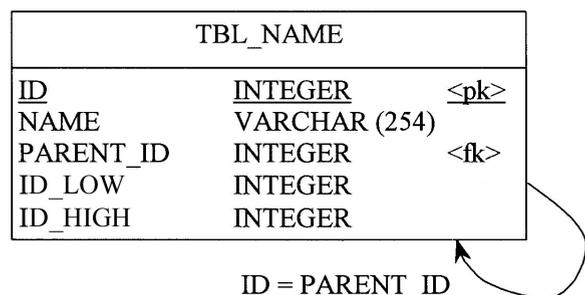
Ограничение 1. Конечное число уровней вложенности.

Ограничение 2. Максимальное число непосредственных потомков.

Ограничение 3. Фиксированное количество объектов одного уровня.

Например, иерархия объектов СГПМ (рис. 1) может быть ограничена 5 уровнями. Для каждого уровня вложенности можно создать отдельную таблицу, позволяющую хранить неограниченное число потомков. На рис. 5 приведен пример трехуровневой структуры.

Полный путь от объекта до корня дерева определяется составным первичным ключом.



ID = PARENT_ID

Рис. 4. Модель иерархии с хранением границ ветви

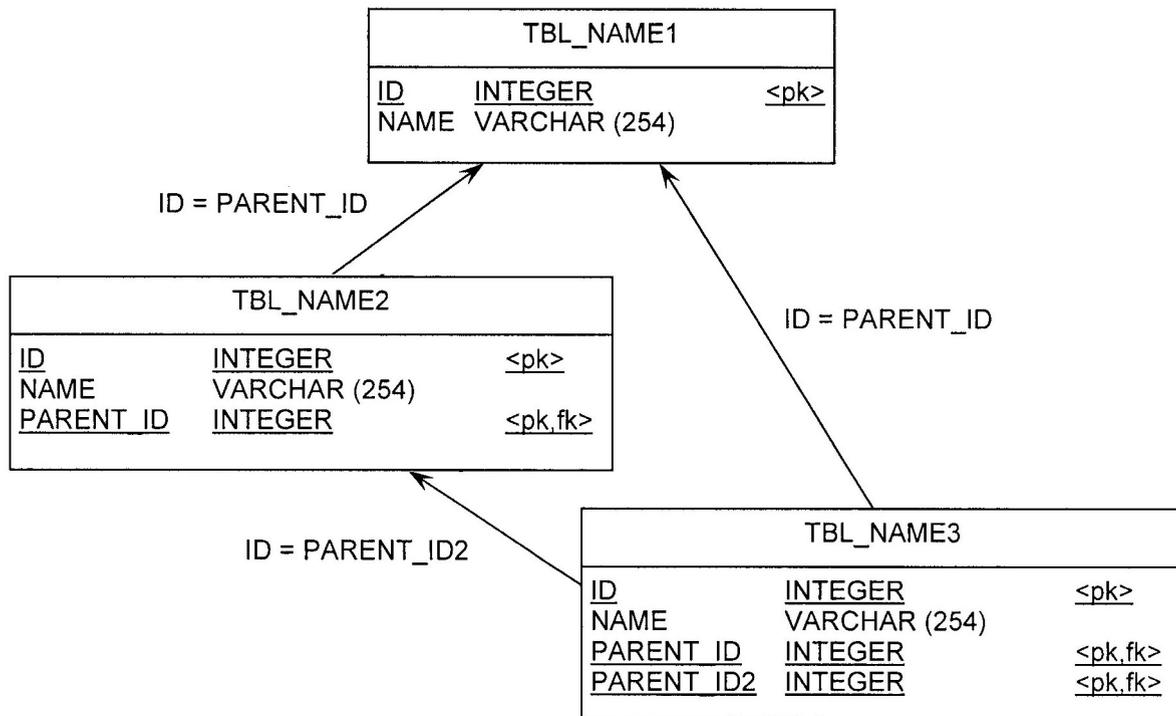


Рис. 5. Потабличное представление иерархии данных

На примере иерархии (рис. 1), для объекта второго уровня с ID = 4 (тип металлоконструкции), у которого предок первого уровня имеет ID = 2 (стреловая система), все прямые потомки (шпренгельные, балочные, комбинированные) могут быть получены посредством SQL-запроса:

```
SELECT * FROM TBL_NAME3
WHERE PARENT_ID = 2 AND
      PARENT_ID2 = 4
```

(5)

В случае добавления уровня вложенности потребуется создать новую таблицу аналогично описанию TBL_NAME2, что является недостатком потабличного метода, поэтому он применим при *ограничении 1*.

Другая безрекурсивная структура, с фиксированным числом потомков, основана на *ограничении 3* и позволяет хранить иерархические данные в виде реляционного отношения с набором атрибутов:

$$R(a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, c_1, c_2), \quad (6)$$

где a_1, a_2, \dots, a_n – информация об объекте первого, второго, ..., n -го уровня иерархии; n – максимальное количество потомков; b_1 – уровень вложенности объекта; b_2 – смещение (номер столбца) с описанием объекта, $1 \leq b_2 \leq n$; c_1 – уровень вло-

женности предка; c_2 – смещение (номер столбца) с описанием предка, $1 \leq c_2 \leq n$.

Иерархический объект определяется уровнем вложенности и смещением (номером столбца), где содержится наименование объекта. Аналогично этому, ссылка на предка состоит из номера предыдущего уровня иерархии и смещения (номера столбца) с описанием родителя. В табл. 1 приведен пример иерархии, в которой можно хранить максимум три потомка.

Все операции модификации объектов иерархии выполняются стандартными средствами SQL, не содержащими рекурсию. Областью применения модели (табл. 1) являются задачи, где ко-

Таблица 1

**Иерархия с неограниченной глубиной
и конечным числом потомков**

TBL_NAME	
LEVEL	INTEGER
OFFSET	SMALLINT
NAME1	VARCHAR (254)
NAME2	VARCHAR (254)
NAME3	VARCHAR (254)
PARENT_LEVEL	INTEGER
PARENT_OFFSET	SMALLINT

Таблица 2

Иерархическая модель данных с поразрядным ключом

TBL_NAME	
ID	DECIMAL (5)
NAME	VARCHAR (254)

личество потомков каждого уровня фиксировано или меняется достаточно редко.

Еще одна структура – с поразрядным ключом (табл. 2) основана на стандартных типах данных. Первичный ключ (ID) кодируется таким образом, что десятичный разряд числа означает уровень вложенности, а цифра в этой позиции – номер объекта на данном уровне, например ‘034’ – третий объект второго уровня, предок которого четвертый объект первого уровня.

Числовой тип DECIMAL(5) задает глубину иерархии 5 и максимальное количество потомков каждого уровня 9. Символьный тип CHAR позволяет увеличить максимальное число потомков до 254 и более. Поразрядный ключ ограничивает как вложенность (*ограничение 1*), так и число потомков (*ограничение 2*), поэтому применим при равномерном распределении элементов по уровням.

Задача выборки потомков облегчается тем, что в первичном ключе содержится информация о полном пути к объекту. У потомков совпадают младшие разряды, например для предка с ID = 32 все объекты-потомки будут иметь первичные ключи из следующего ряда:

$$P = \{132, 232, 332, \dots\}. \quad (7)$$

Все безрекурсивные методы имеют некоторую избыточность модели данных, но зато позволяют исключить рекурсию в логических связях и запросах при выполнении операций выборки и модификации данных.

Для решения задачи хранения и обработки иерархических данных универсального решения не существует. Классическая модель со ссылкой на предка допускает неограниченную глубину вложенности, но содержит рекурсию в модели и SQL-запросах. Попытки избавиться от рекурсивности так или иначе приводят к определенным ограничениям в модели данных.

Проведенный анализ методов организации иерархии позволяет сделать вывод о том, что практическое применение рекурсивных моделей неэффективно на больших наборах данных, таких, как СГПМ. Ошибки иерархии (зацикливание, объекты-«сироты») диагностируются ненадежно, особенно на этапе промышленной эксплуатации. В результате происходит снижение производительности и даже отказ в обслуживании сервера БД.

Безрекурсивные методы иерархии более эффективны по сравнению с традиционными и апробированы на практике [3]. Иерархию СГПМ всегда можно ограничить по глубине или количеству элементов каждого уровня достаточно большим числом. В зависимости от принятых ограничений в каждом конкретном случае практической реализации выбирается та или иная иерархическая модель данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бортяков, Д.Е.** Математическая модель системы изменения вылета порталных кранов [Текст] / Д.Е. Бортяков, А.Н. Орлов // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. –1990. –№ 5. –С. 86–91.
 2. **Голованов, М.** Иерархические структуры данных в реляционных БД [Электронный ресурс] / М. Голованов // RSDN Magazine. –2002. –№ 0. –Режим доступа: <http://rsdn.ru/article/db/Hierarchy.xml>

3. **Mescheryakov, S.** Performance Comparison of Various Hierarchical Structures in Database Systems [Электронный ресурс] / S. Mescheryakov // Proc. of the 30th International Conf. for the Resource Management and Performance Evaluation of Enterprise Computing Systems. –USA. Las Vegas. –2004. –Режим доступа: <http://www.cmg.org/proceedings/2004/>

ИСЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ПРОДУКЦИОННАЯ СИСТЕМА И РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ МУЛЬТИПРОЦЕССОР ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

Интеграция телекоммуникационных средств и вычислительных устройств или систем с однородной реконфигурируемой структурой [1], ориентированных на параллельные процессы обработки данных и знаний, перспективное направление развития современной вычислительной техники (ВТ). Математические, программные и технические средства обработки информации в значительной степени ориентируются на проблемно-поисковые задачи и задачи поддержки принятия решений, использующие модели представления и обработки знаний.

Общая объединяющая особенность данного класса задач связывается с возможностью символического представления предметной области и обработки на единых математических началах символической информации (ОСИ) как конструктивных объектов [2, 3].

Другая объединяющая особенность связана с тем, что задачи ОСИ описываются ветвящимися конструктивными процессами, выполняемыми не в едином, а в разветвленном пространстве времени. Эта особенность определяет создание высокопроизводительных дискретных преобразователей информации с неединичным набором исполнителей и реконфигурируемых однородных вычислительных устройств и многопроцессорных систем. Таким образом, интеллектуализация процессов поиска, доступа, передачи и преобразования символической информации становится магистральным направлением развития ВТ и средств телекоммуникации.

Вместе с тем, в рамках теории алгоритмов не существует дескриптивно универсальных моделей (абстрактных систем) с неединичным набором исполнителей, эффективно реализующих ветвящиеся конструктивные процессы. Известные модели параллельных вычислений (клеточные автоматы, модели обработки информации на основе ассоциативной памяти, сети Петри и др.) имеют ограниченные дескриптивные возможности и предназначены для решения задач

в определенных предметных областях (обработка изображений, обработка реляционных отношений, маршрутизация данных в сетях и т. д.). Сложившаяся ситуация не позволяет создавать перспективные архитектуры устройств и систем ВТ, ориентированные на реализацию параллельных символических вычислений под произвольную структуру графа решения задачи, что определяет актуальность исследования.

Проблема выбора генератора ветвящихся конструктивных процессов для ОСИ

Символическая информация, имеющая более высокий уровень абстракции, чем числовая информация, является основой моделей представления знаний. Она характеризуется динамически изменяемыми коллекциями данных со сложной внутренней логической структурой, недетерминированным характером обработки больших размеров данных, размытыми границами размера минимальной единицы обработки, множественными структурными зависимостями между элементами, комбинированием локальных и глобальных процессов преобразования, многообразием вариантов вычислительных траекторий. Задачи ОСИ традиционно трактуются как задачи поиска и/или порождения новых конструктивных объектов на основе имеющегося набора исходных объектов (исходных данных) и набора правил преобразования (вставка, замещение, удаление групп символов), имеющих разрешительный смысл исполнения, т. е. на основе исчислительных систем.

Вместе с тем, современный этап средств обработки характеризуется двояким отношением к исчислительным системам. В большинстве случаев термин «разрешительные правила» исчислительной системы уточняется в соответствии с соглашением Э. Поста как альтернативные в срабатывании правила. Следствием такого способа уточнения является последовательный с возвратами механизм поиска и/или порождения новых конструктивных объектов. При этом возвратный механизм, являющийся основным источником не-

продуктивных затрат, основан на существовании единственного экземпляра исходных объектов, подлежащих обработке. Правило, приводящее к изменению состава или структуры единственного экземпляра объекта, понимается как альтернативное, а избыточные затраты времени идут на восстановление экземпляра объекта для последовательного генерирования следующих вариантов. Исходя из этого, генерация множества вариантов и ветвящиеся конструктивные процессы исчислительной системы подменяются работой алгоритмической системы с последовательным порождением ветвящихся процессов в линейном пространстве времени. Другими словами, статус исчислительных систем как самостоятельных объектов *de facto* нивелируется до статуса вспомогательного объекта. И, как следствие данной ситуации, – несоответствие алгоритмических и исчислительных законов генерации ветвящихся процессов, что порождает проблему временной избыточности функционирования исчислительных систем и не позволяет создавать реконфигурируемые однородные устройства и вычислительные системы ОСИ.

Постановка задачи

В рамках теории алгоритмов [2] для исчислительных систем термин «разрешительные правила» будет уточнен как равноправные в срабатывании правила. Следствием такого уточнения является параллельная реализация ветвящихся конструктивных процессов с механизмом безвозвратного порождения новых конструктивных объектов по необходимому для ветвления количеству копий экземпляра обрабатываемого конструктивного объекта.

Исходя из особенностей задач ОСИ, наиболее подходящими для задания параллельных вычислений являются исчислительные производные системы. Вычислительный производный формализм основан на применении единственного типа правил структурного преобразования – производных, формализующих базовую схему мышления естественного интеллекта «условие–действие». Исчислительная производная система (ПС) состоит из однородного по составу набора разрешительных производных и естественным образом ориентирована на вариативное многообразие активаций производных и динамическую изменчивость структуры символьных данных для параллельной генерации ветвящихся производных процессов.

Вместе с тем, известные исчислительные ПС (ассоциативные исчисления Туе, нормальные исчисления Э. Поста, неограниченные грамматики Н. Хомского и др.) [4] имеют недостаточные возможности для эффективной по времени генерации ветвящихся конструктивных процессов. Основные проблемы связаны с отсутствием информации о динамически изменяемых коэффициентах ветвления, задающих общие оценки пространства вывода, и с неприспособленностью известных ПС описывать скоординированную работу неединичного множества исполнителей, параллельно генерирующих экземпляры конструктивных объектов. Данные проблемы определяют необходимость модификации исчислительной ПС, создания абстрактной производной машины-генератора ветвящихся процессов и на ее основе – структурно-функциональной организации динамически реконфигурируемого мультипроцессора ОСИ с однородным набором производных устройств.

Модификация исчислительной производной системы

Модифицированная исчислительная ПС будет рассматриваться как набор производных, выполняемых на основе неединичного множества элементарных исполнителей правил, количество которых и связи между которыми динамично реконфигурируются в процессе вывода (генерации) новых конструктивных объектов. Исчислительный характер производной системы определяется тем, что схема управления имеет не процедурную, а декларативную основу исполнения. Это означает, что в текущий момент времени к исполнению пригодно несколько производных, причем достоверной информации предпочтения нет. Таким образом, существенное преимущество исчислительной ПС для организации ветвящихся вычислительных процессов определяется тем, что управление фактически осуществляется потоком готовых к обработке данных на недетерминированных началах, что позволяет теоретически обеспечить предельный параллелизм вычислений.

Важным элементом новизны модифицированной исчислительной ПС как модели быстродействующего дискретного генератора ветвящихся производных процессов является уточнение недетерминированной схемы активации производных и порождения новых конструктивных объектов. Недетерминированность шагов вычисле-

ний предлагается уточнить как потенциальную равноправность всех применимых на текущем шаге продукций. Работа исчислительной ПС на текущем шаге вывода заключается в применении на равноправных началах к входному конструктивному объекту всех возможных продукций, параллельном порождении всех выходных конструктивных объектов и рекурсивном вызове ПС с обновленными входными конструктивными объектами.

Пусть задан алфавит A , непустое множество слов A^* в нем. Пусть задана исчислительная ПС, ориентированная на генерацию ветвящихся продукционных процессов

$$\left\{ \begin{array}{l} O_1 \rightarrow P_1 \\ \dots \\ O_i \rightarrow P_i \\ \dots \\ O_j \rightarrow P_j \\ \dots \\ O_n \rightarrow P_n \end{array} \right. \quad (1)$$

где $O_k \rightarrow P_k$ – правило преобразования слов (продукция), $k = 1 \div n$, $n \in N$; $O_1 \div O_n$ – заменяемые слова-образцы в рабочем алфавите A ; $P_1 \div P_n$ – модифицирующие слова-подстановки в рабочем алфавите A ; $\rightarrow \notin A$.

Действия, допустимые над словом S (в рабочем алфавите A) относительно k -й продукции, описываются как конструктивный процесс разложения S на три части (собственное начало, тело и собственное окончание) с минимально возможной длиной собственного начала и замены в слове S первого вхождения $L * O * R$ левой части k -й продукции ее правой частью P . Аналитически работу продукции над словом S можно описать выражением, представленным на рис. 1

Конечное число вариантов разложения слова S и возникающая от этого недетерминированность исчислительного процесса генерации новых слов в вычислительных процессах ОСИ устраняются

$$\left. \begin{array}{l} \xrightarrow{\hspace{10em}} S = L_1 O R_1 \\ \dots \\ S = L_i O R_i \\ \dots \\ S = L_m O R_m \end{array} \right\} \begin{array}{l} S = L O R, O \rightarrow P \\ S' = L P R \end{array}$$

Рис. 1. Срабатывание продукции над S
 m – число вариантов разложения слова S ; $L_1 \div L_m$ – упорядоченные по длине префиксы ($L_1 \subset \dots \subset L_i \subset \dots \subset L_m$); $R_1 \div R_m$ – упорядоченные по длине суффиксы ($R_m \subset \dots \subset R_i \subset \dots \subset R_1$)

обработкой конструктивных объектов [2], которая предписывает при срабатывании использовать минимальную от начала позицию вхождения слова O , т. е. отыскивать минимальную длину собственного начала: $Len(L_1) \rightarrow \min$.

Для системы (1) бинарное отношение непосредственной выводимости слова β из слова α обозначается как $\alpha \Rightarrow \beta$. Оно означает, что слово β смежно со словом α , если существуют такие слова $L, R \in A^*$ что $\alpha = L * O_k * R \in A^*$, $\beta = L * P_k * R \in A^*$ и существует продукция $O_k \rightarrow P_k$.

Пусть $m \in N$, $\alpha, \beta, \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{m-1}, \alpha_m \in A^*$, \Rightarrow^m – m -я степень бинарного отношения \Rightarrow , а \Rightarrow^* – рефлексивное и транзитивное замыкание бинарного отношения \Rightarrow . Тогда линейным выводом длины m слова β из слова α в исчислительной ПС называется последовательность слов $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{m-1}, \alpha_m$, для которых справедливо

$$\begin{array}{l} \alpha_0 = \alpha, \alpha \Rightarrow \alpha_1, \alpha_1 \Rightarrow \alpha_2, \dots, \\ \alpha_{m-1} \Rightarrow \alpha_m, \alpha_m = \beta. \end{array} \quad (2)$$

Слово β , выводимое из слова α за m шагов в исчислительной ПС, обозначается как $\alpha \Rightarrow^m \beta$. Слово β , выводимое из слова α в исчислительной ПС, обозначается как $\alpha \Rightarrow^* \beta$.

Для описания, исследования и временной оптимизации ветвящихся продукционных процессов в исчислительной ПС вводится p -значное отношения равноправной выводимости.

Пусть $p \in N$ и заданы слова $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}, \beta_p \in A^*$. P -значное отношение непосредственной выводимости слов $\beta_1, \dots, \beta_{p-1}, \beta_p$ из слова α обозначается как $\alpha \Rightarrow \{\beta_i\}_p^1$. Оно означает, что слова $\beta_1, \dots, \beta_{p-1}, \beta_p$ смежны со словом α , если существуют такие активационные продукции количеством p :

$$\begin{array}{l} O_{i_1} \rightarrow P_{i_1} \\ O_{i_2} \rightarrow P_{i_2} \\ \dots \\ O_{i_p} \rightarrow P_{i_p} \end{array} \quad (3)$$

и слова $L_{i_1}, R_{i_1} \in A^*$, $L_{i_2}, R_{i_2} \in A^*$, \dots , $L_{i_p}, R_{i_p} \in A^*$, что равноправно возможны следующие представления $\alpha = \{L_{i_k} * O_{i_k} * R_{i_k}\}_p^1 \in A^*$ и $\{\beta\}_p^1 = \{L_{i_k} * R_{i_k} * R_{i_k}\}_p^1 \in A^*$ для $k = 1 \div p$.

Ветвящимся выводом длины m множества слова $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_d$ из слова α в исчислительной ПС называется последовательность множеств слов $\alpha_0, \{\alpha_1\}, \dots, \{\alpha_{m-1}\}, \{\alpha_m\}$, для которых справедливо

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \alpha, \alpha \Rightarrow \{\alpha_1\}_{p_1}^1, \\ \alpha_1 &\Rightarrow \{\alpha_2\}_{p_2}^1, \alpha_2 \Rightarrow \{\alpha_3\}_{p_3}^1, \dots, \\ \alpha_{m-1} &\Rightarrow \{\alpha_m\}_{p_m}^1, \{\alpha_m\}_{p_m}^1 = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d. \end{aligned} \quad (4)$$

Соответственно множество слов $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d$ выводимое из слова α за m шагов в исчислительной ПС, обозначается как $\alpha \Rightarrow^m \{\beta\}_d^1$. Множество слов $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_d$, выводимое из слова α в исчислительной ПС, обозначается как $\alpha \Rightarrow^* \{\beta\}_d^1$.

Для модифицированной исчислительной ПС задаются отношения линейного и ветвящегося непосредственного следования слов, определяющие два типа преобразований:

преобразование единственного экземпляра исходного слова за m шагов вывода и получение одного выходного слова (линейная генерация);

преобразование необходимого количества копий исходного слова за m шагов вывода и получение множества выходных слов на равноправных началах (ветвящаяся генерация).

Для ускорения эффективной линейной генерации слов в модифицированной исчислительной ПС наряду со стандартным бинарным отношением $\alpha \Rightarrow \beta$ непосредственной выводимости слов вводится его модификация, обозначаемая как $\alpha \hat{\Rightarrow}_p \beta$ и понимаемая как p -значное отношение независимой выводимости на p независимых вхождениях. Данная модификация относится к множеству таких активационных продукций (3), что существуют слова $L, T_1, T_2, \dots, T_{p-2}, R \in A^*$ и возможен один из альтернативных вариантов представления смежных слов α и β

$$\begin{aligned} \alpha &= L * O_{i_{k_j}} * T_1 * O_{i_{k_j}} * T_2 * \dots \\ &\dots O_{i_{k_j}} * T_{p-2} * O_{i_{k_j}} * R \in A^* \end{aligned} \quad (5)$$

и, соответственно,

$$\begin{aligned} \beta &= L * P_{i_{k_j}} * T_1 * P_{i_{k_j}} * T_2 * \dots \\ &\dots P_{i_{k_j}} * T_{p-2} * P_{i_{k_j}} * R \in A^*, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k_j = \{1, 2, \dots, p\}$ – номера активационных продукций из множества (3).

Новизна вводимого p -значного отношения независимой выводимости определяется параллельным срабатыванием p независимых активационных продукций (3) на одном шаге вывода с формированием единственного выходного слова вида (6).

Таким образом, работа исчислительной ПС вида (1) связана с рекурсивным порождением множества слов. Каждый шаг вывода в (1) (каж-

дый рекурсивный вызов) осуществляется путем выбора одного из трех отношений выводимости:

бинарное отношение непосредственной выводимости;

p -значное отношение равноправной выводимости (ИЛИ-вывод);

p -значное отношение независимой выводимости (И-вывод).

Необходимое количество копий исходного слова на текущем шаге вывода для ИЛИ-вывода определяется в соответствии с конструктивной дизъюнкцией вида [5]:

$$\begin{aligned} (O_i^H = O_j^K) \vee (O_i^K = O_j^H) \vee (O_i = O_j^H O_i O_j^K) \vee \\ \vee (O_j = O_i^H O_j O_i^K) = 1, \end{aligned} \quad (7)$$

где O_i^H, O_i^K – собственное начало и окончание i -го образца; O_j^H, O_j^K – собственное начало и окончание j -го образца.

Первые два члена конструктивной дизъюнкции (7) задают алгоритм поиска пересечений слов, понимаемых в параллельном выводе как конфликтные слова [6]. Третий и четвертый члены конструктивной дизъюнкции (7) задают алгоритм поиска вхождения поискового слова в структуру обрабатываемого слова.

Важнейшую роль в организации ветвящихся конструктивных процессов в исчислительной ПС (ветвящихся продукционных процессов) играет абстрактная машина-генератор продукционных выводов (МГПВ), являющаяся основой аппаратной поддержки параллельных выводов. МГПВ – это модель устройства, конкретизирующая состав, функциональное назначение и взаимодействие неединичного множества исполнителей. Степенью свободы МГПВ будет называться характеристика самостоятельного функционирования отдельного исполнителя в составе скоординированной работы МГПВ в целом.

Исчислительная ПС с неединичным множеством исполнителей в рамках МГПВ конкретизируется $n+1$ исполнителем, среди которых выделяются n рабочих исполнителей и один исполнитель-координатор (рис. 2). За каждым рабочим исполнителем закрепляется ровно одна продукция, чем и достигается прямое соответствие между МГПВ и исчислительной ПС вида (1). Рабочий исполнитель имеет собственную внутреннюю ленту. Свойство «свободы рабочих исполнителей» выгодно отличает данную МГПВ, т. к. структура технического устройства будет наследовать свойства естественного распараллели-

вания вычислений по мере готовности данных, что позволяет реализовать предельный параллелизм потока данных. В функции исполнителя-координатора входит создание необходимого числа копий слов для рабочих исполнителей, синхронизации завершения параллельной работы исполнителей и объединение слов-результатов в единое результирующее слово для следующего рекурсивного вызова исчислительной ПС (1) с обновленными данными.

Разработка структуры реконфигурируемого мультипроцессора

Одна из основных причин ограничения области применения известных многопроцессорных устройств для реализации ветвящихся вычислений – существование конфликтных ситуаций между словами, не позволяющих динамически распараллеливать их обработку в силу отсутствия информации о степени ветвления процессов.

Сущность конфликтной ситуации заключается в разрушении структуры образца j -й продукции в обрабатываемом слове и ее неприменимости для срабатывания i -й продукции при пересечении образцов i, j ($i \neq j$) исчислительной ПС вида (1). Парные пересечения образцов i, j ($i \neq j$) по (7) являются логическим индикатором зависимости между исполнителями продукции (устройствами), вследствие чего образуются непродуктивные затраты времени на поиск, распознавание и обработку таких конфликтных си-

туаций на каждом шаге работы МГПВ. В связи с этим важнейшая задача аппаратной поддержки МГПВ – синтез оригинальной структуры мультипроцессора, имеющего встроенные средства распознавания конфликтов и динамической реконфигурации соединений устройств-исполнителей продукции.

Под реконфигурируемым мультипроцессором понимается вычислительная система, состоящая из совокупности одинаковых процессоров, обладающих равными возможностями доступа к общей разделяемой рабочей памяти (РП) [7] и встроенными средствами динамического изменения соединений под структуру графа решаемой задачи. Основу реконфигурируемого мультипроцессора составляет решающее поле однородных продукционных вычислительных устройств (ПВУ) общим количеством $N \times N$, где N – число рабочих устройств-исполнителей продукции (рис. 3 а). Каждое из ПВУ реализует только одну продукцию из (1), взаимодействуя с удаленными ПВУ через распределенную коммутационную структуру. Основу ПВУ (рис. 3 б) составляет вычислительно-коммутационная часть, содержащая собственно блоки поиска и подстановки, входной мультиплексор (МХ), выходной демультиплексор (DMX), управляемые настроечными битами $G1_{ij}$ и $G2_{ij}$. Введение двух коммутирующих узлов в ПВУ обеспечивает гибкую настройку соединений под различные типы параллелизма с объединением необходимого ко-

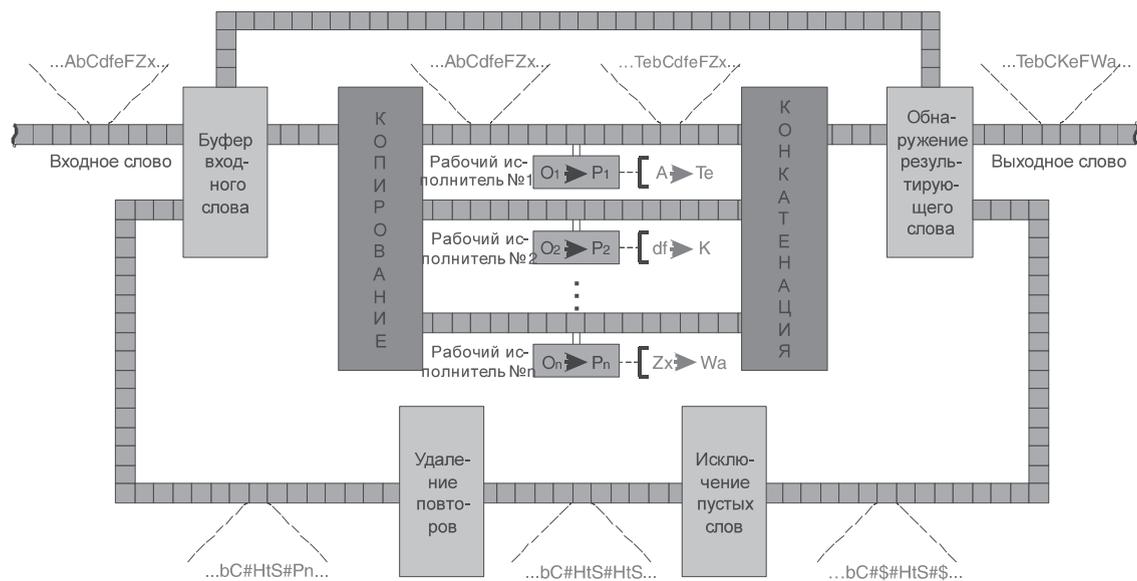


Рис. 2. Абстрактная машина-генератор продукционного вывода

личества ПВУ в один ярус вывода. Важнейшая структурная единица реконфигурируемого мультипроцессора – блок анализа конфликтных ситуаций и генерации конфликтных слов. Распознавание конфликтных ситуаций в составе входных данных позволяет выполнять динамическую реконфигурацию ПВУ с многообразием вариантов соединений. Блок реконфигурации (БРК) вырабатывает для каждого шага работы мультипроцессора настроечные управляющие вектора, каждый бит которых осуществляет коммутацию ПВУ и реконфигурацию решающего поля устройств под различные типы параллелизма (ИЛИ-, И-вывод) на нескольких ярусах вывода.

Другим структурным признаком новизны организации мультипроцессора является модульно-распределенная рабочая память с частичной дешифровкой адреса со стороны младших разрядов, что позволяет распределить физически смежные информационные единицы (слова) по различным модулям. Данное распределение служит основой для организации параллельной работы ПВУ по нескольким ярусам вывода в пределах решающего поля однородных устройств.

Таким образом, для реализации параллельных ветвящихся вычислений на основе модифицированной исчислительной ПС создан реконфигури-

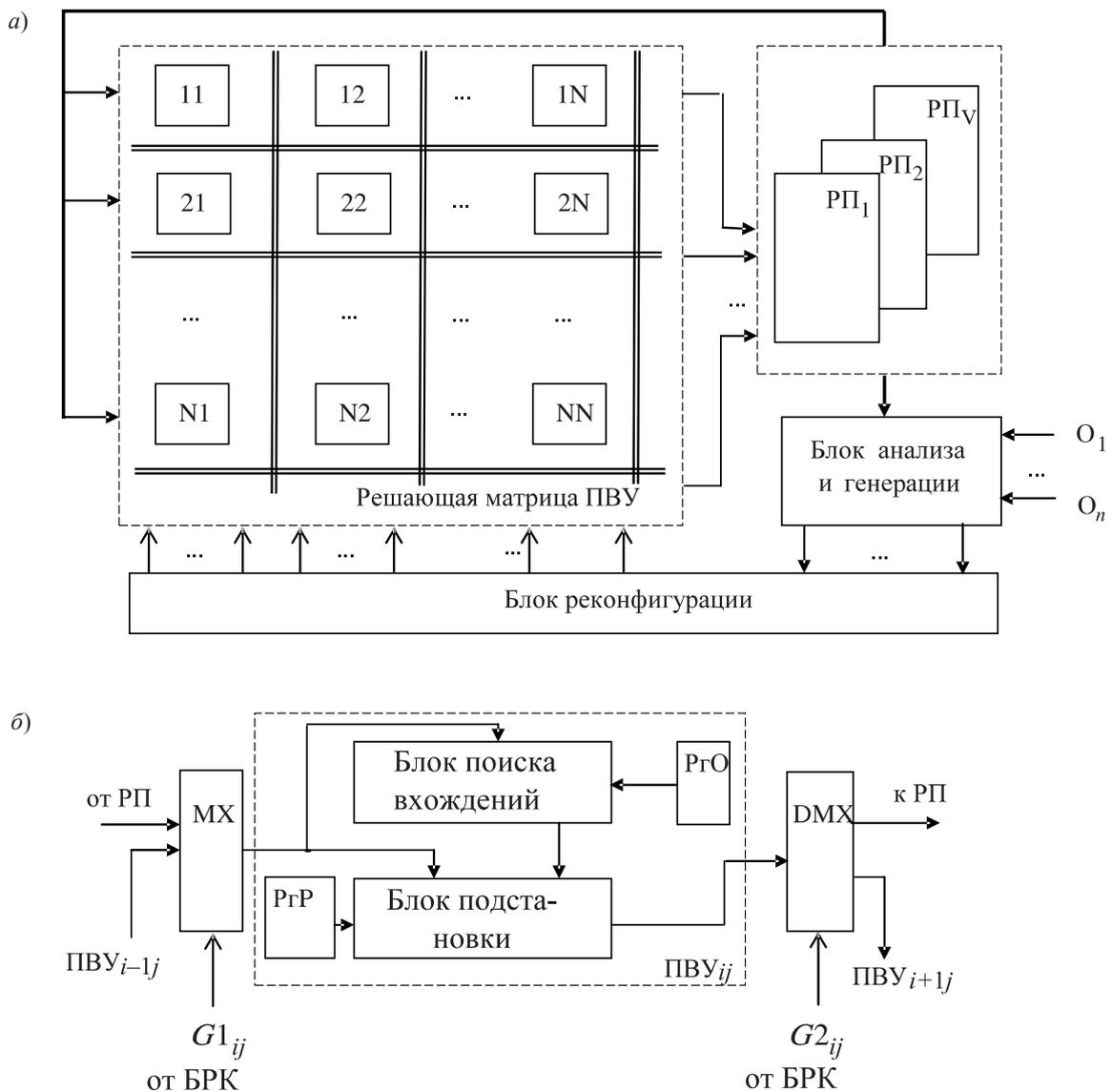


Рис. 3. Реконфигурируемый мультипроцессор:
а – структурная схема; б – структура продукционного вычислительного устройства

руемый мультипроцессор, управляемый потоком данных и имеющий в своем составе встроенные средства для реконфигурации операционной части под структуру графа задачи. Реконфигурация выполняется путем вычисления управляющих двоичных векторов настроек соединений ПВУ под различные типы параллелизма. Главные отличия

особенности мультипроцессора – однородность структуры решающего поля устройств, реализация ПВУ только одной продукции, динамическая реконфигурация связей ПВУ, максимизация загрузки ПВУ путем выбора соответствующего набора входных данных с вычисленными коэффициентами параллелизма на них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каляев, А.В.** Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений [Текст] / А.В. Каляев, И.И. Левин. –М.: Янус-К, 2003. –380 с.

2. **Успенский, В.А.** Теория алгоритмов: основные открытия и приложения [Текст] / В.А. Успенский, А.Л. Семенов. –М.: Наука, 1987. –288с.

3. **Довгаль, В.М.** Методы модификации формальных систем обработки символьной информации [Текст] / В.М. Довгаль. –Курск: КурскГТУ, 1996. –114 с.

4. **Марков, А.А.** Теория алгоритмов и конструктивная математика, математическая логика, информа-

тика и смежные вопросы [Текст] / А.А. Марков // Избранные труды: Т. 2. –М.: МЦНМО, 2007. –650 с.

5. **Титенко, Е.А.** Продукционная система для реализации параллельных символьных вычислений [Текст] / Е.А. Титенко // Системы управления и информационные технологии. –2006. –№ 1 (23). –С. 187–191.

6. **Титенко, Е.А.** Продукционные системы и теорема о конфликтных словах [Текст] / Е.А. Титенко, В.С. Евсюков // Изв. Тульского гос. ун-та. –2006. –Вып. 15. –С. 92–98.

7. **Корнеев, В.В.** Вычислительные системы [Текст] / В.В. Корнеев. –М.: Гелиос АРВ, 2004. –512 с.

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

УДК 004.41

В.А. Атрощенко, Р.А. Дьяченко, А.С. Шароватов, Ю.Н. Литвинов

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для решения задач мониторинга и прогнозирования состояния различных технических объектов (в т. ч. объектов энергетики и ЖКХ) применяют различные методики (методы линейного регрессионного анализа, нейросетевые и нечеткие методы прогнозирования и т. д.). Для реализации указанных подходов к моделированию, как правило, необходимы значительные объемы обучающих выборок. Для систем, у которых отсутствует возможность получения минимально необходимого объема обучающей выборки, применение данных методик нецелесообразно (технические и энергетические системы на начальной стадии эксплуатации).

Один из вариантов решения задачи прогнозирования – следующий подход: процесс прогнозирования сводится к независимому прогнозированию значений по каждому из параметров, с последующим определением параметра с наименьшим значением прогнозного времени, при котором произойдет выход за допустимые пределы [1].

Прогнозирование значений по каждому параметру можно проводить, используя стандартные и широко распространенные методы аппроксимации гладкими функциями с последующей экстраполяцией на допустимый горизонт прогноза.

Стандартными аппроксимирующими зависимостями являются следующие:

$$y(t) = a_0 + a_1 \cdot t, \quad (1)$$

$$y(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_n \cdot t^n, \quad (2)$$

$$y(t) = a_0 \cdot e^{a_1 t}, \quad (3)$$

$$y(t) = a_0 \cdot t^{a_1}, \quad (4)$$

$$y(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot \ln(t). \quad (5)$$

Последовательность действий прогнозирования по одному параметру сводится к следующим шагам.

1. Сбор статистической информации по параметрам (формирование временного ряда).
2. Определение модели прогнозирования (фиксированным или оптимальным образом).
3. Расчет значений модели за прогнозный период.
4. Определение наличия выходов за пределы допустимых значений параметра.

Таким образом, для каждого параметра на определенный горизонт прогноза можно определить наличие выхода за пределы допустимых значений и прогнозный интервал этого выхода.

Алгоритм получения прогнозов с наименьшим временем выхода моделей за пределы допустимых значений состоит из следующих этапов.

1. Получение наборов данных для аппроксимации каждого необходимого параметра (например, с датчиков технических устройств).
2. Построение необходимых моделей.
3. Выбор параметров прогнозирования.
4. Вычисление времени выхода моделей за границы допустимых значений.
5. Определение прогнозов с наименьшим значением прогнозного времени, при котором произойдет выход моделей за пределы допустимых значений.

Далее в тексте будем использовать обозначения и названия типов данных для языка программирования C# версии 4.0.

Допустимые значения прогноза задаются двумя границами – **TopLimit** (верхняя) и **BottomLimit** (нижняя). Соответственно, любая

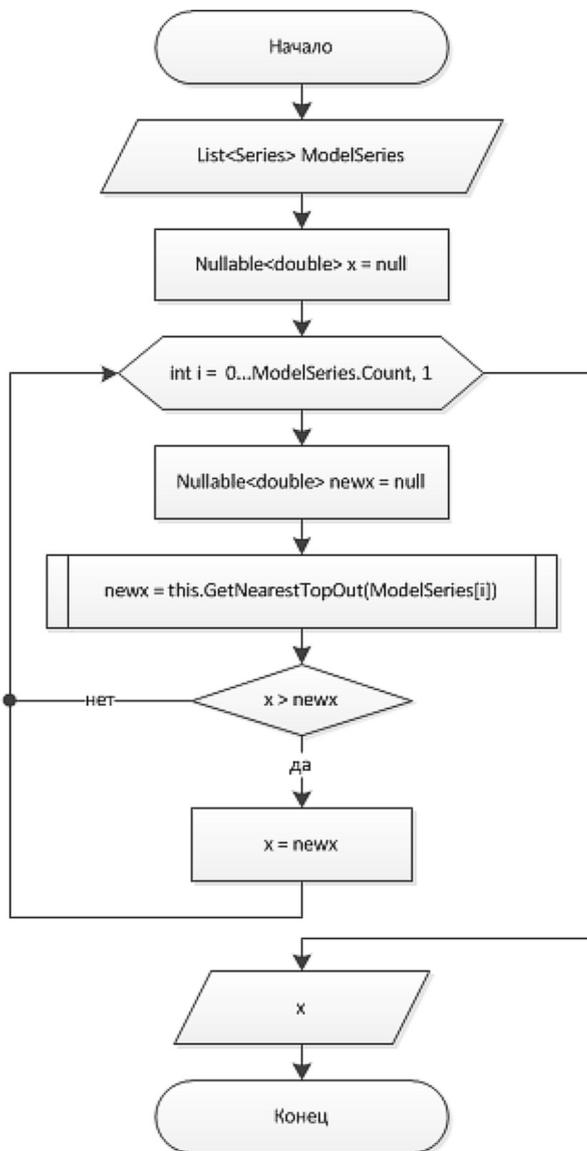


Рис. 1. Блок-схема алгоритма нахождения наименьшего времени выхода моделей за верхнюю границу допустимых значений

модель выходит за пределы допустимых значений, когда значения функции пересекают эти границы, либо, когда одно из значений функции меньше нижней границы, либо больше верхней. Целесообразно рассчитывать наименьшее время выхода модели за пределы допустимых значений для каждой границы отдельно, а затем взять наименьшее из них [2].

Наименьшее время выхода модели за пределы допустимых значений можно рассчитать перебором всех точек графика модели и проверкой, не заходит ли значение функции за границу. Наи-

меньшим временем выхода является время первой точки, лежащей вне зоны допустимых значений. Блок-схема алгоритма нахождения наименьшего времени выхода моделей за верхнюю границу допустимых значений представлена на рис. 1.

ModelSeries – массив графиков рассматриваемых моделей (массив элементов типа Series языка программирования C#).

ModelSeries.Count – количество графиков моделей (переменная типа int).

x – наименьшее время, при котором значение одной из моделей выходит за пределы верхней границы (переменная типа Nullable<double>).

newx – наименьшее время выхода модели за пределы верхней границы (переменная типа Nullable<double>).

GetNearestTopOut() – функция, находящая наименьшее время выхода модели за пределы допустимых значений. Принимает график функции (переменная типа Series). Возвращает наименьшее время (тип Nullable<double>). Блок-схема данной функции представлена на рис. 2.

Алгоритм нахождения наименьшего времени выхода моделей за нижнюю границу отличается только вызываемой функцией (**GetNearestBottomOut()** вместо **GetNearestTopOut()**).

s – график модели (переменная типа Series).

s.Points – массив точек графика (массив значений типа Point).

s.Points.Count – количество точек на графике (переменная типа int).

s.Points[index].XValue – значение X точки (время) (переменная типа double).

s.Points[index].YValue – значение Y точки (значение модели) (переменная типа double).

TopBorder – верхняя граница допустимых значений прогноза (переменная типа double).

Функция нахождения наименьшего времени выхода модели за нижнюю границу допустимых значений отличается условием сравнения значения модели с границей (**s.Points[i].YValue < BottomBorder** вместо **s.Points[i].YValue > TopBorder**, где **BottomBorder** – нижняя граница допустимых значений прогноза (переменная типа double)).

Блок-схема алгоритма выбора прогнозов представлена на рис. 3.

Predictions – список рассматриваемых прогнозов (массив элементов типа Prediction).

Predictions.Count – количество прогнозов в списке (переменная типа int).

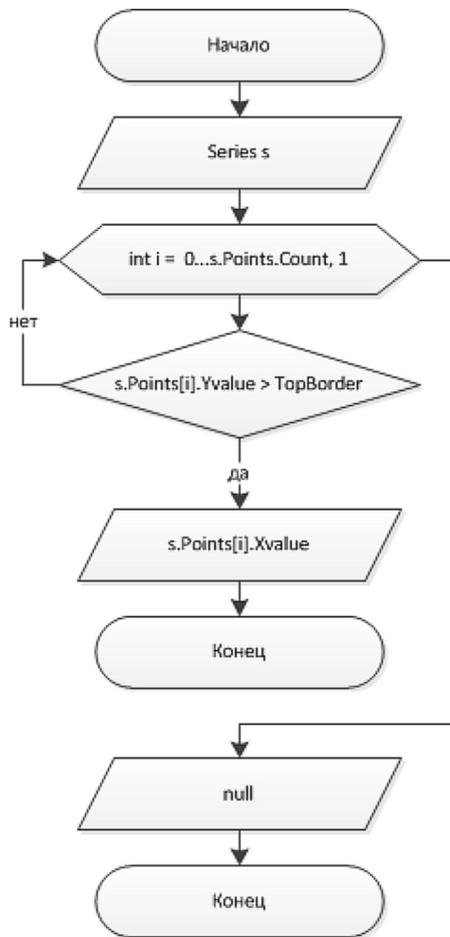


Рис. 2. Блок-схема алгоритма нахождения наименьшего времени выхода модели за верхнюю границу допустимых значений

OutValue – наименьшее значение прогнозного времени, при котором произойдет выход моделей за пределы допустимых значений (переменная типа `Nullable<double>`).

OutTop и **OutBottom** – наименьшее время выхода моделей за верхнюю и нижнюю границу соответственно (переменные типа `double`). Рассчитываются по алгоритму 1.

NearestPrediction – список прогнозов с наименьшим временем выхода моделей за пределы допустимых значений (массив элементов типа `Prediction`).

NearestPrediction.Add() – функция добавления прогноза в список **NearestPrediction**. Принимаемый аргумент – добавляемый прогноз (переменная типа `Prediction`).

Описанный выше алгоритм реализован в программе **PredictPro**, написанной на языке **C#**

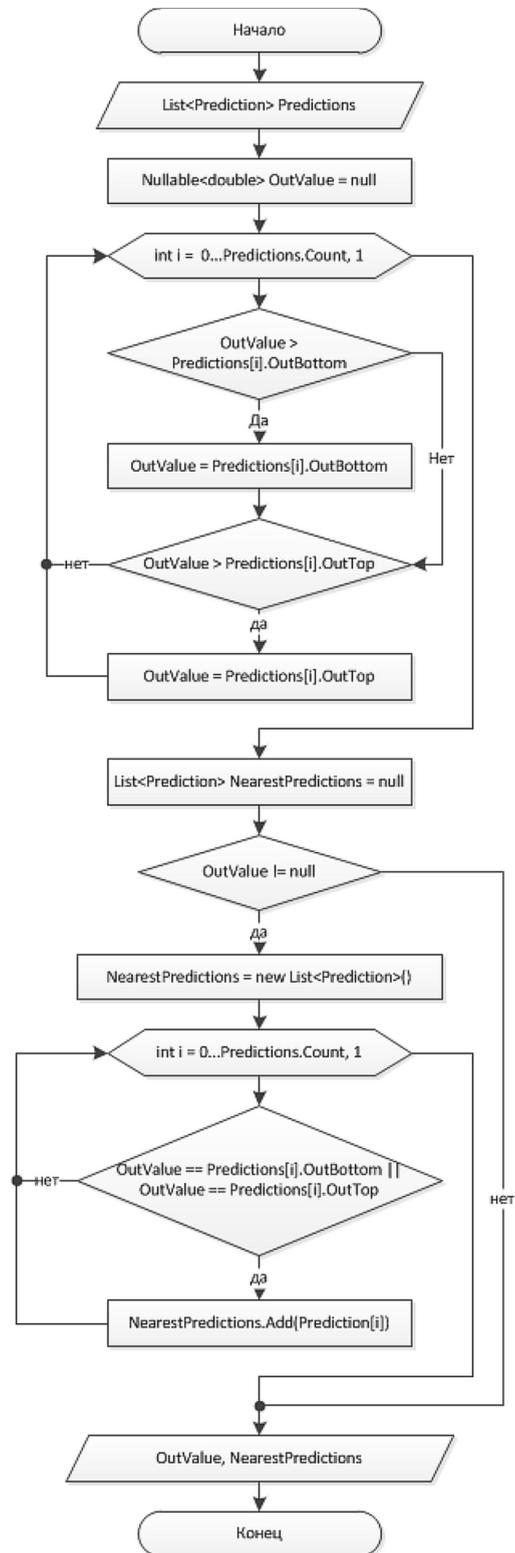


Рис. 3. Блок-схема определения прогнозов с наименьшим значением прогнозного времени, при котором произойдет выход моделей за пределы допустимых значений

в среде Microsoft Visual Studio 2010 на технологии .NET Framework 4.0.

Принципы работы системы состоят в следующем:

- пользователь работает с проектом, в который можно добавлять наборы данных (представляют собой параметры);
- наборы данных аппроксимируются моделями – в набор данных можно добавить любое количество моделей следующих типов: линейная, полиномиальная, логарифмическая, степенная, экспоненциальная;
- по выбранному набору данных можно осуществить поиск оптимальной модели по одному из критериев (при этом можно задать ограничения на значения других критериев);
- для наборов данных, либо для отдельных моделей можно создавать прогнозы;
- после задания верхней и нижней границы допустимых значений, прогноз отобразит время выхода модели за эти границы;
- программа автоматически осуществляет поиск прогнозов с наименьшим временем выхода

моделей за границы допустимых значений и помечает их красным цветом, а также выводит их наименования в строке состояния;

- наименьшее время выхода моделей за границы допустимых значений отображается в строке состояния;
- проект может быть сохранен на любой носитель информации в виде XML-файла;
- наборы данных могут быть экспортированы в Excel;
- для любой модели может быть сгенерирован отчет в виде PDF-файла.

Интерфейс системы представлен на рис. 4, 5.

На рис. 5 продемонстрирована ситуация прогноза по одному из параметров (изображены все виды используемых моделей, а также границы допустимых значений).

В результате проведенных исследований был составлен алгоритм и разработано программное обеспечение, позволяющее без сложных моделей решать задачи прогнозирования многопараметрических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Майо, Д.** Самоучитель Microsoft Visual Studio 2010 [Текст] / Д. Майо; пер. О. Кокоревой. – БХВ-Петербург, 2011. – 464 с.

2. **Гайдышев, И.П.** Анализ и обработка данных. Специальный справочник [Текст] / И.П. Гайдышев. – 2002. – 752 с.

УДК 519.24

Е.В. Афанасьева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ С ПОМОЩЬЮ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ЦЕПОЧЕК (НА ПРИМЕРЕ СТРАН ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ)

Понятие вероятностного вектора так или иначе возникает каждый раз, когда исследователю приходится иметь дело со статистическими данными. Такие данные могут представлять с собой, например, доли ресурса, потребляемого группой каких-либо сообществ. Распределение этого ресурса между сообществами задается с помощью вероятностного вектора, а последовательности вероятностных векторов, рассматриваемых за каждый год из некоторого промежутка времени,

образуют вероятностные цепочки, которые отражают процесс распределения ресурса между сообществами за указанный интервал и могут применяться для получения статистических оценок относительной динамики социально-экономических процессов.

Приведем строгое определение вероятностной цепочки [1]:

Дискретная вероятностная $(1, n)$ -цепочка – это последовательность вероятностных векторов

$$\bar{p}_t = \begin{pmatrix} p_{1t} \\ p_{2t} \\ \dots \\ p_{nt} \end{pmatrix}, t = 0, 1, 2, \dots; 0 \leq p_{kt} \leq 1; \sum_{k=1}^n p_{kt} = 1.$$

Нелинейную вероятностную цепочку можно представить набором строго положительных порождающих функций $P_k(p_0, p_1, \dots, p_t)$ – преобразований над вероятностными векторами, удовлетворяющих соотношениям

$$P_i(p) > 0, i = 1, \dots, n, \sum_{i=1}^n P_i(p) = 1.$$

Вероятностная цепочка, заданная порождающими функциями $P_k(p)$, выглядит следующим образом:

$$p_{k,t+1} = \frac{P_k(p_0, p_1, \dots, p_t)}{\sum_{i=1}^n P_i(p_0, p_1, \dots, p_t)}, k = 1, 2, \dots, n; t = 0, 1, 2, \dots$$

В зависимости от порождающих функций, которыми они задаются, выделяют различные виды вероятностных цепочек. В данной статье применяются вероятностные цепочки с логистическим ростом, где порождающими функциями являются линейные функции без свободного члена $P_k(p) = \gamma_k p_k, \gamma_k > 0, k = 1, 2, \dots, n$, а также логарифмически-линейные вероятностные цепочки, где в качестве порождающих используются функции Кобба-Дугласа:

$$P_k(p) = A_k p_1^{k_1} p_2^{k_2} \dots p_n^{k_n},$$

$$-\infty \leq a_{kj} \leq +\infty, A_k > 0, k = 1, 2, \dots, n; t = 0, 1, \dots, T.$$

Вероятностные цепочки неоднократно применялись в исследованиях распределения валового регионального продукта по регионам таких стран, как Греция [2], Индонезия [3], Испания и Португалия [4]. В настоящей статье описаны результаты приложения данного инструмента моделирования к проблеме распределения социально-экономических ресурсов между странами Западной Европы.

Постановка задачи

Используя данные статистического отдела ООН о потреблении некоторых социально-экономических ресурсов странами Западной Европы, построим с помощью вероятностных цепочек модели процессов распределения ресурсов между указанными странами. В качестве потребляемых ресурсов рассмотрим электричество

(в кВт/ч на душу населения, с 1960 по 2006 г.), энергию (в кг нефтяного эквивалента на душу населения, с 1960 по 2006 г.), Интернет (число пользователей на 100 жителей, с 1992 по 2007 г.) и сотовую связь (число абонентов на 100 жителей, с 1987 по 2008 г.). Исследуем распределение описанных ресурсов между такими странами Западной Европы, как Австрия, Бельгия, Франция, Германия, Ирландия, Люксембург, Нидерланды, Швейцария и Великобритания.

После построения моделей по каждому из потребляемых ресурсов необходимо решить следующие задачи: во-первых, выявить взаимное влияние долей потребляемых ресурсов стран Западной Европы; во-вторых, поскольку в статье используются вероятностные цепочки двух видов, провести их сравнительный анализ как инструментов для моделирования процессов распределения ресурсов.

Построение моделей

Построение моделей процессов распределения ресурсов между девятью странами Западной Европы проводилось средствами приложения, специально разработанного в рамках данного исследования для работы с вероятностными цепочками описанных двух видов. При этом для обоих видов моделей соответствующие системы уравнений были сведены к таким, в которых изменение долей потребляемых ресурсов различными странами рассматривается относительно изменения доли ресурса в одной из стран. В качестве такой страны, не умаляя общности, была взята первая страна из списка – Австрия.

Кроме того, при построении модели на основе логарифмически-линейных вероятностных цепочек процедура нахождения неизвестных параметров модели свелась к оценке коэффициентов системы внешне не связанных уравнений [5] методом наименьших квадратов [6]. Применение данного метода требует выполнения условий Гаусса–Маркова для получения несмещенных, состоятельных и эффективных оценок коэффициентов [6]. Таким образом, средствами приложения была проведена проверка отсутствия автокорреляции случайных остатков, равенства нулю их математического ожидания, отсутствия корреляций с объясняющими переменными, постоянства дисперсии, а также нормальности распределения случайных остатков [7].

Для оценки взаимного влияния долей потребляемых ресурсов стран Западной Европы была построена матрица взаимного влияния на основе найденных оценок параметров логарифмически-линейной цепочки.

Кроме того, исходные данные по каждому из ресурсов интерполировались на исследуемых интервалах времени, и была проведена экстраполяция на последующие годы.

Первичные результаты и анализ матриц взаимного влияния

Как показал первичный анализ построенных моделей, лидирующие позиции по потреблению всех исследуемых ресурсов, кроме Интернет, занимает Люксембург (максимальная доля пользователей Интернет – в Нидерландах), что неудивительно, поскольку Люксембург является одной из богатейших стран Европы и занимает второе место в мире по уровню ВВП на душу населения по данным Международного валютного фонда за 2010 г. Ирландия, в свою очередь, является отстающей практически по всем исследуемым ресурсам на начало рассматриваемых промежутков времени, но достаточно быстро догоняет по уровню потребления остальные страны Западной Европы.

Анализ матриц взаимного влияния, построенных на основе логарифмически-линейной цепочки, позволил выявить закономерности в рас-

пределении ресурсов, которые представлены в табл. 1. Каждая клетка таблицы разделена на четыре части, соответствующие четырем рассматриваемым ресурсам в порядке обхода по часовой стрелке, начиная с верхнего левого угла клетки. Знак «+» в k -й части клетки с координатами (i, j) означает, что увеличение доли ресурса k у страны i ведет к увеличению данного ресурса у страны j , и данное влияние значимо на уровне $\alpha = 0,05$. Знак «++» говорит об аналогичной закономерности, значимой на уровне $\alpha = 0,01$. Знаки «-» и «--» означают наличие закономерности, противоположной описанной выше, т. е. не положительное, а отрицательное входное влияние доли ресурса k у страны i на долю этого ресурса у страны j .

Как видно из приведенной таблицы, доля Швейцарии по таким ресурсам, как электричество и сотовая связь, получает отрицательное входное влияние от долей этих ресурсов большинства других стран. Доля электричества Нидерландов, напротив, получает положительное входное влияние долей электричества других стран. Кроме того, доля потребляемой энергии Австрии отрицательно влияет на изменение доли данного ресурса у Бельгии, Франции, Германии, Ирландии, Нидерландов и Великобритании. Что касается Люксембурга, изменение долей потребляемых им ресурсов не зависит от изменения долей этих ресурсов у других стран Западной Европы.

Таблица 1

Взаимное влияние долей потребляемых ресурсов странами Западной Европы

	А.	Б.	Ф.	Г.	И.	Л.	Н.	Ш.	В.
А.			--	--	--	--	--	--	--
Б.		++			-		+	--	+
Ф.			+	+	++				
Г.					++	+		++	-
И.							++		++
Л.		+						++	--
Н.		++	+	--	+	-			
Ш.		+						++	-
В.									++

Таблица 2

Сравнение коэффициентов корреляции для моделей на основе вероятностных цепочек с логистическим ростом и логарифмически-линейных вероятностных цепочек

Вид модели / Ресурс	Электричество	Энергия	Интернет	Сотовая связь
Цепочки с логистическим ростом	0,99495	0,99644	0,98228	0,97269
Логарифмически-линейные цепочки	0,99898	0,99863	0,99640	0,99779

Сравнение построенных моделей

Поскольку в настоящей статье проводится построение моделей с использованием двух видов вероятностных цепочек, это дает возможность оценить и сравнить данные виды вероятностных цепочек в качестве инструментов моделирования. Для определения тесноты связи между эмпирическими данными и построенными моделями были вычислены коэффициенты корреляции, которые приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, логарифмически-линейные цепочки более точно отражают реальное распределение ресурсов между странами Западной Европы на протяжении рассматриваемых промежутков времени. Проиллюстрируем данную особенность графиками распределения электричества между странами Западной Европы (рис. 1–3).

Основные результаты

Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод о преимуществе логарифмически-линейных цепочек как инструментов моделирования перед цепочками с логистическим ростом.

Нельзя не отметить и следующую закономерность: хотя изменение долей ресурсов, потребляемых Люксембургом, может влиять на изменение долей ресурсов, потребляемых другими странами Западной Европы, Люксембург, в свою очередь, не испытывает аналогичного влияния со стороны остальных стран.

Таким образом, в результате исследования построены модели распределения ресурсов между странами Западной Европы на основе вероятностных цепочек двух видов; проведено сравнение этих вероятностных цепочек как инструментов моделирования, а также анализ взаимного влияния долей потребляемых ресурсов.

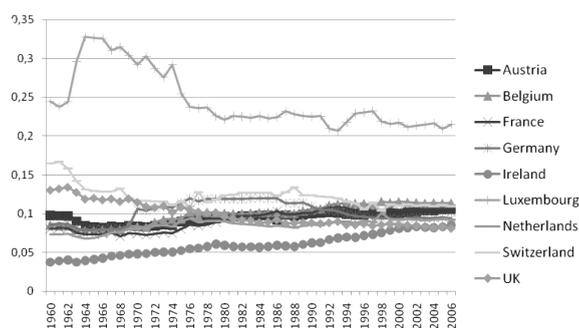


Рис. 1. Эмпирическая динамика распределения электричества между странами Западной Европы

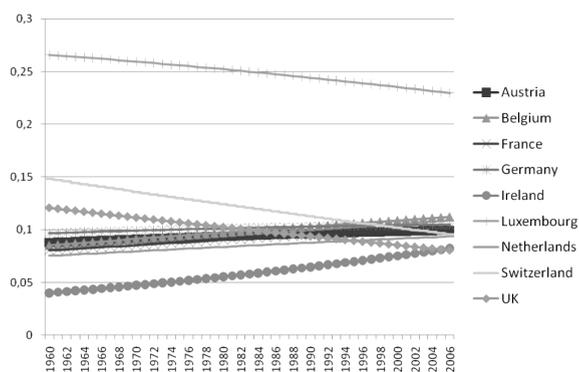


Рис. 2. Динамика распределения электричества между странами Западной Европы с логистическим ростом

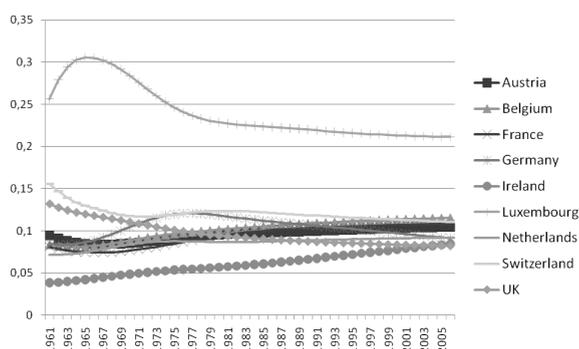


Рис. 3. Логарифмически-линейная динамика распределения электричества между странами Западной Европы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sonis, M.** Discrete non-linear probabilistic chains [Текст] / M. Sonis // Functional differential equations. – 2003. –Vol. 10. –Iss. 3–4. –P. 593–639.
2. **Kamarianakis, Y.** Geographical competition-complementarity relationships between Greek regional economies [Текст] / Y. Kamarianakis, V. Kaslis // ERSA Working paper. –2005.
3. **Nazara, S.** Interregional competition and complementarity in Indonesia [Текст] / S. Nazara, M. Sonis, G.J.D. Hewings // REAL Discussion Paper. –Urbana, Illinois, University of Illinois. –2001.
4. **Dall'erba, S.** Competition, complementarity and increasing disparities among the regions of Spain and Portugal [Текст] / S. Dall'erba // Revue d'Economie Regionale et Urbaine. –2004. –Iss. 2. –P. 311–330.
5. **Кремер, Н.Ш.** Эконометрика [Текст]/ Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко. –М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. –311 с.
6. **Кремер, Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / Н.Ш. Кремер. –М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2009. –551 с.
7. **Бородич, С.А.** Эконометрика: Учеб. пособие [Текст]/ С.А. Бородич. –Минск: Новое знание, 2001. –408 с.

УДК 51-77; 519.22; 316.4.057

Д.Н. Верзилин, Т.Г. Максимова

РЕКОНСТРУКЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СОЦИУМА

Постановка задачи

Рассматриваются объекты (элементы социума) пребывающие в заданном состоянии на момент наблюдения. Такой способ формирования статистической совокупности широко используется при организации статистических наблюдений [1]. Момент времени наблюдения принято называть *критическим*. *Критический момент* статистического наблюдения – это момент времени, по состоянию на который производится регистрация собираемых сведений в процессе статистического наблюдения [2].

Необходимо понимать, что характеристики статистической совокупности, сформированной по состоянию на критический момент наблюдения, отличаются от характеристик исходной совокупности объектов. Рассмотрим соответствующие этим совокупностям два *распределения времени пребывания в заданном состоянии*.

Наряду с названными распределениями критический момент времени статистического наблюдения определяет еще два распределения: распределение прошедшего времени и распределение оставшегося времени. Под *распределением прошедшего времени* будем понимать распределение времени, прошедшего от момента перехода объекта (элемента социума) в заданное состояние

до критического момента времени. Под *распределением оставшегося времени* будем понимать распределение времени от критического момента до момента изменения состояния. Таким образом, введено в рассмотрение четыре вероятностных распределения времени.

Как правило, имеющиеся статистические данные позволяют непосредственно оценить только одно из распределений – распределение времени, прошедшего от перехода в заданное состояние до критического момента времени. Задача состоит в определении взаимосвязей между распределениями и установлении способов оценки самих распределений.

Далее подробно рассмотрим ситуацию, характеризующуюся тем, что, во-первых, появление новых объектов (элементов социума) с заданным состоянием (переход объектов в заданное состояние) описывается установившимся стационарным потоком событий, т. е. математическое ожидание числа новых объектов на интервале времени зависит только от длины этого интервала, и, во-вторых, появление новых объектов является массовым в том смысле, что математическое ожидание времени между последовательными появлениями достаточно мало по сравнению с математическим ожиданием продолжительности пребывания объектов в заданном состоянии.

Для описанной ситуации можно полагать справедливым следующее допущение. Если объект переходит в пределах некоторого интервала времени в заданное состояние, то момент перехода представляет собой равномерно распределенную на данном интервале случайную величину.

Взаимосвязи между распределениями времен

Введем обозначения: $F(t)$ и $f(t)$ – функция и плотность распределения (безусловная) времени пребывания в состоянии; $R(t)$ и $r(t)$ – функция и плотность распределения прошедшего (до момента наблюдения) времени пребывания в состоянии; $Q(t)$ и $q(t)$ – функция и плотность распределения оставшегося (от момента наблюдения) времени пребывания в состоянии; $H(t)$ и $h(t)$ – функция и плотность распределения времени пребывания в состоянии при условии, что состояние наблюдалось в некоторый произвольный, но фиксированный момент времени; $U(t_1, t_2)$ и $u(t_1, t_2)$ – функция и плотность совместного распределения прошедшего t_1 и оставшегося t_2 времени пребывания в состоянии.

Заметим, что доля объектов, не сменивших свое состояние среди объектов, перешедших в заданное состояние t единиц времени назад, равна $1 - F(t)$. Поэтому при сделанных предположениях $r(t)$ пропорционально $1 - F(t)$, откуда:

$$r(t) = \frac{1 - F(t)}{\int_0^{+\infty} (1 - F(t)) dt} = \frac{1}{\mu} (1 - F(t)),$$

где μ – математическое ожидание безусловного времени пребывания в состоянии, при этом $1/\mu$ является нормирующим множителем

$$R(t) = \frac{1}{\mu} \int_0^t (1 - F(\tau)) d\tau.$$

Условная функция распределения оставшегося времени пребывания в заданном состоянии при условии, что время, прошедшее от момента перехода в состояние, равно θ , определяется следующим образом:

$$Q(t/\theta) = \int_0^t \frac{f(\tau + \theta) d\tau}{(1 - F(\theta))}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} Q(t) &= \int_0^{+\infty} r(\theta) Q(t/\theta) d\theta = \int_0^{+\infty} \left(r(\theta) \int_0^t \frac{f(\tau + \theta) d\tau}{(1 - F(\theta))} \right) d\theta = \\ &= \frac{1}{\mu} \int_0^{+\infty} \int_0^t f(\tau + \theta) d\tau d\theta = \frac{1}{\mu} \int_0^t \int_0^{+\infty} f(\tau + \theta) d\theta d\tau = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{\mu} \int_0^t (1 - F(\tau)) d\tau = R(t).$$

Таким образом, при сделанных допущениях $Q(t)$ тождественно равно $R(t)$, а $q(t)$ тождественно равно $r(t)$.

Приведенные соотношения позволяют выразить $U(t_1, t_2)$ и $u(t_1, t_2)$.

Поскольку

$$R(t_1) = \int_0^{+\infty} \int_0^{t_1} u(\theta, \tau) d\theta d\tau = \frac{1}{\mu} \int_0^{+\infty} \int_0^{t_1} f(\tau + \theta) d\theta d\tau,$$

$$Q(t_2) = \int_0^{t_2} \int_0^{+\infty} u(\theta, \tau) d\theta d\tau = \frac{1}{\mu} \int_0^{t_2} \int_0^{+\infty} f(\tau + \theta) d\theta d\tau.$$

$$\begin{aligned} \text{Получаем } u(t_1, t_2) &= \frac{f(t_1 + t_2)}{\mu}, \quad U(t_1, t_2) = \\ &= \frac{1}{\mu} \int_0^{t_2} \int_0^{t_1} f(\tau + \theta) d\theta d\tau. \end{aligned}$$

Для определения $H(t)$ предположим, что на момент наблюдения прошло τ единиц времени от перехода в заданное состояние. При этом τ может принимать значения от нуля до t .

Тогда $H(t) = \frac{1}{\mu} \int_0^t (F(t) - F(\tau)) d\tau$, где μ – математическое ожидание безусловного времени пребывания в заданном состоянии, $1/\mu$ – нормирующий множитель.

Далее получаем $h(t) = H'(t) = \frac{1}{\mu} f(t)$. В другой записи: $H(t) = \frac{1}{\mu} \int_0^t \tau f(\tau) d\tau$.

Заметим, что полученные распределения $R(t)$, $Q(t)$, $H(t)$ возникают в другом контексте при рассмотрении процессов восстановления и, в частном случае, когда $F(t)$ соответствует экспоненциальному распределению, при рассмотрении так называемого *парадокса ожидания* [3].

Легко заметить, что $r(0) = q(0) > 0$, $r(t)$, $q(t)$ – тождественно равные убывающие функции, $h(0) = 0$.

Моменты распределений

Введем обозначения: μ и σ^2 – математическое ожидание и дисперсия безусловного времени пребывания объектов в заданном состоянии; m – математическое ожидание времени пребывания в заданном состоянии при условии, что состояние наблюдалось в некоторый произвольный, но фиксированный момент времени.

Очевидно, что математическое ожидание про-

шедшего до момента наблюдения времени пребывания в состоянии совпадает с математическим ожиданием оставшегося времени и равно $m/2$.

Пользуясь равенствами $\sigma^2 = \int_0^{+\infty} \tau^2 f(\tau) d\tau - \mu^2$, $m = \frac{1}{\mu} \int_0^{+\infty} \tau^2 f(\tau) d\tau$, получаем решение $m = \mu + \sigma^2/\mu$.

С другой стороны, учитывая, что $F(t) = 1 - \mu r(t)$, получаем $\mu = \frac{1}{r(0)}$, $\sigma^2 = \frac{mr(0) - 1}{(r(0))^2}$. Можно заметить, что $\frac{1}{\mu} = \int_0^{+\infty} \frac{h(x)}{x} dx$, другими словами, величина, обратная к математическому ожиданию времени (безусловного) пребывания в состоянии, равна математическому ожиданию обратной величины ко времени пребывания в состоянии, при условии, что состояние наблюдалось в некоторый произвольный, но фиксированный момент времени.

Последовательная реконструкция данных о безусловном времени пребывания объектов (элементов социума) в заданном состоянии

В результате статистического наблюдения формируется статистическая совокупность объектов (элементов социума), находящихся в критический момент времени в заданном состоянии. Как было показано, характеристики объектов, составляющих статистическую совокупность, могут существенно отличаться от характеристик безусловной совокупности объектов, которые находились в том же состоянии в прошлом, либо перейдут в него в будущем. Как правило, для объектов статистической совокупности известна или может быть оценена продолжительность времени, прошедшего от момента перехода в заданное состояние до критического момента времени. По имеющейся выборке необходимо оценить описанные выше вероятностные распределения.

Если вид безусловного распределения времени неизвестен, то целесообразно использовать непараметрические методы оценки плотности $r(t)$. Заметим, что если $r(t)$ известно, то рассмотренные выше функции распределения могут быть легко выражены следующим образом (использованы определенные выше взаимосвязи между распределениями):

$$Q(t) = R(t) = \int_0^t r(\tau) d\tau, \quad F(t) = 1 - \frac{r(t)}{r(0)},$$

$$H(t) = R(t) - tr(t), \quad Q(t|\theta) = 1 - \frac{r(t + \theta)}{r(\theta)}.$$

Если функция $F(t)$ известна с точностью до параметров μ и σ^2 , то, как было показано выше, достаточно оценить $r(0)$ и m .

Целесообразно использовать следующую общую последовательность этапов, обеспечивающих реконструкцию данных о безусловном времени пребывания объектов (элементов социума) в заданном состоянии.

1. Построение модифицированной гистограммной оценки (оценки максимального правдоподобия) плотности $r(t)$ на основе выборки, содержащей сведения о продолжительности пребывания в заданном состоянии на критический момент времени. Построение такой оценки не требует предварительного оценивания параметров распределения.

2. Предварительное оценивание параметра $\mu = r(0)$.

3. Предварительное оценивание функции $H(t)$.

4. Осуществление статистического моделирования полного времени пребывания объектов в заданном состоянии при условии, что оно наблюдалось в критический момент.

5. Оценивание параметра $\mu = r(0)$ на основе выборки величин, обратных к полному условному времени пребывания объектов в заданном состоянии.

6. Построение модифицированной ядерной оценки плотности $r(t)$. В качестве параметра используются полученные оценки величины $\mu = r(0)$.

7. Корректировка ядерной оценки плотности в нуле, окончательное оценивание $\mu = r(0)$ и $\sigma^2 = \mu(\mu - m)$, где m – удвоенное среднее значение времени, прошедшего от перехода в состояние до критического момента.

8. Определение функций распределения $Q(t)$, $R(t)$, $F(t)$, $H(t)$, $Q(t|\theta)$ на основе ядерной оценки плотности $r(t)$, либо параметрическое оценивание $F(t)$ по значениям μ и σ .

Далее подробно описываются процедуры построения оценок плотности $r(t)$, затем приводятся данные вычислительных экспериментов, иллюстрирующие реализацию перечисленных этапов реконструкции данных и подтверждающих работоспособность предложенной схемы реконструкции. Анализируется точность получаемых оценок. Рассматриваются возможные

обобщения выполненной постановки задачи об определении вероятностных характеристик безусловного времени пребывания объектов в заданном состоянии.

Процедуры оценивания плотности распределения условного времени пребывания объектов в заданном состоянии

Предлагается использовать две оценки плотности вероятностного распределения: оценку максимума правдоподобия [4] и модифицированную ядерную оценку с использованием симметризации наблюдений, предложенную в работе [6].

Выбор оценок обусловлен свойствами плотности $r(t) = \frac{1}{\mu}(1 - F(t))$:

- 1) $r(t)$ определена на интервале $[0, +\infty)$;
- 2) $r(t)$ ограничена сверху и достигает максимального значения, равного $1/\mu$, $\mu > 0$ в нуле;
- 3) $r(t)$ монотонная функция.

Аргументацию, обуславливающую выбор двух оценок плотности с перечисленными свойствами, можно найти в работе [6]. Анализ точности получаемых оценок приведен ниже.

Оценка максимума правдоподобия Гренандера (модифицированная гистограммная оценка) представляет собой плотность r_n , для которой максимально произведение $\prod_{i=1}^n r_n(x_i)$, где x_i , $i = 1, \dots, n$ – выборка значений времени, прошедшего от перехода в состояние до критического момента. Оптимизационная задача отыскания такой плотности имеет следующее решение [5].

Пусть $R_n(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Ind}[x_i \leq t]$ – эмпирическая функция распределения.

Здесь $\text{Ind}[x_i \leq t] = 1$, если $x_i \leq t$ и $\text{Ind}[x_i \leq t] = 0$ – иначе.

Пусть G_n – наименьшая вогнутая мажоранта для R_n , тогда $r_n(t) = G_n'(t)$.

Очевидно, что $G_n(t)$ представляет собой кусочно-линейную функцию, соответственно, $r_n(t)$ является кусочно-постоянной функцией (гистограммой).

Предлагается следующая процедура построения $G_n(t)$, основанная на фильтрации узловых точек $(t_1, y_1), (t_2, y_2), \dots, (t_m, y_m)$ графика функции $R_n(t)$. Здесь $m \leq n$. Каждая абсцисса t_k , $k = 1, \dots, m$ совпадает с хотя бы одним x_i , $i = 1, \dots, n$, $(y_k - y_{k-1})$ равняется числу совпадений, деленному на n . При осуществлении однократной

фильтрации точки (t_i, y_i) , $i = 2, \dots, m - 1$ удаляются из списка узловых точек при выполнении условия $\frac{y_i - y_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} < \frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i}$.

После однократной фильтрации оставшиеся точки графика функции $R_n(t)$ нумеруются заново. Процедура фильтрации повторяется, если приведенное условие выполнено хотя бы для одной точки графика.

Модифицированная ядерная оценка. Основы ядерного оценивания плотностей вероятностных распределений разработаны в трудах [7, 8]. Ядерная оценка $f_n(x)$ плотности $f(x)$ определяется как $f_n(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$, где K – некоторая абсолютно интегрируемая плотность (ядро).

В дополнение к отмеченным выше свойствам функции $r(t)$ будем считать, что ее носителем является ограниченный интервал $0 \div a$. Будем оценивать функцию $f(t) = ar(at)$ с носителем $0 \div 1$.

Дополнительно выполним следующую процедуру симметризации.

Пусть $g_n(t)$ – ядерная оценка, построенная по выборке Y_1, \dots, Y_n , где $Y_i = \pm X_i$, $i = 1, \dots, n$. Знаки выбираются случайным образом, равновероятно. Тогда $f_n(t) = g_n(t) + g_n(-t)$, $t > 0$.

Далее полагаем, что $K(x)$ – треугольная равнобедренная плотность на интервале $-1 \div 1$, $h = \left(\frac{6b^2}{\pi n}\right)^{1/3}$. Здесь b – оценка снизу для параметра μ . Таким образом, для применения оценки необходимо предварительно оценить μ .

Получаем следующую последовательность соотношений для определения оценки $r_n(t)$ плотности $r(t)$:

$$g_n(t) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{t - Y_i}{h}\right), f_n(t) = g_n(t) + g_n(-t), t > 0,$$

$$r_n(t) = \frac{1}{a} f_n\left(\frac{t}{a}\right).$$

Далее приводятся результаты вычислительных экспериментов, иллюстрирующие особенности получения и применения оценок плотностей условного прошедшего времени пребывания в состоянии. Асимптотические свойства оценок рассматриваются ниже.

Вычислительные эксперименты

Методика организации вычислительных экспериментов рассмотрена на примере нормально-го распределения безусловного времени пребы-

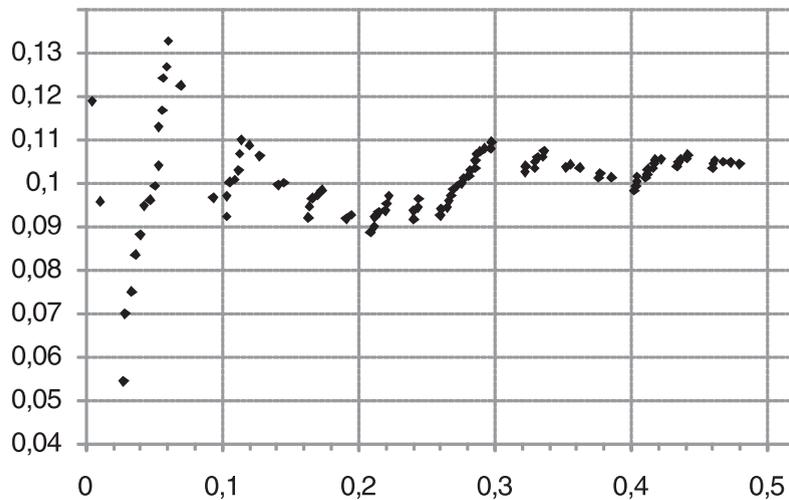


Рис. 1. Последовательность оценок $r(0)$

вания объектов (элементов социума) в заданном состоянии с параметрами $\mu = 10, \sigma^2 = 3$.

Математическое ожидание полного условного времени (при условии, что состояние наблюдалось в критический момент) равно 10,3 в соответствии с равенством $m = \mu + \frac{\sigma^2}{\mu}$.

Статистическое моделирование условного времени пребывания в заданном состоянии осуществлялось следующим образом. На основе применения программного датчика случайных чисел было получено 10 000 реализаций нормально распределенной случайной величины с параметрами $\mu = 10, \sigma^2 = 3$. Из полученной выборки отобрано 2000 чисел, распределение которых приблизительно соответствует условному прошедшему времени пребывания объектов в заданном состоянии при условии, что состояние наблюдалось в критический момент. Использовалась простейшая процедура случайного отбора с возможностью повторного выбора того же числа в соответствии с которой вероятность выбора числа пропорциональна этому числу. Далее полученная выборка X_1, \dots, X_n ($n = 2000$) использовалась как исходная выборка наблюдений условного прошедшего времени пребывания в состоянии.

Таким образом, задача заключалась в моделировании по исходной выборке теоретически известных вероятностных распределений (в т. ч. $F(t)$) с последующей оценкой точности моделирования.

График эмпирической функции распределения условного прошедшего времени пребывания в заданном состоянии содержал около 2000 узло-

вых точек. Принято, что носителем функции $r(t)$ является интервал $0 \div 14$. В результате применения описанной выше процедуры фильтрации количество узловых точек сократилось до 25, включая точки, для которых $t = 0$ и $t = 14$ (границы интервала-носителя $r(t)$). Оставшиеся узловые точки использованы для построения наименьшей вогнутой мажоранты эмпирической функции распределения.

Получена кусочно-линейная оценка $\hat{r}(t)$ функции $r(t)$.

Как показано ниже, полученная оценка является приемлемой в смысле метрики

$$L_1(r, \hat{r}) = \int_0^{+\infty} |\hat{r}(t) - r(t)| dt = 0,0295.$$

Заметим, что важный для оценки параметрических распределений параметр $r(0)$ (теоретическое значение 0,1) не может быть непосредственно оценен по значению $\hat{r}(0) = 0,132$.

Сложность непосредственного оценивания $r(0)$ по выборке X_1, \dots, X_n иллюстрирует рис. 1, на котором показана последовательность оценок $r(0)$, получаемых по k ближайшим к нулю значениям $X_k, k = 1, \dots, 100$. При правильном выборе k или окрестности нуля, может быть получена точная оценка (близкая к 0,1). Предлагается следующий метод поэтапного оценивания $r(0)$. Вначале определяется функция распределения $H(t)$ полного условного времени пребывания в заданном состоянии, затем осуществляется статистическое моделирование полного условного времени. После этого в качестве оценки для $r(0)$ выбирается среднее значение обратных величин.

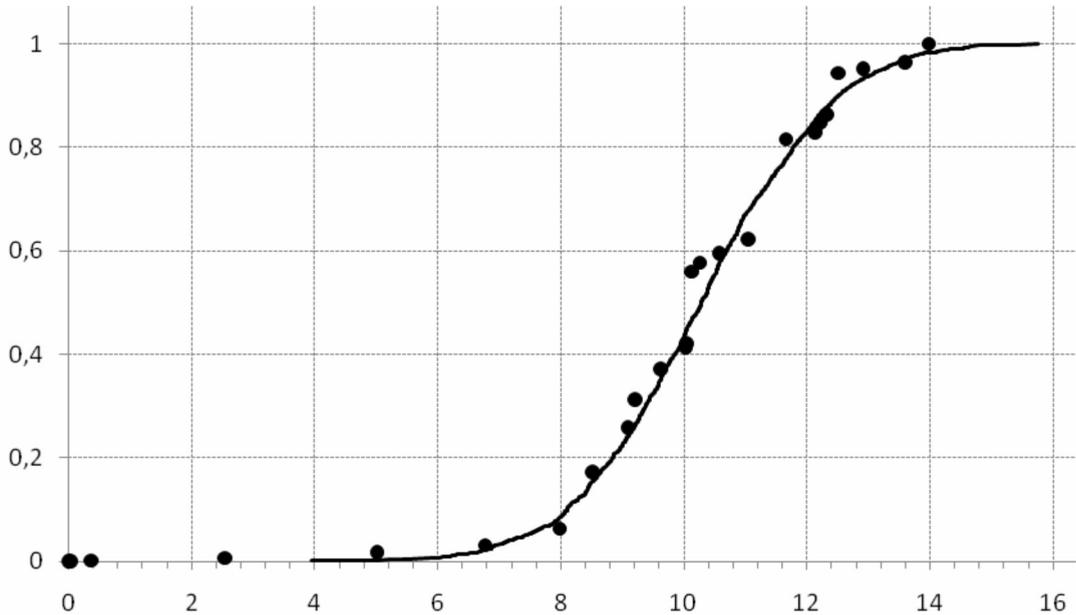


Рис. 2. Узловые точки оценки $H(t)$

Использовано соотношение $H(t) = R(t) - tr(t)$. Полученные узловые точки оценки $\hat{H}(t)$ функции $H(t)$ показаны на рис. 2.

Для сравнения приведен теоретический график $H'(t)$. В качестве $\hat{H}(t)$ использовалась кусочно-линейная интерполяция, выполненная по узловым точкам.

Выборка случайных значений полного условного времени пребывания в состоянии построена с помощью метода обратной функции. Очередное значение времени t_i выбиралось в соответствии с условием $\xi_i = \hat{H}(t_i)$, где ξ_i – случайное число, подчиняющееся равномерному распределению на интервале $0 \div 1$.

Применение описанного метода обеспечило получение оценки $r(0) = 0,1014$ и $\mu = 9,862$.

С учетом того, что оценкой для m является удвоенное среднее значение \bar{X} элементов $X_i, i = 1, \dots, n$ и исходной выборки, получаем:

$$m = \bar{X} \times 2 = 10,256; \sigma^2 = (m - \mu)\mu = 3,89.$$

Полученное значение μ позволило в качестве нижней границы b для параметра μ при построении ядерной оценки плотности принять $b = 9$.

Построены графики функций, последовательно реконструируемых при построении оценки $r_n(t)$ плотности $r(t)$. График функции распределения $R_n(t)$ восстановлен по плотности. Гистограммная и ядерная оценки взаимно дополняют друг друга. Функция $r_n(t)$ претерпевает разрыв в нуле. Получено $r_n(0) = 0,05$. Это значение под-

лежит замене. В то же время, вблизи нуля $r_n(t)$ очень близко к теоретическому значению, равному 0,1. Гистограммная оценка точнее с точки зрения метрики L_1 и лучше при приближении к правой границе интервала-носителя $r(t)$.

Более подробно полученные оценки анализируются ниже при рассмотрении их точности.

Анализ точности реконструированных сведений о времени пребывания элементов социума в заданном состоянии

Как было показано выше, для реконструкции сведений о времени пребывания (объектов) элементов социума в заданном состоянии ключевые значения имеют точности оценивания плотности $r(t)$ распределения прошедшего условного времени пребывания объектов в состоянии.

Имеются данные об асимптотическом поведении использованных оценок при увеличении объема использованной выборки.

Рассмотрим вначале поведение гистограммной (максимума правдоподобия) оценки Гренандера [4] f_n плотности f по выборке их n элементов. В работе [9] показано, что если f строго убывает на $0 \div 1$, имеет непрерывную и ограниченную производную, то

$$n^{1/3} E \left(\int_0^{+\infty} |f_n(t) - f(t)| dt \right) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} c_0 \int_0^{+\infty} |f'_n(t)| \frac{1}{2} f(t)^{1/3} dt.$$

Здесь E – знак математического ожидания.

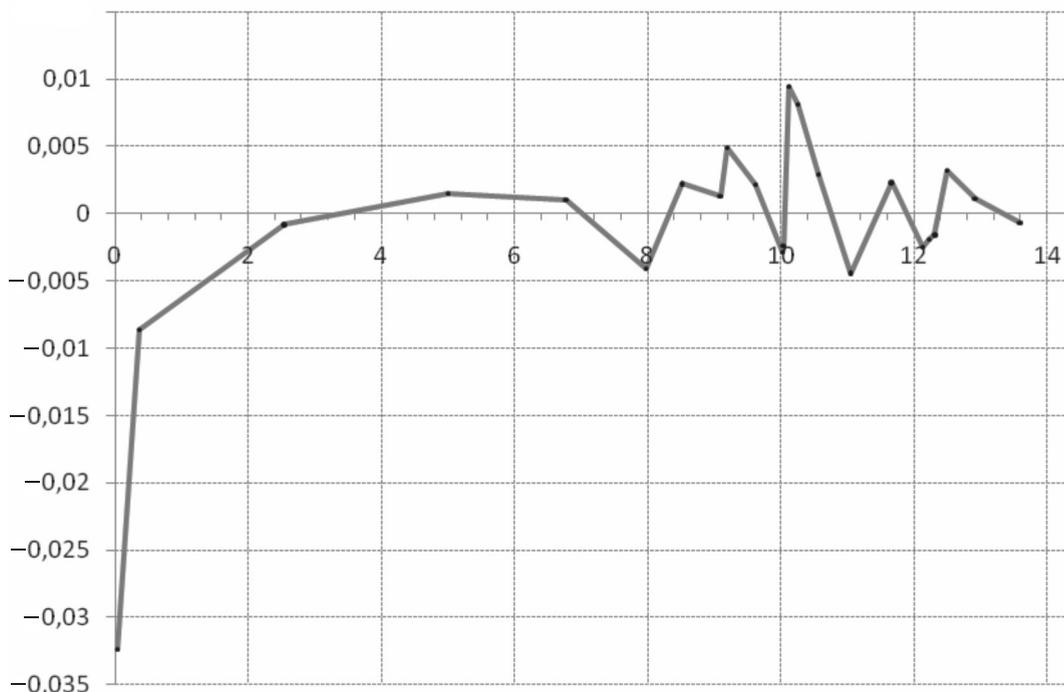


Рис. 3. График разности теоретической функции $r(t)$ и ее гистограммной оценки

Для использованной выше модифицированной ядерной оценки справедливо

$$\limsup_{n \rightarrow +\infty} \sup_r E \left(\int_0^{+\infty} |r_n(t) - r(t)| dt \right) \leq \left(\frac{6\pi}{b} \right)^{1/3},$$

где b – описанный выше параметр оценки, \sup берется по всем r рассмотренного класса.

К сожалению, приведенные сведения о сходимости оценок не обеспечивают построение доверительных интервалов для расстояния $L_1(r_n, r) = \int_0^{+\infty} |r_n(t) - r(t)| dt$ и для математического ожидания расстояния.

Заметим, что основным объектом оценки является функция распределения $F(t) = 1 - \mu r(t)$. Таким образом, даже если имеется оценка точности $L_1(r_n, r)$, то она позволяет оценить точность представления $F(t)$ в той же метрике L_1 . Однако для функции распределения интегральная оценка не представляет большой ценности, более важна оценка в метрике Чебышева:

$$\max_{t \in [0, +\infty)} |F_n(t) - F(t)|.$$

Приведенные соображения свидетельствуют о необходимости проведения вычислительных экспериментов по оцениванию различных вероятностных распределений времени пребывания объектов в заданном состоянии.

Теоретическим обоснованием эффективности вычислительных экспериментов может служить весьма общий результат, полученный в работе [10]. Для достаточно широкого класса оценок f_n плотности f показано, что значение расстояния $L_1(f_n, f)$ не подвержено существенной варибельности, т. е. для получения оценок $E(L_1(f_n, f))$ нет необходимости проводить многочисленные вычислительные эксперименты.

В частности, показано, что $\text{var} \left(\int_0^{+\infty} |f_n(t) - f(t)| dt \right) \leq \frac{4}{n}$ для гистограммных и ядерных оценок (с обычным положительным ядром).

На рис. 3 и 4 приведены результаты вычислительных экспериментов, характеризующие точность полученных оценок плотности распределения времени пребывания в заданном состоянии.

До сих пор рассматривалась ситуация, в которой появление новых объектов в заданном состоянии (переход объектов в заданное состояние) характеризуется установившимся стационарным потоком событий. Рассмотрим следующее обобщение. Будем считать, что известна функция $G(t)$ распределения времени, прошедшего от

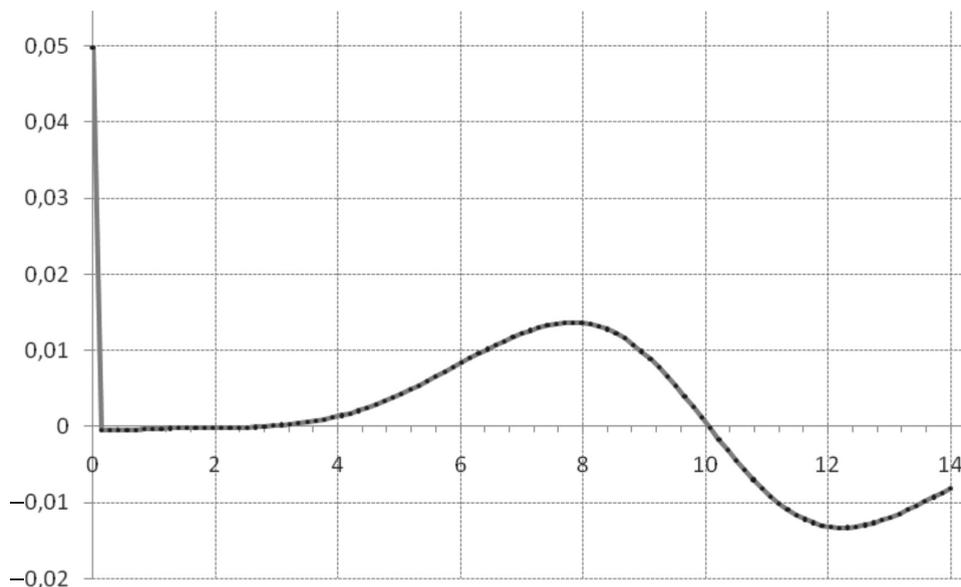


Рис. 4. График разности теоретической функции $r(t)$ и ее ядерной оценки $r_n(t)$

перехода объекта в заданное состояние до момента наблюдения (критического момента). Рассматриваются все случаи перехода в состояние независимо от того, остается объект в заданном состоянии в критический момент времени или нет. Если объект переходил в заданное состояние несколько раз, то все случаи рассматриваются независимо друг от друга, как если бы речь шла о разных объектах.

Заметим, что значения плотности распределения $g(t)$ пропорциональны интенсивности (как функции времени) перехода объектов в заданное состояние.

Введенные выше соотношения легко обобщаются для рассматриваемого случая:

$$r(t) = \frac{(1 - F(t))g(t)}{\int_0^{+\infty} (1 - F(t))dG(t)},$$

$$Q(t | \theta) = \frac{\int_0^t f(\tau + \theta)g(\tau + \theta)d\tau}{\int_0^t f(\tau)g(\tau)d\tau},$$

$$Q(t) = \int_0^{+\infty} r(\theta)Q(t | \theta)d\theta,$$

$$H(t) = \frac{\int_0^t (F(t) - F(\tau))g(\tau)d\tau}{\int_0^{+\infty} (F(t) - F(\tau))g(\tau)d\tau}.$$

Заметим, что в рассматриваемой ситуации $Q(t)$ и $R(t)$ могут не совпадать.

Если $G(t)$, $g(t)$ – известные функции времени, то по плотности $r(t)$ можно восстановить остальные распределения. Применявшиеся выше подходы по-прежнему актуальны. Наибольшую сложность составляет сбор данных о $G(t)$.

Представленные материалы в совокупности составляют методику реконструкции временных характеристик процессов изменения состояний элементов социума по данным выборочных наблюдений в фиксированный момент времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госконтракта 02.740.11.0437.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян, С.А. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных: Справ. издание [Текст]/С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Ме-

шалкин. –М.: Финансы и статистика, 1983.–471 с.

2. Статистика: Учебник [Текст]/Под ред. В.С. Мхтаряна. –М.: Экономист, 2006.–671 с.

3. **Феллер, В.** Введение в теорию вероятности и ее приложения [Текст]/ В. Феллер; Пер. с англ. –М.: Мир, 1984. В 2-х т. Т.2.– 738 с.
4. **Айвазян, С.А.** Теория вероятностей и прикладная статистика [Текст]/С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: Юнити, 2001. –Т. 1. –656 с.
5. **Grenander, U.** On the theory of mortality measurement [Текст] / U. Grenander // Skandinavise Aktuarietid-skrift. –1956. –P. II. –Vol.39. –P. 125–153.
6. **Деврой, Л.** Непараметрическое оценивание плотности [Текст]/Л. Деврой, Л. Дьерж/L1-подход; Пер. с англ. –М.: Мир, 1988. – 408с.
7. **Rosenblatt, M.** Remarks on some nonparametric estimates of a density function [Текст]/M. Rosenblatt// Ann. Math. Statist. –1956. –Vol.27.–P. 832–837.
8. **Parzen, E.** On the estimation of a probability density function and mode [Текст]/E. Parzen// Ann. Math. Statist. –1962. –Vol.33. –P.1056–1076.
9. **Groenebom, P.** Estimating a monotone density [Текст] / P.Groenebom //Proc. of the Neyman Kiefer Conference. –1983.
10. **Devroye, L.** An application of the Efron-Stein inequality in density estimation [Текст] /L. Devroye// The Annals of Statistics. –1987. –Vol.15. –№3. –P.1317–1320.

УДК 681.3.016

Д.Е. Бортяков, С.В. Мещеряков

НЕРЕКУРСИВНАЯ МОДЕЛЬ ИЕРАРХИИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Постановка задачи

В [2, 3] рассмотрены традиционные методы организации иерархии данных и их недостатки, главный из которых – наличие рекурсии в реляционной модели и запросах к базе данных (БД). Попытки избавиться от рекурсивности приводят к появлению избыточности (дополнительных полей) в модели данных и ограничениям в ее практической реализации по глубине вложенности и количеству объектов-потомков. В данной статье

поставлена задача разработки новой иерархической структуры данных, которая не содержит рекурсию и превосходит существующие модели по общепринятым критериям ресурсов занимаемой памяти, времени доступа к БД, ее масштабируемости [1].

Моделирование иерархии транспортных и технологических систем (ТТС) в объектно-реляционной СУБД (табл.) имеет специфику и связано с определенными трудностями. В про-

Пример иерархической структуры объектов ТТС

№	Наименование объекта
1.0	Цех первичной переработки продукции
1.1	Участок загрузки и обработки сырья
1.2	Участок отгрузки готовой продукции
1.2.1	Нагревательная установка
1.2.2	Установка вакуумной упаковки
1.2.3	Установка сортировки и складирования
2.0	Цех 2
...	
6.0	Ремонтно-механический цех
6.1	Здания и сооружения
6.2	Металлорежущие станки и инструмент
6.3	Трубопроводная и запорно-регулирующая арматура
6.4	Насосы и компрессоры
6.5	Грузоподъемные машины и механизмы
6.5.1	Надземные краны
6.5.1.1	Мостовые подвесные краны
6.5.2	Мостовые перегружатели
6.5.3	Грузовые лифты
6.5.4	Автокары
6.6	Компьютерное и электрооборудование

цессе эксплуатации объем хранимой информации непрерывно увеличивается, а иерархия ТТС усложняется.

1. Нарастивание парка ТТС, подлежащих учету. Наряду с появлением новых типов оборудования, устаревшие не удаляются из БД, т. к. с ними связаны технические мероприятия, проведенные в период эксплуатации.

2. Увеличение степени детализации. В результате ремонта и замены деталей и узлов они становятся отдельным объектом учета. Иерархия ТТС усложняется по глубине вложенности и степени разветвленности.

3. Расширение набора параметров, характеризующих техническое состояние объектов ТТС. Конструкция современных машин усложняется и для их обслуживания требуется контролировать все больше характеристик.

Предсказать потребности производства довольно сложно. Количество моделируемых объектов, их атрибутов, поток запросов к СУБД рано или поздно может достичь 100 % загрузки ее ресурсов, когда происходит критическое снижение производительности БД или отказ в обслуживании. Поэтому в статье поставлена вторая задача – тестирование новой структуры для оценивания поведения БД при накоплении иерархических данных.

Описание нерекурсивной модели иерархии данных

Для организации многоуровневой иерархии разработан специальный компонент NODE [6], который представляет собой новый, определяемый пользователем, тип данных. Он позволяет нумеровать иерархические объекты в виде последовательности чисел, разделенных точкой, где каждое число определяет один уровень вложенности. Например, значение '6.5.4' из таблицы (автокары) обозначает 4-й элемент 3-го уровня иерархии, у которого предок 5-й элемент 2-го уровня (грузоподъемные машины), для которого предок 6-й элемент 1-го уровня (ремонтно-механический цех).

Такой метод представления иерархии не имеет ограничений ни по глубине вложенности, ни по количеству потомков одного уровня. Кроме того, тип NODE поддерживает упорядоченность иерархических данных, так что, к примеру, будет справедливо следующее неравенство:

$$'6.5' < '6.5.4' < '6.6'. \quad (1)$$

Описание иерархической структуры таблицы для моделирования иерархии с использованием компонента NODE на языке SQL имеет вид:

```
CREATE TABLE TBL_NAME (  
ID NODE NOT NULL PRIMARY KEY, (2)  
NAME VARCHAR (254) NOT NULL)
```

Минимальная ширина таблицы БД – два столбца, другие могут добавляться в соответствии со спецификой предметной области. Потомки произвольного объекта иерархии имеют первичные ключи (ID) в диапазоне значений соседних родительских узлов. На примере объекта '6.5' из неравенства (1) все потомки грузоподъемных машин и механизмов (табл.) могут быть получены посредством следующего SQL-запроса. Количество таких потомков в общем случае не ограничено:

```
SELECT * FROM TBL_NAME (3)  
WHERE ID > '6.5' AND ID < '6.6'
```

Для выделения непосредственных потомков нужна дополнительная проверка длины первичного ключа. В нашем примере (1) с объектом '6.5' выборку прямых потомков 3-го уровня из таблицы (надземные краны за исключением мостовых подвесных, мостовые перегружатели, грузовые лифты, автокары) можно получить с помощью SQL-оператора:

```
SELECT * FROM TBL_NAME (4)  
WHERE ID > '6.5' AND ID < '6.6'  
AND LENGTH (ID) = 3
```

Все основные операции с иерархическими данными (добавление, удаление, перемещение и др.) выполняются средствами SQL. Кроме того, современные объектно-реляционные СУБД (MS SQL Server, IBM Informix, Oracle) предоставляют дополнительные возможности программирования функций на языке C, реализуемых на стороне сервера БД и повышающих эффективность SQL-запросов. Например, в операторе (4) проверку трех условий можно заменить одной функцией ISCHILD (прямые потомки):

```
SELECT * FROM TBL_NAME (5)  
WHERE ISCHILD (ID, '6.5')
```

Для иерархии ТТС (см. табл.) полный путь от объекта '6.5.4' (автокары) до корня иерархического дерева представляет собой набор {'6.5', '6.0'}, что означает грузоподъемные машины и механизмы в ремонтно-механическом цехе. В результате

перемещения объекта '6.5.4' со всей его ветвью потомков из подчинения предку '6.0' (ремонтно-механический цех) к новому родителю '1.2.3' (установка сортировки и складирования) все объекты перемещенной ветви получают новые уникальные порядковые значения ключа по следующим правилам, реализованным в СУБД:

$$\begin{aligned} '6.5.4' &\rightarrow '1.2.3.4' \\ '6.5.4.1' &\rightarrow '1.2.3.4.1' \\ '6.5.4.2' &\rightarrow '1.2.3.4.2' \\ &\dots \\ '6.5.*' &\rightarrow '1.2.3.*' \end{aligned} \quad (6)$$

При этом проверяется, находится ли перемещаемый объект '6.5.4' в непосредственном подчинении прародителя '6.0' или, другими словами, находятся ли автокары в ремонтно-механическом цехе.

Предложенный метод обладает несомненными преимуществами. Нумерация иерархических объектов интуитивно понятна и проста в реализации. Отсутствие рекурсии повышает производительность запросов БД по сравнению с рекурсивными моделями данных. Наконец, тип NODE является упорядоченным, позволяет построить индекс по полю ID и тем самым значительно ускорить доступ к данным.

Известно, что быстродействие последовательного перебора прямо пропорционально объему выборки данных [5]:

$$t \sim n \cdot k \quad (7)$$

и каждое избыточное поле требует 8 байт/запись, в то время как зависимость поиска по индексу от размера таблицы – логарифмическая:

$$t_i \sim \ln(n). \quad (8)$$

где t – время последовательного перебора; t_i – время поиска с использованием индекса; n , k – длина и ширина таблицы данных.

Время доступа к индексированной таблице не зависит от ее ширины k и, следовательно, менее чувствительно к увеличению объема данных. Для проверки этих утверждений поставлен вычислительный эксперимент.

Экспериментальная проверка нерекурсивной модели иерархии

С целью проверки относительного преимущества нерекурсивной модели иерархии данных по сравнению с традиционными поставлены две

серии вычислительных экспериментов по оценке производительности БД – в зависимости от глубины вложенности и размера иерархических таблиц. Конечная цель тестирования – не измерение абсолютных значений времени, а анализ их относительного изменения при увеличении числа уровней вложенности и длины иерархической таблицы данных.

Все тесты производительности проводились в компьютерной сети промышленного предприятия на стабилизированной системе, при отсутствии перегрузки ресурсов сервера БД (процессоров, оперативной и дисковой памяти). Каждая итерация теста выполнялась не менее трех раз, крайние максимальное и минимальное значения исключались из выборки. Из оставшихся измерений вычислялось среднее. Погрешность измерений, выполненных на стабилизированной системе, составила не более 2 %.

На рис. 1 приведены диаграммы сравнения производительности операции доступа в зависимости от глубины вложенности, а на рис. 2 – от размера таблицы БД для различных вариантов иерархии – традиционных и без рекурсии. Для оценки полученных преимуществ использованы относительные показатели R_{y1} и R_{z1} (рис. 3 и 4), которые позволяют оценить производительность в удельных единицах измерения (с/уровень, с/запись) и вычисляются согласно известной методике SPEC [4] как отношение времени доступа к числу уровней вложенности и длине иерархической таблицы:

$$R_{y1} = T_n / N_y, \quad (9)$$

$$R_{z1} = T_n / N_z, \quad (10)$$

где R_{y1} , R_{z1} – отношение времени доступа соответственно к числу уровней вложенности и количеству записей; T_n – измеренное время операции (с); N_y – глубина иерархии (уровней); N_z – длина таблицы (число записей).

Улучшение производительности оценивается коэффициентом:

$$P_T = T_2 / T_1, \quad (11)$$

где P_T – коэффициент улучшения производительности; T_1 , T_2 – абсолютные показатели измерения времени доступа соответственно для традиционной иерархии и модели без рекурсии.

Результаты тестирования показали преимущество нового подхода и область его эффективного применения. При наличии рекурсии время доступа

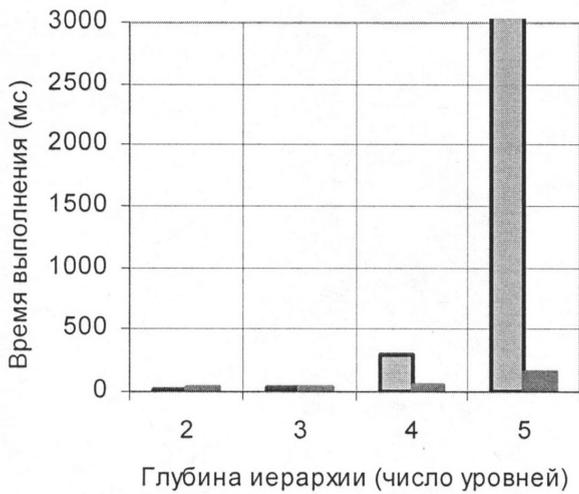


Рис. 1. Зависимость времени доступа от глубины иерархии

(■) традиционные иерархии; (■) иерархии без рекурсии

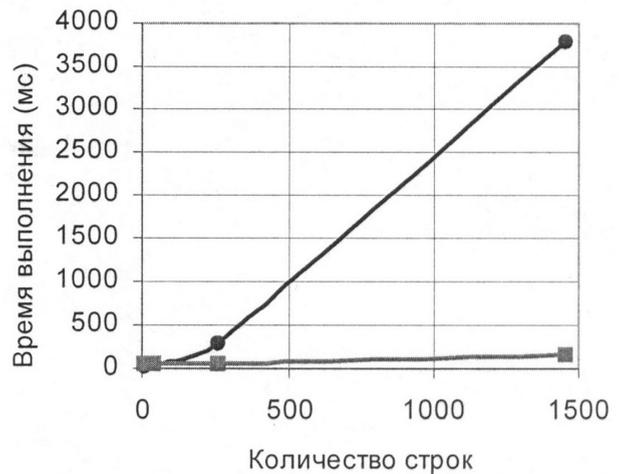


Рис. 2. Зависимость времени доступа от размера таблицы данных

(●) традиционные иерархии; (■) иерархии без рекурсии

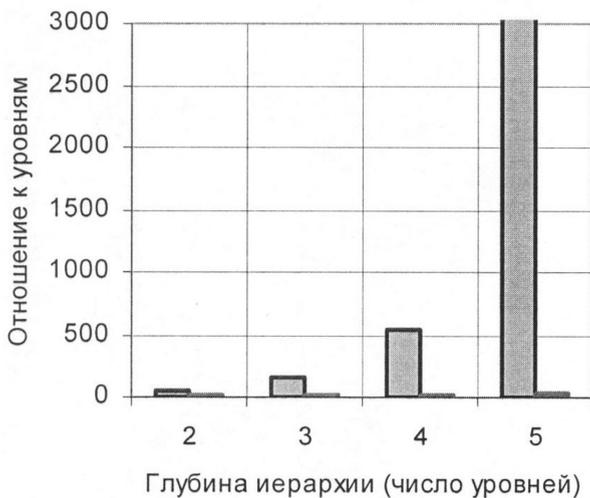


Рис. 3. Отношение времени доступа к числу уровней иерархии

(■) традиционные иерархии; (■) иерархии без рекурсии

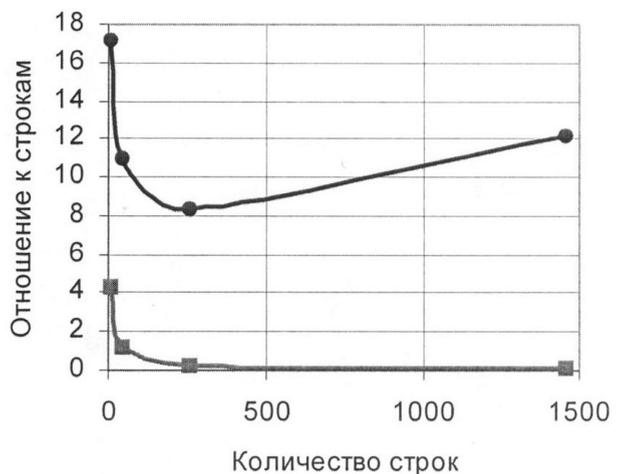


Рис. 4. Отношение времени доступа к количеству строк таблицы данных

(●) традиционные иерархии; (■) иерархии без рекурсии

зависит от объема данных пропорционально (рис. 2), а от глубины иерархии – экспоненциально (рис. 1), что подтверждается теоретическими выражениями (7) и (8). При отсутствии рекурсии сложность иерархии незначительно влияет на производительность. При небольшом объеме данных (до 500 записей, рис. 4) и ограниченной глубине иерархии (2–3 уровня, рис. 3) применение нового подхода неэффективно. Но с увеличением глубины вложенности отсутствие рекурсии и построенные индексы дают значительное улучшение показателя производительности P_T , вычисляемого по выражению (11), – от 4 до 125 раз в зависимости

от глубины иерархии и размера таблицы данных. Чем больше объектов иерархии и ее глубина, тем заметнее преимущество нерекурсивного метода по сравнению с традиционными.

Несмотря на стремительный прогресс в развитии информационных технологий, рекурсия по-прежнему остается основным недостатком и главным препятствием на пути применения традиционных моделей иерархии в объектно-реляционных СУБД. Рекурсивные связи и SQL-запросы замедляют получение упорядоченной выборки иерархических данных, а в случае некорректных ссылок могут привести к отказу

в обслуживании сервера БД. Новая структура с компонентом NODE не содержит рекурсию, поэтому ошибки иерархии не влияют на работу БД.

Тестирование показало более высокую производительность нерекурсивного метода по сравнению с традиционными. Построение индекса позволило упорядочить иерархические данные и, как результат, улучшить масштабируемость системы, возможность наращивать объем данных и глубину иерархии без ущерба производительности СУБД.

Известен пример успешной практической реализации модели (2) при моделировании иерархического дерева объектов ТТС в объектно-реляционной СУБД Informix [5].

Новый подход можно рекомендовать к использованию при создании информационных моделей промышленных объектов ТТС, для которых характерны глубокая детализация, широкий спектр технических параметров эксплуатации и непрерывно возрастающий объем хранимых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аносов, А.** Критерии выбора СУБД при создании информационных систем [Текст] / А. Аносов // Корпоративные базы данных: Мат. XVI техн. конф. – М.: РАН, 2001 (<http://citforum.ru/database/articles/criteria/>).
2. **Бортяков, Д.Е.** Проблемы иерархии данных в задачах проектирования специальных грузоподъемных механизмов и машин [Текст] / Д.Е. Бортяков, С.В. Мещеряков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 3.
3. **Мещеряков, С.В.** Сравнительный анализ вариантов организации иерархии в базах данных [Текст] / С.В. Мещеряков // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 1 (35). – С. 34–37.
4. **Французов, Д.** Новое поколение тестов SPEC [Текст] / Д. Французов, Д. Волков // Открытые системы. – 1996. – № 4 (<http://www.osp.ru/os/1996/04/58.htm>).
5. **Mescheryakov, S.** A Successful Implementation of a Data Structure for Storing Multilevel Objects with Varying Attributes [Text]/S. Mescheryakov//IBM. Developer Works. Information Management. Technical Library. –2002 (<http://www.ibm.com/developerworks/data/zones/informix/library/techarticle/0212mescheryakov/0212mescheryakov.html>).
6. **Roy, J.** Solving Hierarchical Problems with the Node Component [Электронный ресурс] / J.Roy // Informix Developer's Network. –2002. –Режим доступа: <http://www.informix.com/idn>

УДК 007.2

Г.С. Петриченко, Л.М. Крицкая, М.Ю. Срур

МЕТОДИКА ПОИСКА И УСТРАНЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКАХ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Проблема поиска неисправностей в электронных блоках средств вычислительной техники (ВТ) возникает в процессе производства, эксплуатации и ремонта. Поиск неисправностей возможен для устройств, обладающих следующими свойствами: устройство находится в состоянии отказа и разделено на функциональные элементы. Поиск неисправностей осуществляется путем выполнения диагностического эксперимента над объектом и распознавания его результатов.

В статье рассматривается одно из направлений построения алгоритма поиска неисправностей в электронных блоках средств вычислительной техники на примере жидкокристаллического монитора с применением информационного критерия (логико-вероятностного метода).

До настоящего времени при построении алгоритма поиска неисправностей в электронных блоках применялась технология ручного построения моделей объекта контроля (ОК). Наиболее часто при поиске неисправностей ОК представляют в виде функциональной или функционально-логической модели.

Современные электронные устройства представляют собой сложные многофункциональные динамические системы. При их эксплуатации необходимо оперативно реагировать на отказы ОК в реальном масштабе времени [1].

Логико-вероятностный метод стал теоретической и практической базой при построении алгоритма поиска неисправностей в ОК. Метод включает следующие этапы:

1) Постановку задачи моделирования и построение структурной и функциональной схемы объекта контроля.

2) Определение логической функции работоспособности ОК.

3) Построение многочлена расчетно-вероятностной функции и вычисление вероятностных показателей ОК.

Для анализа функционирования сложных систем можно применить аналитические логико-вероятностные модели [2, 3]. В моделях многих систем ОК существуют жесткие, детерминированные зависимости элементарных событий во времени, оказывающие сложное и противоречивое влияние на моделируемые процессы, в результате чего изменяется логическая модель функционирования системы. Важное место в решении проблемы учета зависимостей занимает разработка методов и алгоритма построения комбинаторно-последовательных логических функций работоспособности и неработоспособности систем.

Таким образом, возникла актуальная потребность выполнения научных исследований и разработок в направлении развития логико-вероятностных методов.

Процесс поиска и устранения дефектов в электронных блоках средств вычислительной техники может оцениваться различными критериями: стоимостными затратами, временными затратами, количеством проверок, необходимых для отыскания неисправности, или комбинациями этих критериев.

Последовательность операций поиска неисправностей в электронных блоках средств ВТ должна удовлетворять условию, согласно которому номер операции поиска должен определяться соотношением (1) и возрастать с увеличением отношения [4]:

$$N_i = \frac{t_{oi}}{q_i(t)}, \quad (1)$$

где t_{oi} – время обнаружения неисправности в i -м элементе; N_i – номер операции по обнаружению неисправности в i -м элементе; $q_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента.

Алгоритм поиска должен выполняться с условием минимальных затрат времени. Алгоритм разрабатывается по оптимальной схеме поиска неисправностей в электронных блоках. Схема поиска и устранения неисправностей может состоять из нескольких этапов:

определение неисправного блока;
нахождение неисправного элемента в блоке;
устранение неисправности в блоке.

Предположим, у нас имеется неисправный электронный блок – жидкокристаллический (ЖК) монитор, и нам с минимальными затратами времени необходимо определить в нем поврежденный элемент.

Задача состоит в минимизации общего времени при поиске неисправностей.

Решение задачи. При проектировании ЖК мониторов необходимо разработать эксплуатационную документацию и документацию по ремонту устройства в случае его неисправности. Перечни характерных неисправностей и их проявления содержатся также в таких документах, как технологические указания по выполнению регламентных работ и т. д. В данной статье показан способ построения алгоритма поиска неисправностей с использованием информационного критерия.

Типичные для ЖК мониторов неисправности и поломки: неисправность блока питания монитора (происходит в результате скачков напряжения в электросети пользователя и некачественного электропитания монитора); выход из строя платы формирования и обработки видеосигнала монитора (в основном происходит из-за старения элементов и нарушения температурного режима эксплуатации); нарушение цветопередачи и искажения изображения на экране; сбой в работе процессора монитора; выход из строя ламп подсветки и DC-AC инвертора (изображение на мониторе становится еле заметным, данная неисправность характерна для LCD мониторов); механические повреждения мониторов (попадание внутрь компьютерного устройства воды или прочих жидкостей и посторонних предметов – последствия от таких воздействий могут быть самыми разными, вплоть до полной поломки оборудования).

На рис. 1 представлена структурная схема устройства объекта контроля.

Алгоритм поиска неисправностей на основе информационного подхода состоит из четырех этапов.

Этап 1. Строится функционально-диагностическая модель объекта, подлежащего диагностированию. Функциональная модель состоит из функциональных элементов (ФЭ), а под ФЭ необходимо понимать отдельную деталь, каскад, группу каскадов, узел, блок, которые могут находиться в одном из двух состояний: работоспособ-

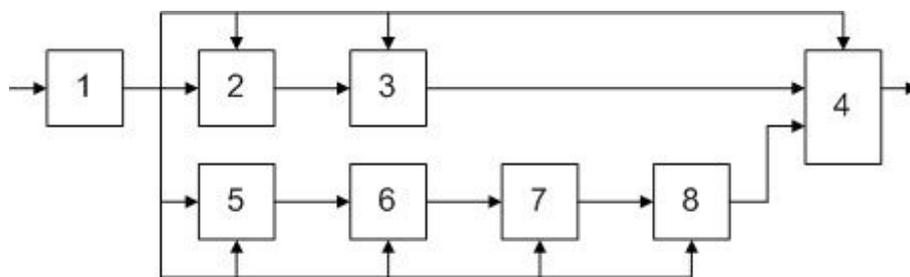


Рис. 1. Структурная схема жидкокристаллического монитора
 1 – блок питания; 2 – инвертор; 3 – CCFL- подсветка; 4 – TFT-LCD матрица; 5 – видеоадаптер; 6 – блок обработки видеоизображения; 7 – драйвер ЖК матрицы; 8 – плата истоков и затворов

ном (исправном) или неработоспособном (неисправном). Глубина поиска зависит от возможного конструктивного деления аппаратуры, места нахождения контрольных точек, количества функциональных элементов.

Этап 2. По функционально-диагностической модели объекта контроля строится таблица неисправностей (матрица состояний).

Этап 3. Вычисляются функции предпочтения, с которого необходимо начать поиск неисправностей, и определяются элементы, которые необходимо контролировать.

Этап 4. Построение дерева поиска неисправностей.

Этап 5. Построение логической функции, по которой можно определить неисправный элемент.

При большой сложности устройства целесообразнее строить несколько моделей, а если в аппаратуре контроля применены интегральные микросхемы и микросборки, которые не подлежат ремонту, то глубину поиска данного метода ограничивают этими элементами.

Функциональная модель строится непосредственно по структурной [4] или принципиальной электрической схеме контролируемого устрой-

ства. Как правило, она изображается графической схемой, на которой каждый функциональный элемент обозначен прямоугольником с некоторым количеством входящих стрелок (входных сигналов) и выходящей стрелкой (выходным сигналом). Выход любого элемента можно соединить с любым числом входов, в то время как вход любого элемента может быть соединен только с одним выходом.

Входы, которые не соединены ни с одним выходом, называются *внешними*. Эти входы означают внешние воздействия, которые подаются на объект контроля и обычно обозначаются X_{ij} , где i – номер функционального элемента, j – номер его входа. Выходы функционального элемента обозначаются буквой Y_i , где i – номер его выхода. Если сигнал с выхода используется в качестве входного для другого функционального элемента, то такой выход называют *связанным* или *промежуточным*. Выход элемента, сигнал с которого не используется в качестве входного для другого функционального элемента, называют *свободным*.

На рис. 2 представлена функциональная модель объекта контроля.

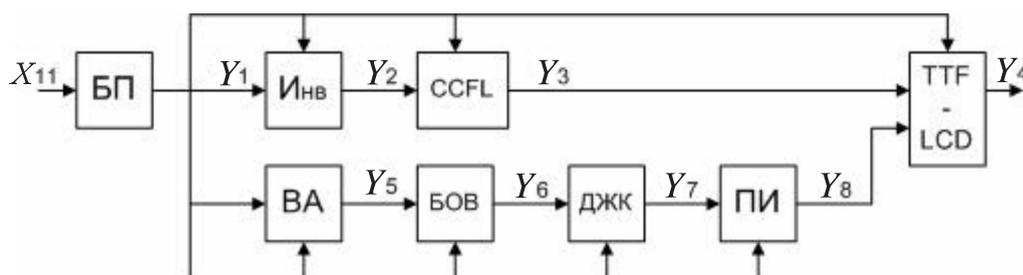


Рис. 2. Функциональная схема жидкокристаллического монитора
 БП – блок питания; Инв – инвертор; CCFL – подсветка; ТТФ-LCD – матрица; ВА – видеоадаптер; БОВ – блок обработки видеоизображения; ДЖК – драйвер ЖК матрицы; ПИ – плата истоков и затворов

Кроме построения функциональной модели ОК, необходимо еще определить множество его возможных состояний, т. е. перечислить все возможные комбинации одновременно отказавших элементов, а также определить перечень контролируемых параметров и указать значения допустимых входных сигналов, прикладываемых к каждому элементу.

В литературе отмечено [5], что общее число возможных состояний ОК при его разделении на N функциональных элементов составляет $2^N - 1$.

Определить такое сравнительно большое число состояний ОК является трудной задачей. В инженерной практике предполагают, что в ОК возможен отказ лишь одного функционального элемента, т. е. ограничиваются учетом одиночных отказов. При одиночных отказах сокращается число возможных состояний ОК, оно равно числу первичных функциональных элементов модели, т. е. $C_N^1 = N$. Данное предположение вытекает естественным образом из пуассоновского характера отказов электронных блоков. Определение N различных состояний ОК, а также учет влияния отказа одного функционального элемента на все остальные осуществляется с помощью таблицы или матрицы неисправностей.

По функциональной модели жидкокристаллического монитора (рис. 2) построим таблицу неисправностей (матрицу состояний) этап 2.

Таблица неисправностей представляет собой квадратную матрицу, в которой число строк равно числу функциональных элементов модели, а число столбцов – числу выходных параметров. Она заполняется на основании логического анализа функциональной модели ОК в предположении, что все выходные параметры функциональных элементов контролируются. Правила заполнения таблицы следующие.

Предполагают, что ОК находится в S_i -м состоянии, т. е. отказал i -й функциональный элемент. Этому событию соответствует недопустимое значение выходного параметра Y_i . На пересечении S_i -й строки и Y_i -го столбца записывается нуль. Кроме того, если при этом i -й функциональный элемент имеет также недопустимое значение выходного параметра, то на пересечении S_i -й строки и Y_i -го столбца тоже записывается нуль. В противном случае записывается единица.

Для ОК, структурная и функциональная модель которого изображена на рис. 1, 2, такая матрица состояний представлена в табл. 1.

Функциональная модель ОК – $F_{ок}$ и таблицы неисправностей – $T_{н}$ для любого контроля электронной аппаратуры задают связь между множеством возможных состояний S ОК, множеством контролируемых параметров Y и множеством результатов контроля этих параметров. Наличие такой информации об объекте контроля позволя-

Таблица 1

Состояния выходных сигналов

S_i	Y_i							
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8
S_1	0	0	0	0	0	0	0	0
S_2	1	0	0	0	1	1	1	1
S_3	1	1	0	0	1	1	1	1
S_4	1	1	1	0	1	1	1	1
S_5	1	1	1	0	0	0	0	0
S_6	1	1	1	0	1	0	0	0
S_7	1	1	1	0	1	1	0	0
S_8	1	1	1	0	1	1	1	0
Число состояний «0»	1	2	3	8	2	3	4	5
Число состояний «1»	7	6	5	-	6	5	4	3
Функция предпочтения контроля $W_i(Y_i)$	6	4	2	8	4	2	0	2

ет разработать программу поиска и локализации неисправностей в нем, т. е.

$$F_{ок} \Delta T_n = \langle S, Y, R \rangle, S = \{S_i\},$$

$$Y = \{Y_i\}, R = \{R_i\}.$$

Объект контроля проверяется по выходным параметрам, определим функцию предпочтения $W_i(Y_i)$ контроля выходного параметра. Функция предпочтения определяется разницей между количеством нулей в столбце Y_i и количеством единиц, взятых по модулю:

$$W_i(Y_i) = |\min(\text{сумма «0»} - \text{сумма «1»})|. \quad (2)$$

По минимальному значению $W_i(Y_i)$ определяют элемент, с которого надо начинать поиск неисправностей. Если имеется несколько одинаковых наименьших значений $W_i(Y_i)$, то выбирается любой элемент, имеющий это значение.

Затем определяют, какие элементы могут быть неисправны при сигнале $Y_i = 0$, а какие – при сигнале $Y_i = 1$. Для этих двух состояний выбранного элемента по правилам, указанным выше, строят две таблицы состояний (см. табл. 2). Рассчитав в

обеих таблицах функции предпочтения, определяют элементы, которые необходимо контролировать при сигнале $Y_i = 0$, а какие – при сигнале $Y_i = 1$. Для этих элементов опять строят таблицы состояний и т. д., до тех пор, пока конкретно не выйдут на дефектный элемент. Обычно необходимо произвести 4–6 измерений.

Результаты разработки программы наглядней всего представить в виде схемы поиска. Начинают поиск с контрольного выхода, у которого функция предпочтения минимальная (в табл. 1 это выход Y_7). Следующий поиск ведется по направлению стрелок от одного контрольного выхода к другому, в зависимости от наличия или отсутствия сигнала в допуске на предыдущем выходе (см. табл. 2) идет построение таблиц поиска и дерева поиска до неисправного функционального элемента.

Неисправный элемент на дереве поиска изображается в виде квадрата, исправные элементы – в виде круга.

Руководствуясь таблицей 1, в соответствии со значениями функции предпочтения, сначала про-

Таблица 2

Состояния выходных сигналов при контроле выходного сигнала Y_7

S_i	Y_i							
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8
S_1	0	0	0	0	0	0	0	0
S_2	1	0	0	0	1	1	1	1
S_3	1	1	0	0	1	1	1	1
S_4	1	1	1	0	1	1	1	1
S_5	1	1	1	0	0	0	0	0
S_6	1	1	1	0	1	0	0	0
S_7	1	1	1	0	1	1	0	0
S_8	1	1	1	0	1	1	1	0
Функция предпочтения контроля $W_i(Y_i)$	6	4	2	8	4	2	0	2

1

$S_i \backslash Y_i$	Y_2	Y_3	Y_4	Y_8
S_2	0	0	0	1
S_3	1	0	0	1
S_4	1	1	0	1
S_8	1	1	0	0
$W_i(Y_i)$	2	0	4	2

0

$S_i \backslash Y_i$	Y_1	Y_5	Y_6	Y_7
S_1	0	0	0	0
S_5	1	0	0	0
S_6	1	1	0	0
S_7	1	1	1	0
$W_i(Y_i)$	1	0	2	4

Таблица 3

Состояния при контроле выходного параметра Y_3

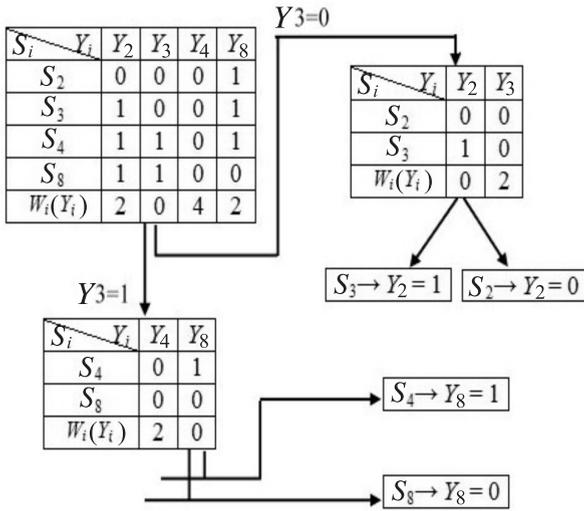
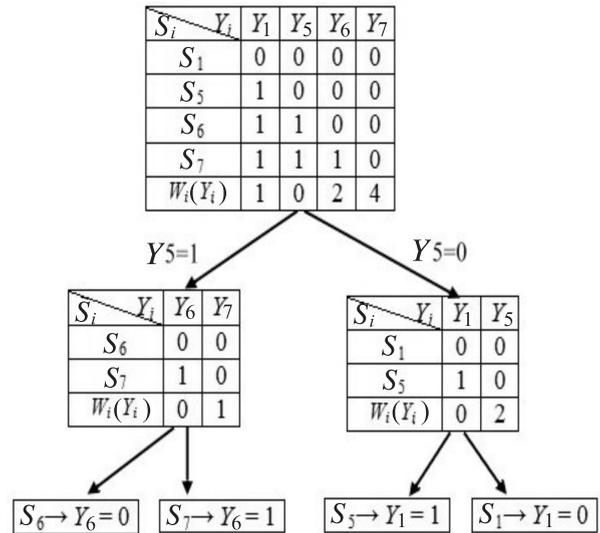


Таблица 4

Состояния при контроле выходного параметра Y_5



ведем измерение на выходе Y_7 . Затем проанализируем схемы (рис. 2) при $Y_7 = 0$ и $Y_7 = 1$. Возможные состояния жидкокристаллического монитора представлены в табл. 2.

Анализ табл. 2 показывает, что функция предпочтения W_i имеет минимальное значение на выходах Y_3 и Y_5 . Далее составим табл. 3 и схему поиска при значениях $Y_3 = 0$ и $Y_3 = 1$, а также табл. 4 при значениях $Y_5 = 0$ и $Y_5 = 1$.

На основании табл. 1–4 построим алгоритм поиска неисправностей (рис. 3) и, проведя максимум 3–4 измерения, определим, какой элемент схемы неисправен.

По дереву неисправностей происходит построение логической функции. Исправное состояние жидкокристаллического монитора можно обозначить как состояние S_0 . Логическая функция при ис-

правном состоянии ЖК монитора принимает следующий вид: $S_0 = Y_1 \wedge Y_2 \wedge Y_3 \wedge Y_4 \wedge Y_5 \wedge Y_6 \wedge Y_7 \wedge Y_8 = 1$. Выходные сигналы всех блоков соответствуют исправному состоянию.

В случае неисправного блока питания ЖК монитора логическая функция $S_1 = \bar{Y}_7 \wedge \bar{Y}_5 \wedge \bar{Y}_1$. При выходе инвертора логическая функция примет вид $S_2 = Y_7 \wedge \bar{Y}_3 \wedge \bar{Y}_2$. В случае выхода остальных блоков ЖК монитора, их логические функции примут следующий вид: $S_3 = Y_7 \wedge \bar{Y}_3 \wedge \bar{Y}_2$; $S_4 = Y_7 \wedge Y_3 \wedge \bar{Y}_8$; $S_5 = \bar{Y}_7 \wedge \bar{Y}_5 \wedge \bar{Y}_1$; $S_6 = \bar{Y}_7 \wedge Y_5 \wedge \bar{Y}_6$; $S_7 = \bar{Y}_7 \wedge Y_5 \wedge Y_6$; $S_8 = Y_7 \wedge Y_3 \wedge \bar{Y}_8$.

Таким образом, для приведенного примера поиска неисправности в ЖК мониторе, достаточно произвести три измерения, чтобы выйти на неисправный блок.

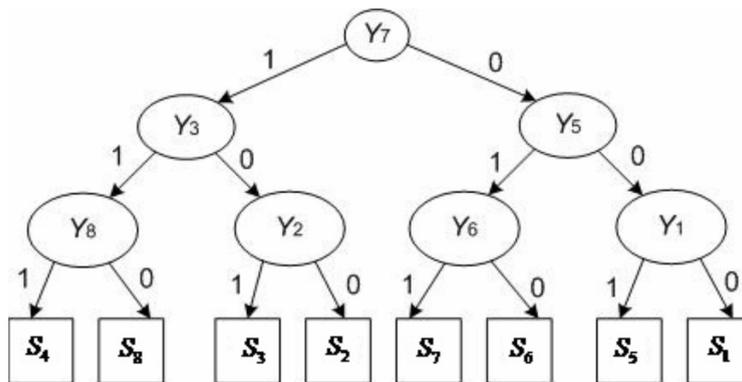


Рис. 3. Алгоритм поиска неисправностей

Применение информационного подхода при разработке алгоритма поиска неисправностей для жидкокристаллических мониторов и других электронных блоков вычислительной техники увеличивает производительность труда и сократит время на обнаружение неисправностей.

Предложенная методика поиска неисправностей может применяться для различных структурных построений объекта контроля, не накладывая каких-либо ограничений на исходные данные контролируемых устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байда, Н.П. Микропроцессорные системы поэлементного диагностирования [Текст] / Н.П. Байда, И.В. Кузьмин, В.Т. Шпилевой. –М.: Радио и Связь, 1987. –250 с.
2. Можаяев, А.С. Современное состояние и некоторые направления развития логико-вероятностных методов анализа систем [Текст]/ А.С. Можаяев // В сб.: Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем; Под ред. И.А. Рябини-на. –СПб.: ИПМАШ РАН, 1994. –С. 23–53.
3. Можаяев, А.С. Технология автоматизации процес-

- сов построения логико-вероятностных моделей систем. [Текст]/ А.С. Можаяев // Тр. Междунар. науч. конф. Интеллектуальные системы и информационные технологии в управлении ИСИТУ 2000. –Псков, 2000. –С. 257–262.
4. Мозгалевский, А.В. Автоматический поиск неисправностей [Текст]/ А.В. Мозгалевский, Д.В. Гаскаров, Л.П. Глазунов, [и др.]. –Л.:Машиностроение, 1966. –262 с.
5. Жердев, Н.К. Контроль устройств на интегральных схемах [Текст]/ Н.К. Жердев, Б.П. Креденцер, Р.Н. Белоконь. –К.: Техника, 1986. –160 с.

УДК 681.3.06+519.68

Н.В. Данилова, Б.Я. Штейнберг, Л.Н. Фоменко

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СПРАВЕДЛИВОЙ ЦЕНЫ ЕВРОПЕЙСКОГО ОПЦИОНА

На реальном рынке ценных бумаг рассматриваются, как правило, опционы с достаточно большими сроками исполнения. Кроме того, вычисления справедливых цен должны производиться быстро. Поэтому актуальна проблема оптимизации расчетов. В связи с этим в статье рассмотрен параллельный алгоритм, использующий разрез дерева на слабо связанные части и независимую обработку полученных поддеревьев. При этом параллельный алгоритм выполняется в среднем в три раза быстрее непараллельного, а в памяти машины все время хранится массив, характеризующий один путь на бинарном дереве. Предложенный метод расчета обобщается на широкий класс задач стохастической финансовой математики. Например, для нахождения справедливой цены Американского опциона также можно применять параллельный алгоритм.

Описание модели. Постановка задачи

Рассмотрим следующую модель:

$$\begin{cases} dS_t = S_t(\mu(S_t)dt + \sigma(S_t)dW_t) \\ dB_t = B_t r(S_t)dt \end{cases}, \quad (1)$$

$$t \in [0, T].$$

Заданы начальные условия $S_t|_{t=0} = S_0$, $B_t|_{t=0} = B_0$. Фильтрация $F_t = \sigma(W_s; s \leq t)$, F_0 состоит из двух событий (достоверного и невозможного) и пополнена всеми событиями с нулевыми вероятностями.

Согласно [1, с. 313], процесс $(S_t)_{t=0}^T$ имеет стохастический дифференциал $dS_t = S_t(\mu(S_t)dt + \sigma(S_t)dW_t)$, если

$$\begin{aligned} P\left(\int_0^T |\mu(S_t)| dt < \infty\right) &= 1, \\ P\left(\int_0^T \sigma^2(S_t) dt < \infty\right) &= 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Согласно теореме Гирсанова для диффузионных процессов [1, с. 833], процесс W_t^* , заданный следующим образом:

$$W_t^* = W_t - \int_0^t \frac{r(S_s) - \mu(S_s)}{\sigma(S_s)} ds, \quad (3)$$

является винеровским процессом по мере P^* , относительно которой процесс $\left(\frac{S_t}{B_t}\right)_{t \geq 0}$ является мартингалом. Мера P^* единственна, и модель (1) приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} dS_t = S_t(r(S_t)dt + \sigma(S_t)dW_t^*) \\ dB_t = B_t r(S_t)dt \end{cases}, \quad (4) \quad t \in [0, T].$$

Для теоремы Гирсанова должны быть справедливыми следующие условия:

$$\begin{aligned} P\left(\int_0^T |r(S_t)| dt < \infty\right) &= 1, \\ P\left(\int_0^T \left(\frac{r(S_t) - \mu(S_t)}{\sigma(S_t)}\right)^2 dt < \infty\right) &= 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим задачу

$$\min_{\gamma} \hat{X}_0 \quad (6)$$

при ограничениях $d\left(\frac{X_t}{B_t}\right) = \gamma_t d\left(\frac{S_t}{B_t}\right)$, $X_T \geq f_T$, X – адаптированный процесс, γ – предсказуемый процесс относительно фильтрации F .

Зададим последовательность «порогов» $M_i = i \frac{M}{\tilde{N}}$, $i = 0, \dots, \tilde{N}$, где $M \equiv \text{const}, M > 0$. Параметры $\sigma(S_t), r(S_t), \mu(S_t)$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma(S_t) &= \sum_{k=1}^{\tilde{N}} \bar{\sigma}_k I_{\{M_{k-1} \leq S_t < M_k\}} + \bar{\sigma}_{\tilde{N}+1} I_{\{S_t \geq M_{\tilde{N}}\}}, \\ r(S_t) &= \sum_{k=1}^{\tilde{N}} \bar{r}_k I_{\{M_{k-1} \leq S_t < M_k\}} + \bar{r}_{\tilde{N}+1} I_{\{S_t \geq M_{\tilde{N}}\}}, \\ \mu(S_t) &= \sum_{k=1}^{\tilde{N}} \bar{\mu}_k I_{\{M_{k-1} \leq S_t < M_k\}} + \bar{\mu}_{\tilde{N}+1} I_{\{S_t \geq M_{\tilde{N}}\}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\bar{\sigma}_i, \bar{r}_i, \bar{\mu}_i, i = 1, \dots, \tilde{N}+1$ – некоторые вещественные числа. Обозначим моменты переключения параметров через $\tau_1 < \tau_2 < \dots \leq T$. Тогда

$$\begin{aligned} \int_0^T |\mu(S_t)| dt &= \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \left(\sum_{k=1}^{\tilde{N}} \bar{\mu}_k I_{\{M_{k-1} \leq S_{\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{2}} < M_k\}} + \right. \\ &+ \left. \bar{\mu}_{\tilde{N}+1} I_{\{S_{\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{2}} \geq M_{\tilde{N}}\}} \right) (\tau_i - \tau_{i-1}) \leq \tilde{N}T \max(\bar{\mu}_k), \\ \int_0^T |r(S_t)| dt &= \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \left(\sum_{k=1}^{\tilde{N}} \bar{r}_k I_{\{M_{k-1} \leq S_{\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{2}} < M_k\}} + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \left. \bar{r}_{\tilde{N}+1} I_{\{S_{\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{2}} \geq M_{\tilde{N}}\}} \right) (\tau_i - \tau_{i-1}) \leq \tilde{N}T \max(\bar{r}_k), \\ \int_0^T \sigma^2(S_t) dt &= \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \left(\sum_{k=1}^{\tilde{N}} \bar{\sigma}_k^2 I_{\{M_{k-1} \leq S_{\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{2}} < M_k\}} + \right. \\ &+ \left. \bar{\sigma}_{\tilde{N}+1}^2 I_{\{S_{\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{2}} \geq M_{\tilde{N}}\}} \right) (\tau_i - \tau_{i-1}) \leq \tilde{N}T \max(\bar{\sigma}_k^2), \\ \int_0^T \left(\frac{r(S_t) - \mu(S_t)}{\sigma(S_t)} \right)^2 dt &= \\ &= \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \left(\sum_{k=1}^{\tilde{N}} \left(\frac{\bar{r}_k - \bar{\mu}_k}{\bar{\sigma}_k} \right)^2 I_{\{M_{k-1} \leq S_{\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{2}} < M_k\}} + \right. \\ &+ \left. \left(\frac{\bar{r}_{\tilde{N}+1} - \bar{\mu}_{\tilde{N}+1}}{\bar{\sigma}_{\tilde{N}+1}} \right)^2 I_{\{S_{\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{2}} \geq M_{\tilde{N}}\}} \right) (\tau_i - \tau_{i-1}) \leq \\ &\leq \tilde{N}T \max \left(\left(\frac{\bar{r}_k - \bar{\mu}_k}{\bar{\sigma}_k} \right)^2 \right), \end{aligned}$$

и условия (2) и (5) выполнены. Назовем полученную модель моделью с \tilde{N} порогами.

Запишем дискретную аппроксимацию модели (4):

$$\begin{cases} \Delta S_n = S_{n-1}(r_n + \sigma_n \varepsilon_n^*) \\ \Delta B_n = B_{n-1} r_n \end{cases}, n = 1, \dots, \bar{N} \quad (8)$$

где $\varepsilon_n^* \in \{-1, 1\}$, $P^*(\varepsilon_n^* = 1) = P^*(\varepsilon_n^* = -1)$ и $(\varepsilon_n^*)_{n=1}^{\bar{N}}$ – независимы (рис. 1). Фильтрация $F_n = \sigma(\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*, \dots, \varepsilon_n^*)$, $F_0 = \sigma(\Omega, \emptyset)$.

Задача (6) в случае модели (8) примет вид:

$$\min_{\gamma} \bar{X}_0 \quad (9)$$

при ограничениях: $\Delta\left(\frac{\bar{X}_n}{B_n}\right) = \gamma_n \Delta\left(\frac{S_n}{B_n}\right)$, $\bar{X}_{\bar{N}} \geq f_{\bar{N}}$, \bar{X} – адаптированный процесс, γ – предсказуемый процесс относительно фильтрации F

Параметры $\sigma(S_n)$ и $r(S_n)$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma(S_n) &= \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \bar{\sigma}_i I_{\{M_{i-1} \leq S_n < M_i\}} + \bar{\sigma}_{\tilde{N}+1} I_{\{S_n \geq M_{\tilde{N}}\}}, \\ r(S_n) &= \sum_{i=1}^{\tilde{N}} \bar{r}_i I_{\{M_{i-1} \leq S_n < M_i\}} + \bar{r}_{\tilde{N}+1} I_{\{S_n \geq M_{\tilde{N}}\}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\bar{r}_i := \frac{\bar{r}_i}{h}$, $\bar{\sigma}_i := \frac{\bar{\sigma}_i}{\sqrt{h}}$, $h = \frac{T}{\bar{N}}$, $i = 1, \dots, \tilde{N}+1$, \bar{N} – число разбиений отрезка $[0, T]$.

Теорема 1. Если процесс \bar{X} определяется уравнениями

$$\bar{X}_{\bar{N}} = f_{\bar{N}}(S_{\bar{N}}) = g_{\bar{N}}(S_{\bar{N}}), \quad \bar{X}_{n-1} = g_{n-1}(S_{n-1}) =$$

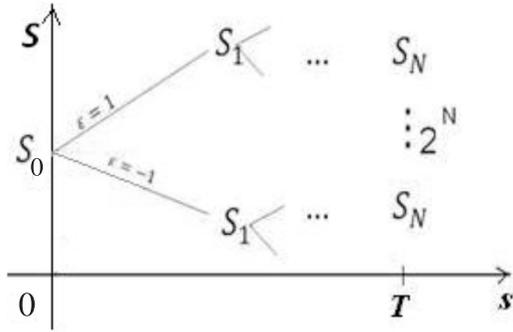


Рис. 1. Графическое изображение модели (8)

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{i=1}^{\bar{N}} \frac{1}{2(1+\bar{r}_i)} (g_n(S_{n-1}(1+\bar{r}_i+\bar{\sigma}_i)) + \\
 &+ g_n(S_{n-1}(1+\bar{r}_i-\bar{\sigma}_i))) I_{\{M_{k-1} \leq S_{n-1} < M_k\}} + \\
 &+ \frac{1}{2(1+\bar{r}_{\bar{N}+1})} (g_n(S_{n-1}(1+\bar{r}_{\bar{N}+1}+\bar{\sigma}_{\bar{N}+1})) + \\
 &+ g_n(S_{n-1}(1+\bar{r}_{\bar{N}+1}-\bar{\sigma}_{\bar{N}+1}))) I_{\{S_{n-1} \geq M_{\bar{N}}\}},
 \end{aligned} \quad (11)$$

то решение задачи (9) – $C = \bar{X}_0$.

Например, для Европейского опциона-колл $f_{\bar{N}} = (S_{\bar{N}} - K)^+ = \max(S_{\bar{N}} - K, 0)$, где K – контрактная цена. В соответствии с (11) для расчета справедливой цены $C = \bar{X}_0$ необходимо произвести вычисления на бинарном дереве. При этом ошибка, возникающая при дискретной аппроксимации непрерывной модели, составляет $o\left(\frac{1}{\bar{N}}\right)$ [4, с. 272].

Описание параллельного алгоритма метода дискретной аппроксимации

Каждый путь бинарного дерева до момента времени n ($n=1, \dots, \bar{N}$) можно однозначно описать массивом размера n , состоящим из нулей и единиц, где нуль соответствует падению стоимости акции, а единица – ее росту. Функция `displayBits`, которая переводит десятичное число в бинарное представление и записывает в `massiv`, приведена в [3, с. 1016]. Из теоремы 1 следует, что для C справедлива формула:

$$C = \frac{1}{2^{\bar{N}}} \sum_{i=1}^{2^{\bar{N}}} \frac{f_{\bar{N}}^i}{B_{\bar{N}}^i}, \quad (12)$$

где $f_{\bar{N}}^i$ и $B_{\bar{N}}^i$ – значения финансового обязательства и банковского счета, соответственно, в момент времени \bar{N} на i -м пути бинарного дерева ($i=1, \dots, 2^{\bar{N}}$). Последовательный алгоритм расчета имеет следующий вид.

Алгоритм 1

Fair Pricel(S_0, B_0, \bar{N}, C)

1. $i := 0, C := 0$

2. $massiv := displayBits(i)$

3. $j := 1, S := S_0, B := B_0$

4. $r := \sum_{k=1}^{\bar{N}} \bar{r}_k I_{\{M_{k-1} \leq S < M_k\}} + \bar{r}_{\bar{N}+1} I_{\{S \geq M_{\bar{N}}\}}$,

$\sigma := \sum_{k=1}^{\bar{N}} \bar{\sigma}_k I_{\{M_{k-1} \leq S < M_k\}} + \bar{\sigma}_{\bar{N}+1} I_{\{S \geq M_{\bar{N}}\}}$

$\varepsilon^* = \begin{cases} 1, & \text{если } massiv[j] = 1 \\ -1, & \text{если } massiv[j] = 0 \end{cases}, S := S(1+r+\sigma\varepsilon^*),$

$B := B(1+r), j := j+1$

5. Если $j \leq \bar{N}$, то 4

6. $C := C + \frac{f_{\bar{N}}(S)}{B}$

7. $i := i+1$

8. Если $i \leq 2^{C-1}$, то 2

9. $C := \frac{C}{2^{\bar{N}}}$

10. Возврат

Заметим, что при реализации первого алгоритма в памяти машины хранится не все дерево, а только массив размера \bar{N} . На основе алгоритма 1 сформулируем алгоритм 2.

Алгоритм 2

Fair Price2($S_0, B_0, l, \bar{N}, i, C$)

1. $S := S_0, B := B_0, massiv := displayBits(i)$

2. $j := 1$

3. $r := \sum_{k=1}^{\bar{N}} \bar{r}_k I_{\{M_{k-1} \leq S < M_k\}} + \bar{r}_{\bar{N}+1} I_{\{S \geq M_{\bar{N}}\}}$,

$\sigma := \sum_{k=1}^{\bar{N}} \bar{\sigma}_k I_{\{M_{k-1} \leq S < M_k\}} + \bar{\sigma}_{\bar{N}+1} I_{\{S \geq M_{\bar{N}}\}}$

$\varepsilon^* = \begin{cases} 1, & \text{если } massiv[j] = 1 \\ -1, & \text{если } massiv[j] = 0 \end{cases}, S := S(1+r+\sigma\varepsilon^*),$

$B := B(1+r)$

$j := j+1$

4. Если $j \leq l$, то 3

5. *Fair Pricel*($S, B, \bar{N}-l, R$)

6. $C := R$

7. Возврат

Пусть имеется 2^m процессоров, причем $\bar{N} > m$. Параллельный алгоритм имеет следующий вид:

Алгоритм 3

$i := 0$

Fair Price2($S_0, B_0, m, \bar{N}, i, C$);

$C[i] := C$;

$i := 2$

$$\begin{aligned} &FairPrice2(S_0, B_0, m, \bar{N}, i, C); \\ &C[i] := C; \\ &\dots\dots\dots \\ &i := 2^{m-1} \\ &FairPrice2(S_0, B_0, m, \bar{N}, i, C); \\ &C[i] := C; \\ &C := \frac{1}{2^m} \sum_{k=0}^{2^m-1} C[k] \end{aligned}$$

Рассмотрим пример. Пусть начальные данные имеют вид: $S_0 = 6, B_0 = 1, K = 3, M = 7, \tilde{N} = 7, \bar{r}_i = 0,3 + (i-1)0,01, \bar{\sigma}_i = 0,1 + (i-1)0,01, i = 1, \dots, \tilde{N} + 1$. Согласно рис. 2, число разбиений \bar{N} полагается равным 19.

В результате выполнения параллельного алгоритма получаем $C = 3,88$, время выполнения 1 с. Время выполнения непараллельного алгоритма 3 с. Заметим, что при увеличении M и при уменьшении \tilde{N} значение C сходится к 3,73, соответствующему ситуации, когда параметры модели не изменяются. Это значение справедливой цены, вычисленное по формуле Блэка–Шоулса [1, с. 910].

Предложен параллельный алгоритм расчета справедливой цены Европейского опциона-колл для обобщенной диффузионной модели Блэка–Шоулса, параметры которой изменяются в случайные марковские моменты остановки (модель с \tilde{N} порогами). Основу алгоритма составляет информационное бинарное дерево, полученное в результате дискретной аппроксимации непрерывной модели.

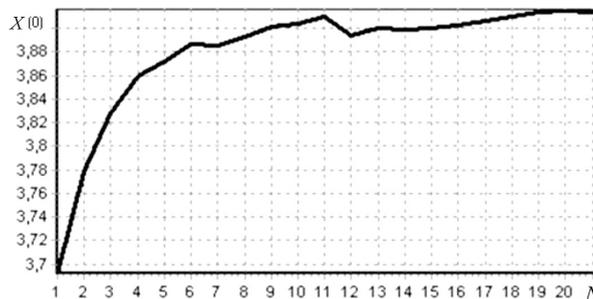


Рис. 2. График зависимости значений \tilde{N} от числа разбиений \bar{N}

Приведены рекуррентные формулы для нахождения справедливой цены Европейского опциона-колл. Для численного вычисления справедливой цены предложены три алгоритма. В первом алгоритме (непараллельном) при обходе бинарного дерева в памяти вычислительной машины хранится только один массив, характеризующий один путь на дереве. Массив является бинарным представлением некоторого десятичного числа. Второй алгоритм является вспомогательным и используется в третьем алгоритме. Третий алгоритм (параллельный) предполагает разрез дерева и последующую независимую обработку его поддеревьев.

Дан пример расчета справедливой цены для конкретных начальных данных. Установлено, что параллельный алгоритм выполняется в среднем в три раза быстрее непараллельного.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», госконтракт № 02.740.11.0208 от 07.07.2009 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ширяев, А.Н.** Основы стохастической финансовой математики [Текст] / А.Н. Ширяев; 2-е изд. –М.: ФАЗИС, 2004. –1056 с.
2. **Воеводин, В.В.** Параллельные вычисления [Текст] / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. –СПб: БХВ-Петербург, 2002. –602 с.
3. **Дейтел, Х.М.** Как программировать на C++ [Текст] / Х.М. Дейтел, П.Дж. Дейтел; 4-е изд. –М.: БИНОМ, 2005. –1030 с.
4. **Diener, F.** Asymptotics of the price oscillations of a European call option in a tree model [Text] / F.Diener, M.Diener // Math. Financ. –2004. –№14. –P. 271–293.

АНАЛИЗ ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ АВИАПРЕДПРИЯТИЯ

В современных условиях функционирования авиапредприятия остается актуальной задача структурирования парка воздушных судов (ВС) и как часть этой задачи – формирование функциональной схемы определения необходимого парка ВС с помощью математического моделирования. Широта и сложность исследования обуславливается большим многообразием типов ВС и комбинацией маршрутов пассажирских перевозок [4].

Учитывая изложенное выше, функциональная схема представлена на рис. 1.

Предложенная схема реализации функциональных элементов с учетом их взаимосвязей формулирует методологические основы синтеза парка ВС авиапредприятия с применением трех методов и обеспечивает формирование экономически выгодного состава и структуры парка ВС авиапредприятий гражданской авиации (ГА).

Первый метод – построение математической модели, учитывающей закономерности влияния летно-технических характеристик и характеристик режимов эксплуатации на эффективность ВС. Структура математической модели процесса пассажирских перевозок содержит формирование отдельных характеристик ВС с учетом требований по обеспечению эффективности их эксплуатации. Выделяем отдельно:

1) режимные характеристики (РХ) воздушно-го сообщения – скорость, высота, дальность;

2) конструктивно-геометрические характеристики (КГХ) – удлинение (фюзеляжа, крыла), относительная толщина крыла, удельное давление на крыло [3];

3) массовые характеристики (МХ) – взлетная масса и все компоненты;

4) энергетические характеристики (ЭХ) – расход топлива, тяга двигателя, удельный вес двигателя, диаметр двигателя;

5) технологические характеристики (ТХ) – параметр оценки воздушной линии (годовая продукция воздушной линии и годовые расходы), параметр оценки пассажирского ВС (Y – расходы на один тонно-километр).

Задача формирования структуры необходимого парка ВС авиапредприятия в постановке, когда требуется минимизировать производственные расходы для максимизации экономической эффективности ВС (под экономической эффективностью ВС понимаем результативность эксплуатации ВС, выражающуюся в отношении полезных конечных результатов его функционирования к затраченным ресурсам) в процессе пассажирских перевозок, которая обеспечивает выполнение заданного плана воздушных перевозок:

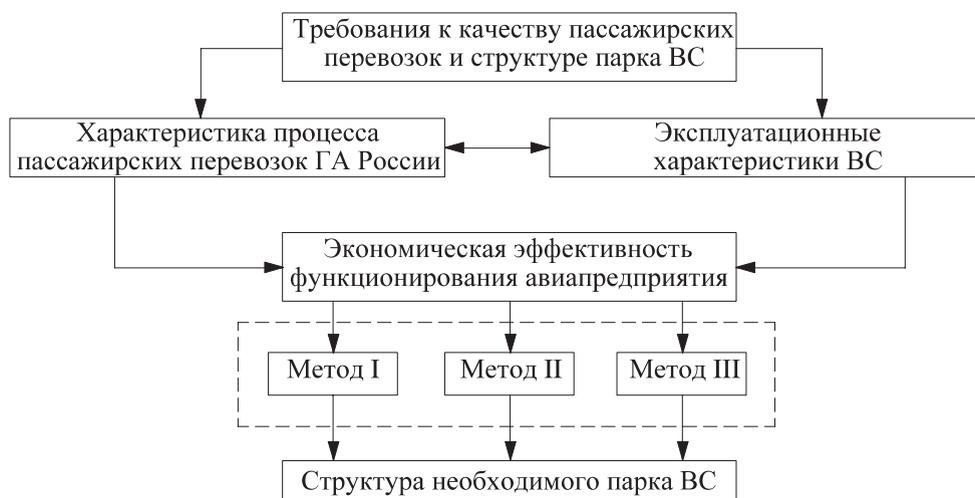


Рис. 1. Структурно-функциональная схема определения необходимого парка ВС авиапредприятия

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{npij} \cdot X_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где c_{npij} – производственные расходы на i -м маршруте j -го типа; X_{ij} – величина исследования.

Ограничениями выступают КГХ, МХ, ЭХ:

$$X_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 0,71 \leq V_{ij} \leq 0,9; 9,5 \leq H_{ij} \leq 14; 630 \leq L_{ij} \leq 10308. \\ 1,7 \leq \lambda_{крj} \leq 2,5; 0,4 \leq \bar{c}_j \leq 0,9; 0,3 \leq y_{срj}(x, z) \leq 1,1; 825 \leq W_j \leq 2200; 37,1 \leq l_{фj} \leq 58,8; \\ 2,9 \leq d_{фj} \leq 5,64; 3,5 \leq S_{мфj} \leq 14,13; 6 \leq \lambda_{фj} \leq 12,8; 1,2 \leq \lambda_{ичj} \leq 2,5; 2 \leq \lambda_{хв,чj} \leq 4; 0,4 \leq A_{тоj} \leq 0,55; \\ 0,04 \leq A_{воj} \leq 0,12. \\ 45 \leq m_{0ij} \leq 240. \\ 2,2 \leq C_{часj} \leq 8; 0,1 \leq \gamma_{лвj} \leq 0,19; 963 \leq D_j \leq 1900. \end{array} \right.$$

Переменными выступают ТХ:

$$\{1,8 \cdot 10^6 \leq \Pi_{ij} \leq 3,7 \cdot 10^6; 0 \leq c_{npij} \leq 1,77 \cdot 10^8; 2169,3 \leq Y_j \leq 15277,8\}.$$

Максимальная выручка за период в авиапредприятии ϑ_{ij}^{np} зависит от эксплуатации j -го типа ВС на i -м маршруте с минимальными производственными расходами:

$$c_{npij}^* = \arg \min_{\{X_{ij}\}} \sum_{j=1}^{mn} c_{npij} X_{ij} = c_{npij}^* (\vartheta_{ij}^{np}). \quad (2)$$

Поэтому необходимая структура парка ВС в авиапредприятии зависит от экономической эффективности j -го типа ВС на i -м маршруте. Для того чтобы эта зависимость была однозначной, будем полагать, что выручка за период в авиапредприятии может меняться при сохранении структуры перевозок, задаваемой отношениями

$$\frac{\vartheta_{ij}^{np}}{\vartheta_{ij+1}^{np}} = I_{эij}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Из этого многообразия характеристик выделяем одну величину, внутреннюю характеристику системы, которая в полном объеме раскрывает множество характерных отличительных параметров ВС во взаимосвязи в процессе эксплуатации ВС. На основании выведенных взаимосвязей формируется комплекс параметров эффекта ВС – производственные расходы (c_{npij}), в т. ч. часовой расход топлива ($C_{час}$), производительность ВС (A_{ij}), интенсивность движения на линии (N), которые устанавливают взаимосвязь с внутренней характеристикой системы – индексом эффективности ВС (I_j), рис. 2. Внутренняя характеристика системы – это величина, раскрывающая множество характерных отличительных параметров ВС, действующих во взаимосвязи в процессе пассажирских перевозок.



Рис. 2. Структурная схема первого метода

Базовый, основной показатель эффективности ВС – индекс эффективности ВС. Индекс эффективности ВС представляется необходимым с технологической точки зрения как удобная величина при ее использовании в процессе формирования необходимой структуры парка ВС авиапредприятия.

Индекс эффективности ВС является линейной функцией пяти характеристик, рассчитывается по формуле

$$I_3 = RD + CGD + MD + ED + TD, \quad (4)$$

где RD – режимные характеристики, вычисляемые по формуле

$$RD = k_{веси} \cdot \overline{M} + k_{веси} \cdot \overline{H}, \quad (5)$$

где $k_{веси}$ – весовой коэффициент, закрепленный за i -м параметром; \overline{M} – скорость полета в отн. ед.; \overline{H} – высота полета в отн. ед.; CGD – конструктивно-геометрические характеристики, вычисляемые по формуле

$$CGD = k_{веси} \cdot \overline{l}_{кр} + k_{веси} \cdot \overline{l}_{ф} + k_{веси} \cdot \overline{d}_{ф} + k_{веси} \cdot \overline{\lambda}_{ф} + k_{веси} \cdot \overline{\lambda}_{нч}, \quad (6)$$

где $\overline{l}_{кр}$ – длина крыла в отн. ед.; $\overline{l}_{ф}$ – длина фюзеляжа в отн. ед.; $\overline{d}_{ф}$ – диаметр фюзеляжа в отн. ед.; $\overline{\lambda}_{ф}$ – удлинение фюзеляжа в отн. ед.; $\overline{\lambda}_{нч}$ – удлинение носовой части в отн. ед.; MD – массовые характеристики, вычисляемые по формуле

$$MD = k_{веси} \cdot \overline{m}_0 + k_{веси} \cdot \overline{m}_{пн}, \quad (7)$$

где \overline{m}_0 – нормальная взлетная масса ВС в отн. ед.; $\overline{m}_{пн}$ – масса полезной нагрузки ВС в отн. ед.; ED – энергетические характеристики, вычисляемые по формуле

$$ED = k_{веси} \cdot \overline{C}_{час} + k_{веси} \cdot \overline{m} + k_{веси} \cdot \overline{\gamma}_{дв} + k_{веси} \cdot \overline{D}, \quad (8)$$

где $\overline{C}_{час}$ – часовой расход топлива в отн. ед.; \overline{m} – степень двухконтурности двигателя в отн. ед.; $\overline{\gamma}_{дв}$ – удельный вес двигателя в отн. ед.; \overline{D} – максимальный диаметр двигателя в отн. ед.; TD – технологические характеристики, вычисляемые по формуле

$$TD = k_{веси} \cdot \overline{a}_{пр} + k_{веси} \cdot \overline{\Pi} + k_{веси} \cdot \overline{Y}, \quad (9)$$

где $\overline{a}_{пр}$ – производственные расходы в отн. ед.; $\overline{\Pi}$ – параметр оценки воздушной линии в отн. ед.; \overline{Y} – параметр оценки ВС в отн. ед.

Все составляющие индекса имеют равные веса, т. к. в противном случае необходимо было бы использовать экспертные оценки. Все параметры

прямо связаны с показателем эффективности ВС, в то время как некоторые показатели индекса имеют отрицательную связь с эффективностью ВС.

Для формирования индекса эффективности ВС необходимо привести его к некоторому сопоставимому виду. С этой целью используем метод линейного масштабирования. Его суть состоит в том, чтобы отобразить значение каждого параметра от нуля до единицы, сохраняя все пропорции между отдельными значениями. Таким образом, сохраняются все структурные характеристики исходного параметра.

Масштабированное значение вычисляем по формуле

$$x_i^m = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}), \quad (10)$$

где x_i – наблюдаемая величина; x_{\min} – минимальное значение рассматриваемого параметра; x_{\max} – максимальное значение рассматриваемого параметра.

В том случае, когда непосредственно измеряемый параметр отрицательно связан с эффективностью ВС, применяется обратное линейное масштабирование.

Вычисляем параметры эффекта, выделенные для процесса пассажирских перевозок.

1. Производственные расходы на один рейс на i -м маршруте ВС j -го типа находим по формуле

$$c_{прj} = a_{ij} + a_{кап.влj}, \quad (11)$$

где a_{ij} – себестоимость перевозок; $a_{кап.влj}$ – капиталовложения.

2. Производительность на i -м маршруте ВС j -го типа находим по формуле

$$A_{ij} = m_{комj} / t_{ij}, \quad (12)$$

где $m_{комj}$ – коммерческая нагрузка, соответствующая данной дальности полета; t_{ij} – время полета.

3. Интенсивность движения на линии находим по формуле

$$N = 100 \left(1 - (1/c_{\Delta}) \sqrt{(1/n - 1) \sum_{i=1}^i (c - c_i)^2} \right), \quad (13)$$

где n – количество отобранных ВС; c_i – количество контрольных ВС в i -серии; c_{Δ} – среднеарифметическое значение контрольного ВС.

Необходимое количество ВС в парке авиапредприятия определяем из условия, что пассажирские перевозки осуществлены в полном объеме и в установленные сроки. Количество ВС ($n_{ц}$), необходимое авиапредприятию для выполнения

пассажирских перевозок за период, вычисляем по формуле

$$n_{ij} = Q_{ij} / (A_{ij} \cdot T_{ij}), \quad (14)$$

где Q_{ij} – объем выполняемых работ за период; T_{ij} – налет часов за период; A_{ij} – производительность ВС.

Второй метод, включающий математическую модель, учитывающий закономерности влияния технических и эксплуатационных характеристик на эффективность ВС заключается в определении структуры необходимого парка ВС при перевозке из определенного пункта A пассажиров по n маршрутам. В данной задаче необходимо минимизировать общую сумму расходов, т. е. целевую функцию. При выполнении системы ограничений-равенств получаем задачу линейного программирования, которая решается симплекс-методом (рис. 3).

Предположим, что обслуживают эти маршруты следующие типы ВС 1, 2, ..., m , где m – тип ВС.

Допустим, что известно количество авиапассажиров, которых необходимо перевезти по каждому маршруту за определенный промежуток времени (за неделю, за месяц и т. д.).

Обозначим это количество перевозимых авиапассажиров как b_n – количество перевозимых авиапассажиров по n -му маршруту.

Соответственно, количество рейсов, совершаемых на i -м маршруте ВС j -го типа, обозначим X_{ij} , где $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$.

Количество пассажиров, перевозимых за один рейс на i -м маршруте ВС j -го типа, обозначим a_{ij} , где $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$.

Расходы на один рейс на i -м маршруте ВС j -го типа обозначим c_{ij} , где $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$.

Предположим, что каждый маршрут обслуживают ВС всех типов 1, 2, ..., m . Окончательно для всех маршрутов составляем систему ограничений-равенств:

$$\|b_i\| = \|a_{ij}\| \|X_{ij}\|, \quad (15)$$

где a_{ij} – известные величины, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$; b_i – известные величины, $i = \overline{1, n}$; X_{ij} – неизвестные величины, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$.

Общую сумму расходов на все рейсы всех маршрутов вычисляем по формуле

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} \cdot X_{ij}. \quad (16)$$

При необходимости минимизации общей суммы расходов по формуле (16) при выполнении системы ограничений-равенств (15), получим задачу линейного программирования [2].

Задача линейного программирования решается симплекс-методом, т. е. этим методом находят X_{ij} , где $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$.

После определения X_{ij} , при $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, зная расстояние и скорость, возможно определить структуру необходимого парка ВС для узла перевозок A .

К системе ограничений-равенств можно добавить систему ограничений-равенств (неравенств) по количеству рейсов ВС каждого типа. Окончательно систему ограничений-равенств по общему количеству рейсов на всех маршрутах для каждого типа ВС вычисляем по формуле

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = K_j, \quad (17)$$

где $j = \overline{1, m}$.

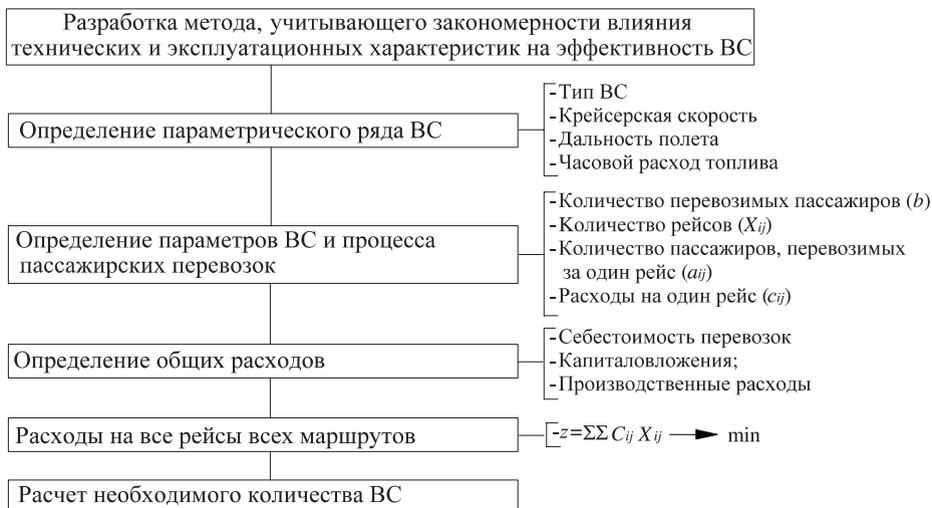


Рис. 3. Структурная схема второго метода

Добавив к системе ограничений (15) систему ограничений (17), можно минимизировать общую сумму расходов (16). В результате получаем задачу линейного программирования, которую решаем симплекс-методом. Для решения необходимо задать $b_p, a_{ij}, c_{ij}, K_j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$.

В связи с тем, что модель содержит только две переменные, задачу можно решить графически. Использование графического метода заключается в геометрическом представлении допустимых решений, в котором одновременно удовлетворяются все ограничения модели. В каждой точке, принадлежащей внутренней области, все ограничения выполняются, поэтому решения, соответствующие этим точкам, являются допустимыми. Пространство решений содержит бесконечное число таких точек, но, несмотря на это, можно найти требуемое решение.

Необходимое количество ВС в парке авиапредприятия определяем из условия, что пассажирские перевозки осуществлены в полном объеме и в установленные сроки. Количество ВС (n_n), необходимое авиапредприятию для выполнения пассажирских перевозок за период, вычисляем по формуле (14).

Третий метод, включающий математическую модель, учитывающий закономерности влияния летно-технических и технико-экономических характеристик на эффективность ВС, позволяет выбрать из всех возможных решений самый лучший, экономически выгодный вариант. Структурная схема третьего метода представлена на рис. 4.

Целевой функцией является общая сумма расходов авиапредприятия на все рейсы для всех маршрутов при сохранении (увеличении) показателя дохода, в данном случае – через производствен-

ные расходы. На величину расходов оказывает существенное влияние себестоимость перевозок. В качестве ограничений выступают ЛТХ ВС – грузоподъемность, скорость полета, дальность полета, расход топлива. Переменными являются ТЭХ ВС – стоимость, производительность, взлетная масса, число и тяга двигателей ВС [1].

Критерий производственных расходов минимизируется:

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} \cdot X_{ij} \rightarrow \min, \quad (18)$$

где c_{ij} – производственные расходы на один рейс на i -м маршруте ВС j -го типа; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$; n – количество маршрутов; m – тип ВС, обслуживающих маршрут; X_{ij} – количество рейсов, совершаемых на i -м маршруте ВС j -го типа.

В свою очередь производственные расходы на один рейс на i -м маршруте ВС j -го типа определяем с учетом ТЭХ и ЛТХ ВС:

$$c_{ij} = a_{ij} + r(C_{BCj} / (T_{ij} \cdot A_{ij})), \quad (19)$$

где a_{ij} – себестоимость пассажирских перевозок на i -м маршруте ВС j -го типа; r – реальная процентная ставка прибыльности; C_{BCj} – стоимость ВС; T_{ij} – налет ВС за один рейс; A_{ij} – производительность ВС за час полета.

Себестоимость пассажирских перевозок на i -м маршруте ВС j -го типа рассчитываем

$$a_{ij} = (100 \cdot P_{эij}) / (k_{ком} \cdot m_{комj} \cdot V_{рейсij}), \quad (20)$$

где $P_{эij}$ – расходы на эксплуатацию ВС в течение летного часа; $k_{ком}$ – коэффициент коммерческой нагрузки, учитывающий среднегодовую неполную загрузку ВС; $m_{комj}$ – коммерческая нагрузка, соответствующая данной дальности полета; $V_{рейсij}$ – рейсовая скорость ВС.

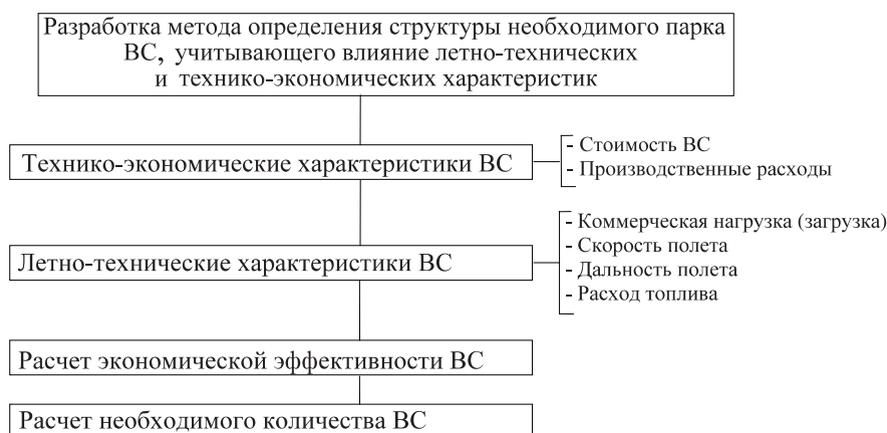


Рис. 4. Структурная схема третьего метода

Производительность ВС на i -м маршруте j -го типа определим по формуле:

$$A_{ij} = m_{\text{ком}}/t_{ij}, \quad (21)$$

где t_{ij} – время полета.

В плановой экономике для оценки эффективности инвестиций использовались коэффициенты эффективности капитальных вложений. Применение этих коэффициентов возможно и сейчас, но с учетом корректировок на недетерминированность современной экономики. Очевидно, что рассматриваемый показатель должен быть увязан со значительным количеством факторных признаков. И нельзя гарантировать, что все они могут иметь объективную природу. Глобальных статистических исследований на данную тему не производилось, поэтому полагаем возможным воспользоваться данными советской статистики. При этом необходимо сделать поправку на прогнозируемый уровень инфляции. С использованием формулы Фишера скорректированная на инфляцию реальная процентная ставка прибыльности рассчитывается следующим образом:

$$r = e + k_{\text{inf}} + e \cdot k_{\text{inf}}, \quad (21)$$

где e – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; k_{inf} – индекс инфляции.

Стоимость ВС рассматривается как рыночная стоимость ВС аналогов.

Соотношение в экономике, при котором увеличение степени удовлетворения одного потребителя невозможно без ухудшения удовлетворения для другого, называется *парето-эффективным состоянием* или *экономической эффективностью*. Понятие *экономическая эффективность* применяется в целях предоставления общей оценки результативности (эффективности) общественного производства.

Экономическую эффективность ВС на i -м маршруте j -го типа на один рейс вычислим по формуле:

$$\mathcal{E}_{ij} = (V_{ij} - c_{ij})/c_{ij}, \quad (22)$$

где V_{ij} – выручка от основной деятельности на i -м маршруте ВС j -го типа.

Необходимое количество типов ВС в парке авиапредприятия определяем из условия, что пассажирские перевозки осуществлены в полном объеме и в установленные сроки. Количество ВС ($n_{\text{ц}}$), необходимое авиапредприятию для выпол-

нения пассажирских перевозок за период, вычисляем по формуле (14).

Обоснование модели взаимосвязи разработанных методов по формированию структуры необходимого парка ВС авиапредприятия основывается на радиально-планетарной модели взаимодействия характеристик ВС с поставленными задачами в процессе эксплуатации ВС в авиапредприятии.

Центральное ядро объединяющей модели – совокупность разработанных методов, включающих математическую модель, учитывающую закономерности влияния летно-технических характеристик и характеристик режимов эксплуатации на эффективность ВС; закономерности влияния технических и эксплуатационных характеристик на эффективность ВС; закономерности влияния летно-технических и технико-экономических характеристик на эффективность ВС. Объединение произведем по показателю экономической эффективности ВС.

Радиально-планетарная модель адаптирована для представления взаимодействия методов и представляет собой $G = (I, II, III)$, состоящую из k секторов, соответствующих типу ВС (рис. 5).

Здесь $N = I \cup II \cup III \Rightarrow \mathcal{E}_{ij}$ – множество узлов сети, разбитое на k подмножеств (секторов). В свою очередь, каждый сектор разбивается в зависимости от эффективности ВС на орбиты. Вся орбита O_i радиально-планетарной модели с

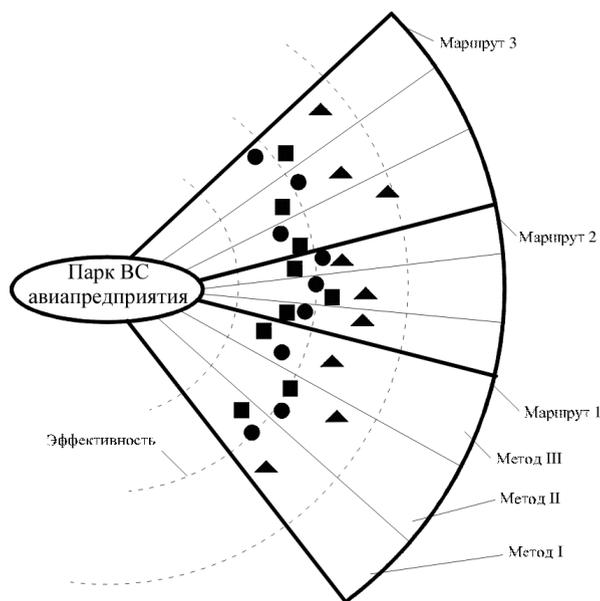


Рис. 5. Фрагмент радиально-планетарной модели (●) – ВС Ту-154; (■) – ВС Ту-154; (▲) – ВС Б737

номером l является объединением своих частей, принадлежащих каждому сектору: $O_l = \bigcup_{i=1}^k N_i$.

Разработанные модели по определению структуры необходимого парка ВС, могут применяться не только по отношению к имеющемуся парку ВС, но и к гипотетическому. Реализация

методологии формирования необходимого парка ВС авиапредприятия позволяет увеличить эффективность эксплуатации ВС в среднем в 1,7 раза за счет уменьшения количества ВС в парке и снижения расхода топлива.

Работа выполнена при поддержке госконтракта № П295 от 24.07.2009 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Припадчев, А.Д. Программа для расчета технико-экономической оценки воздушных судов [Текст] / А.Д. Припадчев, Н.З. Султанов, А.В. Чеховский // Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2010611241 от 12.02.2010. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2010. – 1 с.

2. Припадчев, А.Д. Программа для оптимизации парка воздушных судов [Текст] / А.Д. Припадчев, Н.З. Султанов, А.В. Чеховский // Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2010611242 от 12.02.2010. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, па-

тентам и товарным знакам, 2010. – 1 с.

3. Припадчев, А.Д. Программа для расчета конструктивно-геометрических параметров ЛА [Текст] / А.Д. Припадчев, А.В. Чеховский // Св. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2010611603 от 26.02.2010. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2010. – 1 с.

4. ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002–2012 годы и на период до 2015 года» [Электронный ресурс] / СПС «Консультант +». – Режим доступа: www.consultant.ru

УДК 681.3

В.Л. Онегов, Л.К. Каримова

АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОвого ПОЛЯ ЗЕМЛИ

При геофизическом изучении тепловых свойств геологической среды применяются два основных подхода: наземная и скважинная регистрация градиента эндогенного теплового поля; аэрокосмическое тепловизионное зондирование Земли, тесно связанное с экономичностью и целесообразностью применения на практике.

Неоспоримым преимуществом при исследовании региональных природных компонентов окружающей среды и техногенных объектов обладают современные дистанционные технологии [1, 2]. Их сущность заключается в получении разномасштабных спектрально-зональных снимков, цифровой обработке изображений и представлении в виде моделей среды. Основные способы интерпретации материалов, как правило, базируются на морфоструктурном анализе изменчивости изображения.

В этой связи в статье предлагается новый алгоритм обработки и способ дешифрирования материалов спектрально-зональной съемки по величине плотности потока теплового излучения в дальнем инфракрасном диапазоне. Создание нового информационного продукта на основе тепловизионных снимков в спектре электромагнитных волн 8–14 мкм позволяет при определенных условиях излучения Земли получать информацию не только об отражательной способности дневной поверхности, но и о глубинном строении среды и физической природе объектов. Глубина зондирования в методе связана с разрешающей способностью регистрируемого тепловизионного изображения, которая определяется размером пикселя на местности и зависит от высоты съемки и характеристик измерительной аппаратуры.

В работе использован принцип пересчета

поля в нижнее полупространство, получивший широкое распространение при интерпретации потенциальных полей в геофизике. Анализ устойчивости алгоритма пространственной фильтрации теплового поля проведен на синтетических моделях, рассчитанных для объектов, располагающихся вблизи дневной поверхности.

Моделирование теплового поля в геологической среде

Тепловизионное изображение, используемое для построения объемной модели среды, представляется как двумерная функция вида $f(x, y)$ [3]. Значение функции f в точке с координатами (x, y) является положительной скалярной величиной и отражает излучательную способность Земли. Поэтому функция $f(x, y)$ должна быть ненулевой и конечной:

$$0 < f(x, y) < \infty. \quad (1)$$

В результате операций дискретизации и квантования тепловизионного изображения возникает матрица действительных чисел из M строк и N столбцов. Координаты (x, y) становятся дискретными значениями. Для этих дискретных координат используются целочисленные значения. За начало координат принимается левый верхний угол изображения, где $(x, y) = (0, 0)$. Каждый элемент этой матрицы называется *элементом изображения* или *пикселем*.

Рассматриваемые тепловизионные изображения являются монохромными (черно-белыми). Значение интенсивности в произвольной точке с координатами (x_0, y_0) называется *уровнем серого* (I) или *яркостью изображения в этой точке*. Интервал $L_{\min} \leq I \leq L_{\max}$ называется *диапазоном яркостей*. Для простоты расчетов его обычно сдвигают по числовой оси, получая интервал $[0, L-1]$, края которого принимаются за минимальную ($I = 0$) и максимальную ($I = L-1$) излучательную способность элементов теплового изображения. При этом интенсивность пикселя в его центре считается исходным значением теплового поля.

Таким образом, исходное тепловизионное изображение представляет собой матрицу действительных чисел и находится в диапазоне $[0, L-1]$. Такую матрицу назовем *слоем* и обозначим S_0 . Построение объемной модели заключается в получении из S_0 остальных слоев S_n , где $n = \overline{1, N}$:

$$S_n = G(S_0, n). \quad (2)$$

Функция $G(S_0, n)$ в данном случае определяет глубинный шаг дискретизации (расстояние между слоями) модели. Она рассчитывается по интенсивности всей совокупности пикселей, значения которых определяются в центрах.

В зависимости от характера распределения теплового поля на исходном изображении и для построения наиболее точной модели имеет смысл использовать различные функции G . Самая простая из них – это расчет среднего арифметического, которая задается выражением:

$$s_{ij}^n = \frac{1}{(2n+1)^2} \sum_{m=i-n}^{i+n} \sum_{k=j-n}^{j+n} s_{mk}^0, \quad (3)$$

где s_{ij}^n – элемент матрицы S_n с координатами (i, j) ; s_{mk}^0 – элемент матрицы S_0 с координатами (m, k) ; $i+n < M, j+n < N, i > n, j > n$.

На практике, как правило, встречаются поля с распределением, близким к закону Гаусса. В этом случае целесообразно использовать следующую функцию, учитывающую закон нормального распределения:

$$s_{ij}^n = \frac{1}{2\pi\delta^2} \sum_{m=i-n}^{i+n} \sum_{k=j-n}^{j+n} s_{mk}^0 e^{-\frac{m^2+k^2}{2\delta^2}}. \quad (4)$$

Параметр δ здесь связан с эффективной глубиной n соотношением $\delta = kn$, где k характеризует шаг проникновения в трехмерной модели. Варьируя коэффициент k , можно построить объемную модель с малым расстоянием между слоями.

Глубина каждого слоя модели прямо пропорционально зависит от пространственного разрешения тепловизионного снимка и номера этого слоя. Следует отметить, что максимальное число слоев S_n не может быть больше половины меньшей стороны снимка:

$$\begin{cases} n < M/2, & \text{если } M < N; \\ n < N/2, & \text{если } N < M. \end{cases} \quad (5)$$

В ходе исследований экспериментально установлена максимальная глубина расчета тепловых моделей по авиационным снимкам, в которых краевые эффекты искажения поля проявляются незначительно (табл.).

Следующий шаг углубленного анализа данных – процесс разделения регионального и локального тепловых полей. При формировании локального поля применимы плоские функциональные аппроксимации в виде полиномов низких степеней. Для глобальных моделей выбраны разложения по сферическим (шаровым) функциям

**Пространственные характеристики тепловизионных исследований
для оптимальных высот авиационной съемки**

Высота съемки, м	50	100	300	500	1000
Пространственное разрешение снимка, м	0,03	0,06	0,18	0,3	0,6
Максимальная глубина проникновения, м	3	6	18	30	60

с использованием подхода адаптивного регрессионного моделирования при обработке данных [4]. В качестве описания регионального поля (R) на плоскости и сегменте сферической поверхности предлагается использовать аппроксимирующую модель в виде:

$$R(\lambda, \theta) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta), \quad (6)$$

где θ, λ – сферические координаты точки; C_{nm}, S_{nm} – амплитуды гармоник $C_{nm} P_{nm}(\cos \theta) \cos(m\lambda)$ и $S_{nm} P_{nm}(\cos \theta) \sin(m\lambda)$; $P_{nm}(\cos \theta)$ – присоединенные функции Лежандра степени n и порядка m .

Для упрощения процесса вычисления регионального поля можно использовать аппроксимацию на основе применения «типовых» распределений. Учитывая, что распределение теплового поля, создаваемого объектом в среде, близко к нормальному, в качестве аппроксимирующей функции выбирается закон Гаусса следующего вида:

$$R(i, j) = \frac{1}{2\pi\delta^2} \sum_{m=i-n}^{i+n} \sum_{k=j-n}^{j+n} S(m, k) e^{-\frac{m^2+k^2}{2\delta^2}}. \quad (7)$$

Параметр δ определяет глубину, для которой выстраивается региональное поле и выбирается исходя из отметок залегания объекта.

Следующий этап моделирования – преобразование множества построенных слоев теплового поля в объемную модель блоково-разломных структур Земли. Она используется для классификации геологической среды: селективного отображения блоково-морфоструктурного строения (геодинамических блоков и граничных разрывов); внутренних термодинамических неоднородностей блоков; зон сжатия, растяжения и разуплотнения пород с улучшенными коллекторскими свойствами, в состав которых входят зоны флюидоперетоков и флюидонакопления. Для наглядного представления результатов обработки строят карты-срезы на определенных глубинах и вертикальные разрезы в рамках горизонтально-слоистых и/или градиентных сред, по которым устанавливается общая схема тепловых потоков, основные их направления и неоднородности.

Задача расчета модели структуры сводится к увеличению амплитуды малоинтенсивных положительных аномалий при относительном сохранении общего фона теплового поля. Учитывая, что на тепловизионном изображении яркость пикселей отражает величину теплового потока, применяется преобразование, выделяющее области с относительно большими значениями элементов изображения. Это достигается использованием максимизирующего фильтра. Его отклик по определенной окрестности задается выражением:

$$b_{ij}^n = \max \{s_{mk}^n \mid m = \overline{i-n, i+n}, k = \overline{j-n, j+n}\}. \quad (8)$$

Изображение, полученное с использованием максимизирующего фильтра, позволяет определить участки повышенного теплового потока и линии разрывов среды.

**Программный комплекс построения
объемных моделей**

На базе предложенных алгоритмов реализован программный комплекс для расчета объемных моделей теплового поля на тепловизионных снимках. Структура функционального наполнения комплекса состоит из отдельных модулей, каждый из которых осуществляет собственные расчеты и реализуется в виде динамически подключаемой библиотеки. Это построение делает систему гибкой и простой в развертывании, имеется возможность наращивания комплекса для работы с различными форматами графической информации и обработки по ряду алгоритмов. Схема комплекса представлена на рис. 1.

Модули набора *Графические форматы* предназначены для преобразования исходных данных различных типов в общий вид; имеют однотипную внутреннюю структуру, что позволяет легко наращивать число обрабатываемых форматов без перекомпиляции системы. Модули *Алгоритмы обработки* создают набор слоев для построения модели теплового поля.

Модуль *Объемное построение* создает трехмерную модель теплового поля, срезы и разрезы с дифференциальными трансформациями. Модуль *Диспетчер памяти* определяет хранение

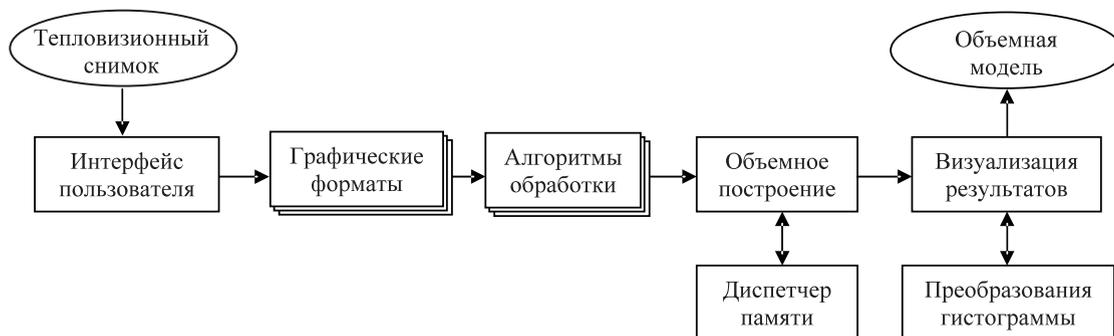


Рис. 1. Схема программного комплекса

и доступ к объемной модели в памяти компьютера. Модуль *Визуализация результатов* отвечает за отображение результатов обработки и сохранение их на диске в заданном формате. Модуль *Преобразования гистограммы* обеспечивает изменение характеристик изображения для более качественного отображения.

Параметры моделирования – вид тепловизионного снимка, тип алгоритма, пространственное разрешение пикселя на местности, число слоев, глубина проникновения, шаг сохранения слоев – выбирают исходя из априорных сведений о геологическом строении региона, ожидаемой глубины залегания и размеров изучаемых объектов. Они задаются интерактивно через интерфейс пользователя. Имеется дополнительное окно выбора параметров отображения результатов моделирования.

На рис. 2 представлен фрагмент объемной тепловой модели среды, рассчитанный комплексом на основе авиационного тепловизионного снимка.

Тестирование программы направлено на определение кластера моделей сред, которые с допустимой погрешностью восстанавливаются

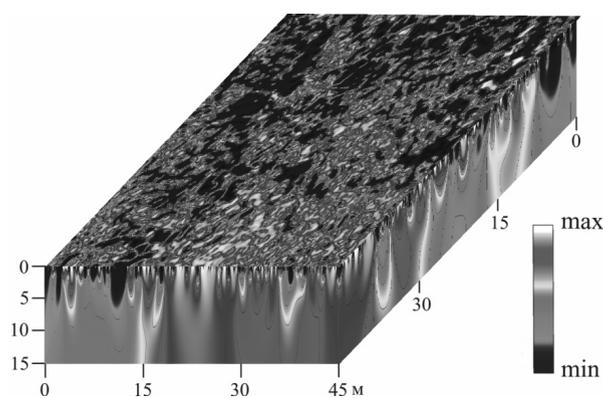


Рис. 2. Объемная модель регионального теплового поля Земли ($\text{мВт/м}^2 \cdot \text{ср.мкм}$)

данным алгоритмом. В качестве изучаемых трехмерных моделей, с учетом простоты их расчета и дальнейшего преобразования, приняты разные виды шарообразных высокотемпературных точечных источников, находящиеся в изотропной среде [5] (рис. 3). Нарастивание количественного и качественного состава источников отражает этапы усложнения моделей среды. Точность прогнозирования одиночного сферического объекта составила: по глубине до центра шара 0,05 м или 1,2 %, в плане – 0,05 м (0,5 %); по температуре – в 3,6 К или 6,9 %. Средняя погрешность в оценке местоположения различно расположенных точечных источников ТП в однородной среде, как правило, сохраняется.

Проведен расчет двумерных моделей, напоминающих по форме структуры горст и грабен. Моделирование реальных геологических объектов в виде неоднородностей осадочного чехла, выступов поверхности кристаллического фундамента, тектонических нарушений позволяет оценить прикладное значение ДТЗЗ. При включении в модель двумерной неоднородности по тепловым свойствам возникает аномалия характерной формы и размеров. Это наглядно демонстрирует разрешающую способность метода при решении обратной задачи, с оценкой средней погрешности в построении геометрических образов природных объектов, которая незначительно возрастает при усложнении модели, но не превышает 3 %.

Решение обратной задачи на основе описанных алгоритмов обработки тепловизионных изображений показало возможность и достоверность предлагаемой методики дешифрирования при изучении геологических сред. Снимки являются полноценным источником информации для проведения морфоструктурного анализа и построения объемных моделей, изучения распределения

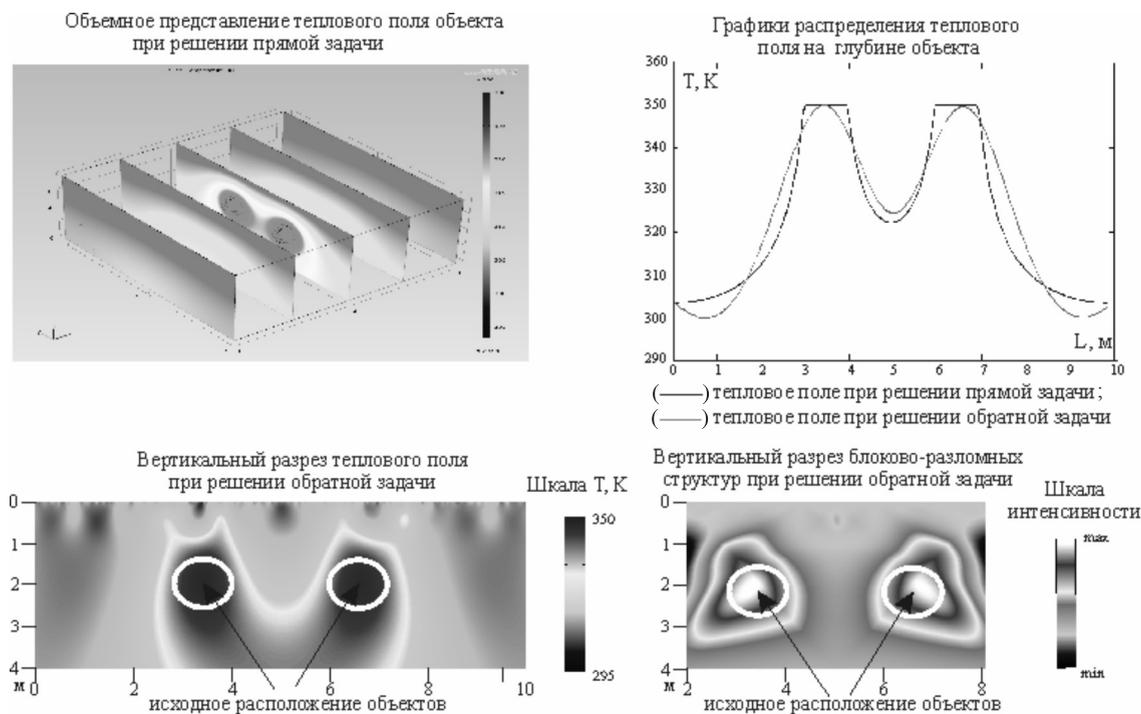


Рис. 3. Модель теплового поля, создаваемого двумя шарообразными объектами в однородной среде

тепловых характеристик поля Земли независимо от доступности территории исследования и рельефа местности. Внедрение программного ком-

плекса позволит в дальнейшем снизить стоимость и повысить производительность геологоразведочных работ при анализе больших площадей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кронберг, П.** Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии [Текст] / П. Кронберг; пер. с нем. –М.: Мир, 1988. –343 с.
2. **Шилин Б.В.** Тепловая аэро съемка при изучении природных ресурсов [Текст] / Б.В. Шилин. –Л.: Гидрометеоздат, 1980. –247 с.
3. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений

- [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. –М.: Техносфера, 2005. –1072 с.
4. **Валеев, С.Г.** Регрессионное моделирование при обработке данных [Текст] / С.Г. Валеев. –Казань: ФЭН, 2001. –296 с.
5. **Егоров, В.И.** Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности: Учеб. пособие [Текст] / В.И. Егоров. –СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. –77 с.

УДК 004.93

А.А. Захаров, М.И. Ткачук

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН ПО ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Возросший интерес к системам технического зрения (СТЗ) в значительной мере объясняется тем, что прогресс цифровой техники привел к

доступности СТЗ, способных решать актуальные задачи, возникающие в различных областях промышленности, сервиса, медицины, индустрии

развлечений и т. д. В связи с тем, что требования заказчиков индивидуальны, а эксплуатация СТЗ часто усложняется различными условиями, вопрос разработки новых методов и алгоритмов компьютерного зрения встает достаточно остро. В сложившейся ситуации появилась потребность в автоматизированных системах построения трехмерных моделей по изображениям, в которых взаимодействие с пользователем сводится к малому количеству простых операций.

Оптические методы трехмерной реконструкции. Одна из основных задач компьютерного зрения – задача восстановления формы по изображениям. Выделяют активные и пассивные оптические методы трехмерной реконструкции. Активные методы реконструкции основаны на использовании дальномеров, имеющих высокую стоимость. Пассивные оптические методы трехмерной реконструкции включают в себя обработку двумерных изображений.

К пассивным методам относятся реконструкции [7, 9]:

- по стереоизображениям (shape from stereo);
- по закраске изображения (shape from shading);
- по текстуре (shape from texture);
- по фокусировке (shape from focus);
- по контуру (shape from contour (silhouettes));
- по перемещению (shape from motion).

В последнее время активно ведутся разработки методов трехмерной реконструкции по перемещению (shape from motion) [5, 7–9]. В этом случае происходит восстановление формы сцены из последовательности изображений, полученных с разных позиций съемки в некоторые моменты времени. Часто положения камеры тоже считаются неизвестными и восстанавливаются в ходе решения задачи. Для создания системы трехмерной реконструкции предлагается использовать метод, основанный на перемещении камеры в пространстве. Этот метод получил название *реконструкции по видеопоследовательности* (shape from video).

Коммерческих систем, выполняющих восстановление 3D-геометрии по набору изображений, мало. Кроме того, подобные системы имеют ряд недостатков. Например, системы стереофотограмметрии осуществляют построение только моделей рельефа, которые не обладают сложной геометрией в отличие, например, от визуальной обстановки города. Также реконструкция происходит по отдельно выбранным кадрам, что влияет

на точность восстановления геометрии. Восстановление геометрии объектов сцены в подобных системах затруднено и требует значительного участия пользователя. Поэтому необходимо разрабатывать новые методы и программные средства автоматической реконструкции трехмерных сцен с геометрией различной сложности.

Алгоритм автоматической реконструкции трехмерных сцен по видеопоследовательности. Предлагаемый алгоритм состоит в следующем. Из всего набора изображений выбираются два соседних кадра. Цель – нахождение соответствий с соседним кадром последовательности. По кадрам вычисляются характерные опорные точки трехмерной сцены. Другие изображения обрабатываются уже относительно первых кадров. На каждом шаге алгоритма первоначальная реконструкция уточняется и расширяется. Алгоритм основан на реализации следующих этапов построения трехмерной модели по видеопоследовательности.

Шаг 1. Получение набора растровых изображений при помощи цифровой видеокамеры. Съемка объекта происходит с разных точек зрения. Камера перемещается по прямой линии. Направление оптической оси камеры строго перпендикулярно направлению движения (рис. 1). На практике камера устанавливается на крыше автомобиля. Текущие координаты камеры определяются с помощью системы спутниковой навигации. Погрешность определения координат камеры не накладывает существенных ограничений на точность реконструкции, т. к. движение происходит по прямой линии.

Шаг 2. Фильтрация изображений. Позво-

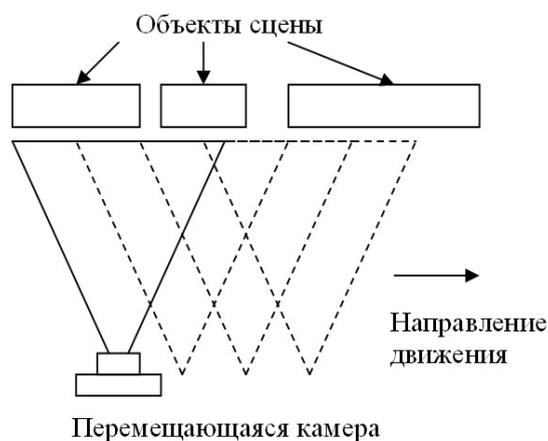


Рис. 1. Схема получения видеопоследовательности

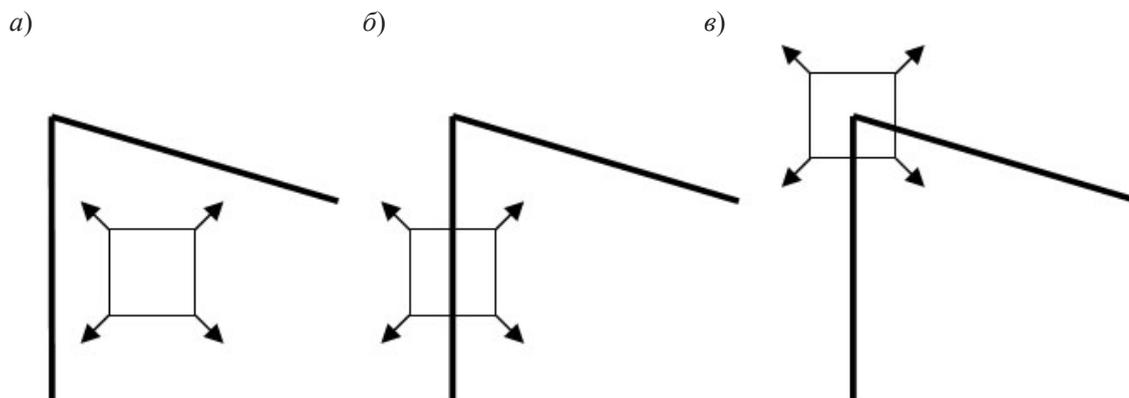


Рис. 2. Детектор Харриса:
 а – рамка на однородной части изображения; б – рамка на границе; с – рамка на уголке

ляет выполнять операции предварительной обработки изображений: сглаживания, изменения контраста и т. д. В работе эксперимент проводился с тестовыми изображениями высокого качества и для них этот шаг в алгоритме не рассматривался.

Шаг 3. Выделение точечных особенностей. Точечная особенность – точка, чья окрестность отличается от окрестностей других точек изображения по выбранной мере. Один из наиболее известных алгоритмов нахождения точечных особенностей – детектор Харриса, обладающий высоким быстродействием [6].

В этом случае для каждого пикселя изображения вычисляется значение особой функции отклика угла, которая оценивает степень похожести изображения окрестности точки на угол (рис. 2).

Изменение содержимого рамки при сдвиге на вектор (u, v) равно $E(u, v)$. Функция описания изменения содержимого рамки $E(u, v)$ при сдвиге на вектор (u, v) :

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2,$$

где $I(x, y)$ – изображение маркера; $w(x, y)$ – оконная функция.

Для небольших смещений $E(u, v)$ можно приблизить билинейной формой:

$$E(u, v) \cong [u, v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix},$$

где M – матрица производных по изображению 2×2

$$M = \sum_{x, y} w(x, y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}.$$

В случае, когда рамка находится на равномерной поверхности, оба собственных числа матри-

цы M малы. В случае с границей на изображении одно собственное число много больше другого. Если рамка находится на уголке, то оба собственных числа велики.

Шаг 4. Нахождение точечных соответствий на изображениях. На этом этапе необходимо установить соответствие между точечными особенностями различных изображений одной и той же сцены. Для нахождения точечных соответствий используются дескрипторы. Дескриптор – это идентификатор ключевой точки, выделяющий её из группы точек. По совпадению дескрипторов выделяются соответствующие друг другу ключевые точки. Дескрипторы должны обеспечивать инвариантность нахождения соответствия между особыми точками относительно преобразований изображений. В работе использован дескриптор SIFT (Scale Invariant Feature Transform).

Шаг 5. Вычисление координат опорных точек. Опорными точками будем называть точки, проекции которых были выделены на изображении детектором. Два снимка с изображениями одного и того же участка местности, полученные с двух точек пространства, называются *стереоскопической парой снимков (стереопарой)*. Для вычислений используется понятие эпиполярной конфигурации [1–4]. В простейшем случае две одинаковые параллельные плоскости изображений параллельны базе стереосистемы (рис. 3).

Эпиполярной плоскостью называется плоскость, которой принадлежит трехмерная точка P , оптические центры двух камер C_1 и C_2 , две проекции P_1 и P_2 точки P на плоскости изображений. *Эпиполярными прямыми* называются две прямые e_1 и e_2 , которые являются прямыми пере-

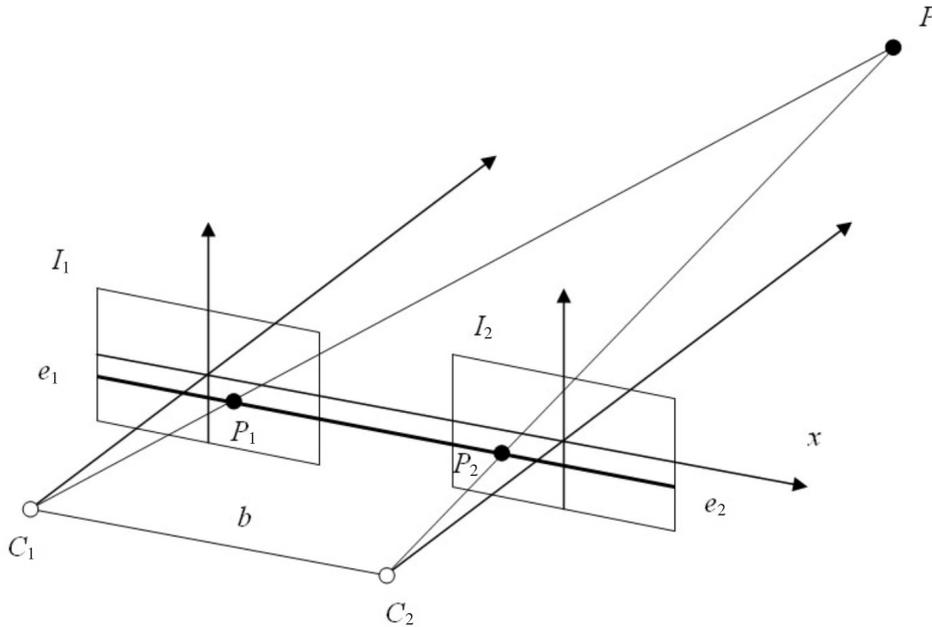


Рис. 3. Эпиполярная конфигурация нормальной пары изображений

сечения эпиполярной плоскости с двумя плоскостями изображений I_1 и I_2 . Расстояние между оптическими центрами камер называется *базой* b . Зная параметры эпиполярной конфигурации, можно вычислить пространственные координаты точки P .

Камера заранее откалибрована. Задача калибровки заключается в том, чтобы определить, как расположены пиксели на плоскости изображения данной камеры относительно точек трехмерного пространства, изображения которых требуется получать с помощью камеры. Выделяют внутренние и внешние параметры камеры. К внутренним параметрам относятся:

точка пересечения оптической оси и плоскости изображения;

масштабные множители для горизонтального и вертикального размеров пикселя;

фокусное расстояние f – расстояние от оптического центра до плоскости изображения;

множитель дисторсии объектива – масштабный множитель, применяемый для моделирования радиальной дисторсии объектива.

Внешние параметры описывают местоположение и ориентацию системы координат камеры в трехмерном пространстве. К ним принадлежат параметры переноса $t = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ и параметры поворота

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Алгоритм разработан для частного случая: известны внутренние и внешние параметры камеры. Так как оптическая ось камеры всегда направлена перпендикулярно движению, то параметры поворота не учитываются.

В рассматриваемой системе координаты проекций точки P на плоскости изображений можно вычислить следующим образом:

$$x_{P_1} = f(x_P + b/2) / z_P, \quad x_{P_2} = f(x_P - b/2) / z_P, \\ y_{P_1} = y_{P_2} = f y_P / z_P.$$

Из первых двух соотношений следует, что

$$z_P = fb / (x_{P_1} - x_{P_2}).$$

Таким образом, можно вычислить координаты x и y точки P :

$$x_P = b \frac{x_{P_1} + x_{P_2}}{2(x_{P_1} - x_{P_2})}, \quad y_P = b \frac{y_{P_1} + y_{P_2}}{2(x_{P_1} - x_{P_2})}.$$

Шаг 6. Построение трехмерной модели по вычисленным координатам. По вычисленным координатам осуществляется построение трехмерных примитивов. Геометрическая модель строит-

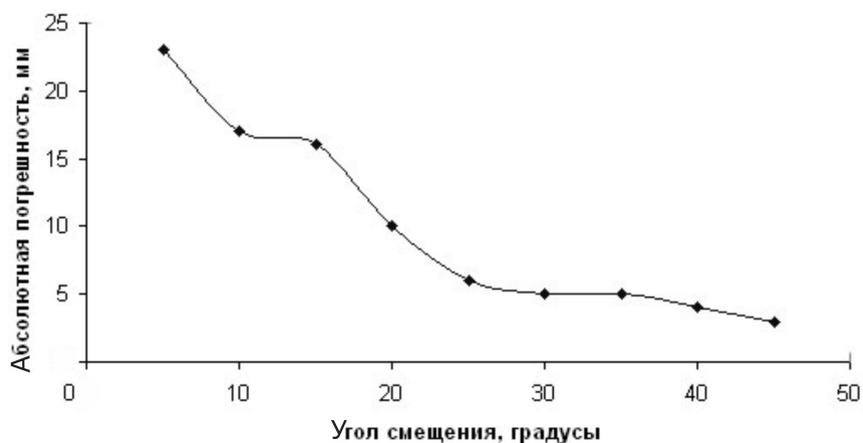


Рис. 4. График зависимости абсолютной погрешности измерения трехмерных координат от угла смещения камеры

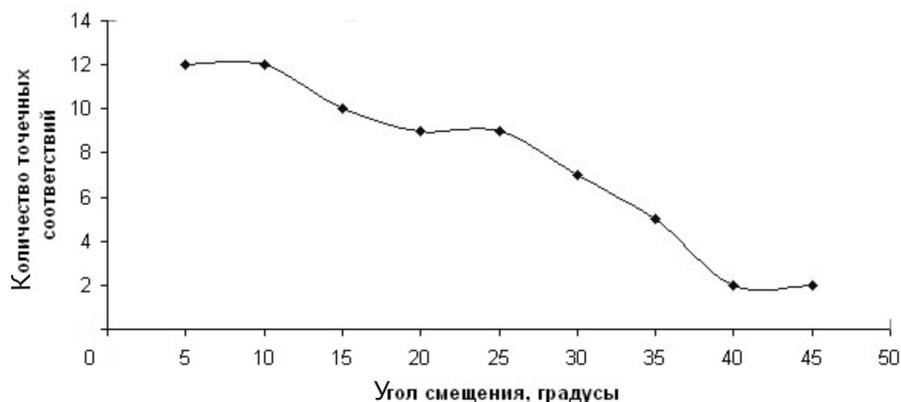


Рис. 5. График зависимости количества найденных точечных пар от угла смещения камеры

ся с использованием полигональной геометрии. Этот этап – один из наиболее простых в реализации, т. к. существуют эффективные алгоритмы построения поверхности по известным координатам вершин.

Экспериментальные исследования алгоритма. При реализации алгоритма необходимо находить компромисс между размером поля зрения, точностью вычисления трехмерных координат и количеством найденных точечных соответствий. При малой базе небольшие исходные погрешности в определении координат могут привести к значительным ошибкам вычисления глубины. Если соседние положения камеры будут значительно удалены друг от друга, то это может привести к трудностям в сопоставлении точечных особенностей из-за взаимного перекрытия объектов на изображениях и изменения изображения сцены.

На объекте, имеющем форму параллелепипеда, провели экспериментальные исследования алгоритма. На стороны параллелепипеда нанесли изображения угловых маркеров; произвели съемку сцены с нескольких позиций. По полученным результатам построили графики зависимости абсолютной погрешности измерения трехмерных координат и количества найденных точечных пар от угла смещения относительно исходного положения камеры (рис. 4, 5).

Анализ графиков показал, что наибольшая точность вычислений координат обеспечивается при угле смещения камеры 25–45 градусов. Однако с увеличением угла смещения значительно уменьшается количество автоматически найденных точечных соответствий. Таким образом, в системе выбрали параметры, при которых угол смещения относительно текущего положения был равен 25 градусам.



Рис. 6. Построение трехмерной модели по последовательности изображений

Исследования разработанного алгоритма проведены на реальных объектах (рис. 6).

Следует отметить, что качество синтезируемой сцены во многом зависит от сложности растрового рисунка. Не всегда алгоритм корректно работает с изображениями, на которых представлены объекты, имеющие сложную геометриче-

скую структуру, или присутствуют взаимные перекрытия. В дальнейшем для повышения качества алгоритма реконструкции планируется улучшать и разрабатывать новые алгоритмы нахождения точечных соответствий.

Работа выполнена при поддержке грантов МК-8838.2010.9, ИК-10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Март, Д.** Зрение. Информационный подход к представлению и обработке зрительных образов [Текст] / Д. Март; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 400 с.
2. **Форсайт, Д.** Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / Д. Форсайт, Ж. Понс; пер. с англ. – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
3. **Хорн, Б.К.П.** Зрение роботов [Текст] / Б.К.П. Хорн; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 487 с.
4. **Шапиро, Л.** Компьютерное зрение [Текст] / Л. Шапиро, Дж. Стокман; пер. с англ // Лаборатория знаний. – М.: БИНОМ, 2006. – 752 с.
5. **El-Hakim, S.F.** Semi-automatic 3d reconstruction of occluded and unmarked surfaces from widely separated views [Текст] / S.F. El-Hakim // Proc. ISPSRS Symp. – Corfu. – 2002. – P. 143–148.
6. **Harris, C.G.** A combined corner and edge detector [Текст] / C.G. Harris, M. Stephens // Proc. 4th Alvey Vision Conf. – Manchester. – 1988. – P. 147–151.
7. **Hartley, R.** Multiple View Geometry in Computer Vision [Текст] / R. Hartley, A. Zisserman. – Cambridge University Press, 2000. – 655 p.
8. **Pollefeys, M.** Detailed realtime urban 3D reconstruction from video [Текст] / M. Pollefeys, D. Nister, J.-M. Frahm // International J. of Computer Vision. – 2008. – Vol. 78 (2–3). – P. 143–167.
9. **Szeliski, R.** Computer Vision: Algorithms and Applications [Текст] / R. Szeliski. – Springer-Verlag N.Y. Inc, 2010. – 979 p.

ОЦЕНКА ВАРИАЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ КАНАЛОВ ДАТЧИКОВ СИЛЫ

Современные весоизмерительные устройства и системы промышленного применения основаны на использовании тензорезистивных датчиков силы. Их разработкой и выпуском занимается большое количество зарубежных и отечественных фирм («Тензо-М» [1], «УралВес», Sartorius [2], «НВМ» [3] и др.). В таких датчиках используются, как правило, не менее четырех тензорезисторов, устанавливаемых в зонах упругого элемента (УЭ), испытывающих при нагружении датчика одинаковые по модулю, но разные по знаку деформации. Путем включения этих тензорезисторов в мостовую схему удается в значительной мере снизить систематические погрешности преобразования, обусловленные влиянием температуры, нелинейности УЭ и самих тензорезисторов, технологических допусков при изготовлении УЭ [4],

внецентренного расположения измеряемой массы на грузоприемной платформе [5] и т. д. По этой причине в тензодатчиках, предназначенных для эксплуатации в сложных условиях, применяют одновременно несколько мостовых схем [6]. Однако следует отметить, что упомянутые достоинства мостовых цепей могут быть реализованы в достаточной мере лишь при условии строгой идентичности чувствительности S_i (по модулю) тензорезистивных каналов:

$$R_i = R_{0i} + S_i \cdot F,$$

где F – измеряемое усилие; R_{0i} – сопротивление i -го тензорезистора при $F = 0$. Введем понятие степени идентичности (разброса чувствительности) тензорезистивных каналов:

$$\gamma_i = \frac{S_{0i} - S_i}{S_{0i}}, \quad (1)$$

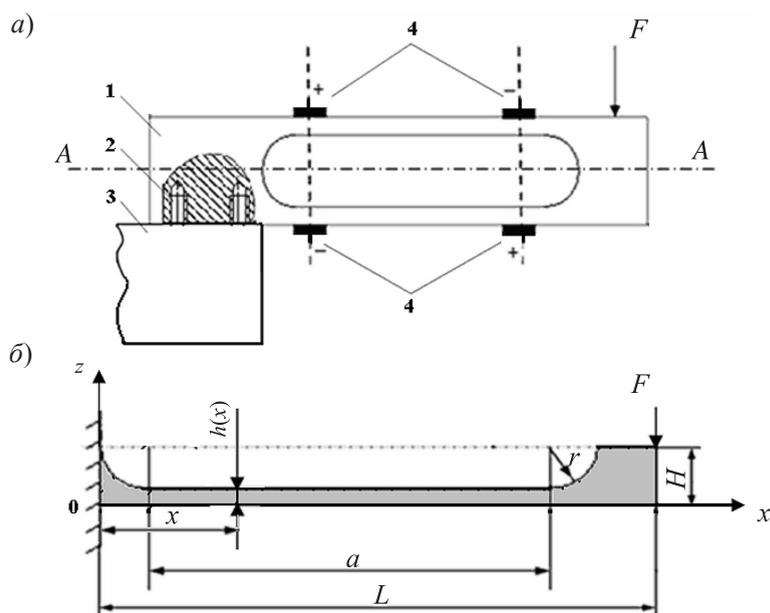


Рис. 1. Упрощенная конструкция тензодатчика силы с рамочным УЭ

где S_{0i} – номинальное значение чувствительности тензорезистивного канала. В УЭ тензорезистивных датчиков силы поле деформаций, как правило, сильно неоднородно, поэтому (1) в значительной мере определяется местом установки, ориентацией оси чувствительности и выбором размера (базы) тензорезистора.

Ниже приводятся результаты моделирования зависимости вариаций чувствительности (1) тензорезистивных каналов от размера (базы) тензорезисторов и от технологических допусков на их установку для наиболее распространенных в настоящее время конструкций УЭ типа двойной консольной балки [1–3, 5].

На рис. 1 а показана упрощенная конструкция тензорезистивного датчика силы с рамочным УЭ. Левый конец рамы 1 с помощью болтового соединения 2 жестко закрепляется на основании 3, а другой (свободный) конец нагружается измеряемым усилием F . Тензорезисторы 4 наклеиваются на верхнюю и нижнюю поверхности рамы в точках, испытывающих при нагружении максимальные деформации растяжения (+) и сжатия (–).

Для решения задачи о распределении механических деформации $\varepsilon(x)$ вдоль длины балки x будем исходить из предположения, что при ее изгибе вертикальные сечения, лежащие за пределами выемки, не испытывают поворотов в плоскости ZX . Это предположение справедливо, т. к. обычно толщина концов балки много больше толщины нижней и верхней кромок выемки. С учетом симметрии относительно срединной плоскости $A-A$, расчетная схема рамочного УЭ принимает вид, изображенный на рис. 1 б.

Текущую толщину $h(x)$ нижней кромки профиля упругого элемента можно описать кусочно-непрерывной функцией:

$$h(x) = \begin{cases} H - \sqrt{r^2 - (x-r)^2} & 0 \leq x \leq r \\ H - r & r \leq x \leq r + a \\ H - \sqrt{r^2 - (x-r-a)^2} & r + a \leq x \leq a + 2 \cdot r \\ H & a + 2 \cdot r \leq x \leq L \end{cases}$$

где r – радиус ослабляющих отверстий; a – расстояние между центрами этих отверстий; H – полутолщина балки; L – длина рабочей части балки.

Момент инерции поперечного сечения в текущей точке профиля балки равен:

$$J(x) = \frac{b \cdot h(x)^3}{12},$$

где b – ширина упругого элемента. Момент сопротивления текущего сечения профиля определяется выражением:

$$W(x) = \frac{b \cdot h(x)^2}{6}.$$

В соответствии с принятой расчетной схемой, изгибающий момент в текущем сечении профиля упругого элемента можно записать в виде [7]:

$$M(x) = \frac{F}{2} \cdot \left(x - \frac{A_2}{A_1} \right),$$

где константы A_1 и A_2 представляют собой определенные интегралы:

$$A_1 = \int_0^L \frac{dx}{J(x)}; \quad A_2 = \int_0^L \frac{x \cdot dx}{J(x)}.$$

Для искомой зависимости деформации от текущей координаты x получим:

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{E} \cdot \frac{M(x)}{W(x)},$$

где E – модуль Юнга материала упругого элемента.

График этой функции для случая $F = 600 \text{ Н}$; $E = 0,7 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; $r = 16 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $a = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $b = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $H = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $L = 90 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ приведен на рис. 2 а. Из рисунка следует, что характер распределения деформации имеет явно выраженный неоднородный характер с двумя экстремумами в точках $x_1 = 15 \text{ мм}$ и $x_2 = 67,5 \text{ мм}$. Аналогичный характер имеет распределение относительных деформаций в верхней кромке упругого элемента. На рис. 2 б приведена зависимость $\varepsilon(x)$ в окрестности одного из пиков $x_1 = 15 \text{ мм}$. На рис. 2 значения относительной деформации приведены в ЕОД ($1 \text{ ЕОД} = 10^{-6}$).

Реальный тензорезистор преобразует в изменение сопротивления среднее значение относительной деформации, зависящее от координаты c центра и величины базы d тензорезистора:

$$\varepsilon(c, d) = \frac{1}{d} \int_{c-0,5 \cdot d}^{c+0,5 \cdot d} \varepsilon(x) dx.$$

Введем случайный параметр Δ , который можно трактовать как технологическое отклонение центра тензорезистора от точки с координатой, соответствующей одному из экстремумов распределения $\varepsilon(x)$. В частности, координата центра тензорезистора, установленного в зоне деформаций, изображенной на рис. 2 б, примет значение $c_1 = x_1 + \Delta$.

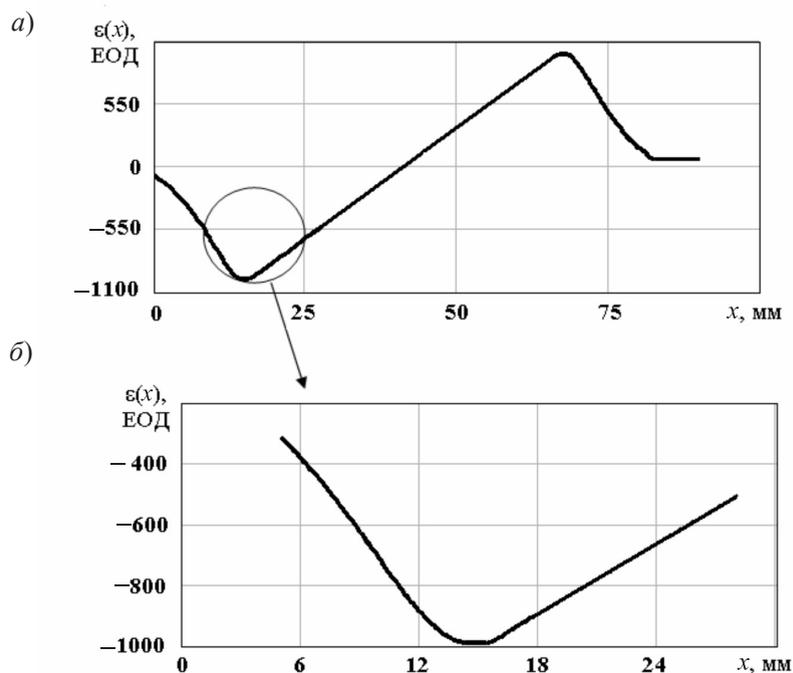


Рис. 2. Поле деформаций рамочного упругого элемента

Будем считать для простоты, что все тензорезисторы, установленные на УЭ (рис. 1 а), идентичны, и их оси чувствительности параллельны оси x . В этом случае вариации чувствительности (1) любого из четырех тензорезистивных каналов зависят лишь от параметров Δ и d и могут быть оценены из выражения:

$$\gamma_i \approx \frac{\varepsilon_i - \varepsilon(x_i + \Delta, d)}{\varepsilon_i} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где x_i – значения координаты x , соответствующей экстремальному значению ε_i относительной деформации $\varepsilon(x)$.

На рис. 3 изображено семейство кривых

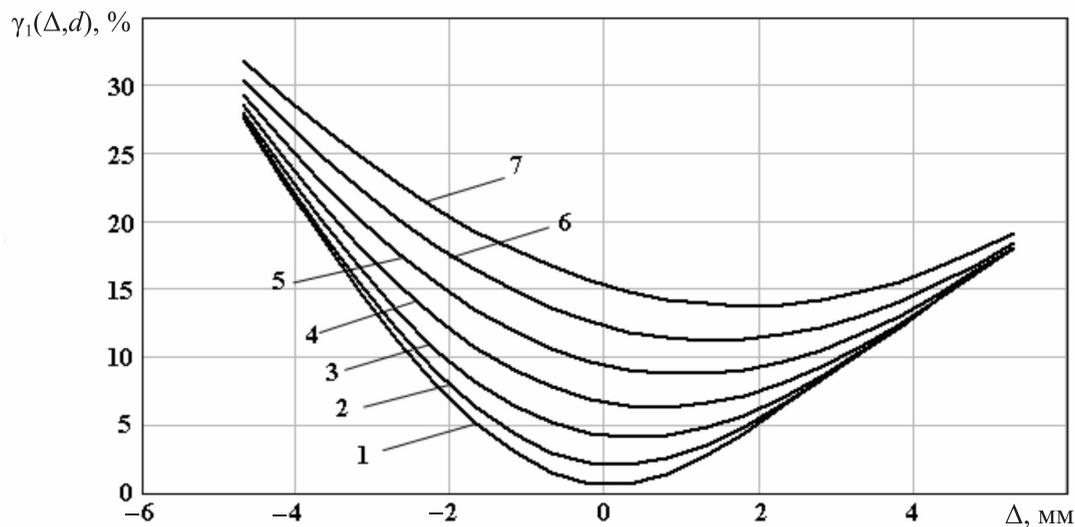


Рис. 3. Зависимость вариаций чувствительности тензорезистивного канала в датчике силы с рамочным упругим элементом
 1 – $d = 2$ мм; 2 – $d = 4$ мм; 3 – $d = 6$ мм; 4 – $d = 8$ мм; 5 – $d = 10$ мм;
 6 – $d = 12$ мм; 7 – $d = 14$ мм

$\gamma_1(\Delta, d)$, соответствующее тензорезистивному каналу, реагирующему на деформацию сжатия в окрестности точки $x = x_1$. Параметром этих кривых является база d тензорезисторов, значения которой заданы с шагом 2 мм в диапазоне от 2 до 14 мм. По оси абсцисс отложены значения аргумента Δ в диапазоне от -5 до 5 мм с шагом $0,5$ мм.

Из результатов моделирования можно сделать следующие выводы. Применение тензорезисторов с большими значениями базы d всегда приводит к снижению чувствительности тензорезистивного канала. Так, при оптимальном расположении тензорезисторов ($\Delta = 0$) увеличение базы тензорезистора от 2 (кривая 1) до 14 мм (кривая 7) приводит к снижению чувствительности канала примерно на 15 % по сравнению с максимально возможным значением, достигаемым лишь при самых малых значениях базы. При технологических допусках на установку тензорезисторов в пределах $|\Delta| \leq 2$ мм разбросы чувствительности тензорезистивных каналов могут достигать 7 % при использовании как малобазных тензорезисторов (кривая 1), так и тензорезисторов с большими значениями базы (кривая 7).

Тем не менее, в рамочном УЭ можно отдать предпочтение тензорезисторам с большими значениями базы. В первом приближении семейство кривых 1–7, изображенных на рис. 3, можно рассматривать как семейство парабол со смещенными вправо по оси абсцисс вершинами. Смещения вершин кривых 1, 5, 7 составляют 0,3; 1; 2 мм соответственно. Как видно из рисунка, с увеличением параметра d параболы становятся более пологими. При отклонениях от вершин в пределах ± 2 мм, ординаты упомянутых

парабол изменяются не более чем на 5; 3; 2 % соответственно. Таким образом, разброс чувствительности тензорезистивных каналов при использовании тензорезисторов с базами 10–14 мм может быть снижен до 2–3 %. При этом в качестве оптимального значения координаты центра тензорезистора следует принимать значение $c_1(d) = x_1 + \Delta x(d)$, где Δx – оцененное выше смещение вершин кривых.

Широкое применение в датчиках силы для цифровых весов получили УЭ в виде двойной консольной балки с профилем выемки, показанным на рис. 4 [1–3, 5].

Используя обозначения конструктивных параметров, указанные на рис. 1, текущую толщину нижней кромки УЭ, изображенного на рис. 4, можно описать функцией:

$$h(x) = \begin{cases} H - \sqrt{r^2 - (x-r)^2} & 0 \leq x \leq 1,75r \\ H - 0,75r & 1,75r \leq x \leq 0,25r + a \\ H - \sqrt{r^2 - (x-r-a)^2} & 0,25r + a \leq x \leq a + 2 \cdot r \\ H & a + 2 \cdot r \leq x \leq L \end{cases}$$

Для удобства сравнения результатов моделирования численные значения конструктивных параметров, указанных в расчетной схеме, выбраны таким образом, чтобы экстремальные значения механических деформаций в теле УЭ достигали, как и в первом варианте, 1000 ЕОД. Они имеют следующие численные значения: $F = 600$ Н; $E = 0,7 \cdot 10^{11}$ Па; $r = 14,5 \cdot 10^{-3}$ м; $a = 50 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 40 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $L = 90 \cdot 10^{-3}$ м.

Распределение упругих деформаций $\epsilon(x)$ по длине нижней кромки УЭ (рис. 4) аналогично рас-

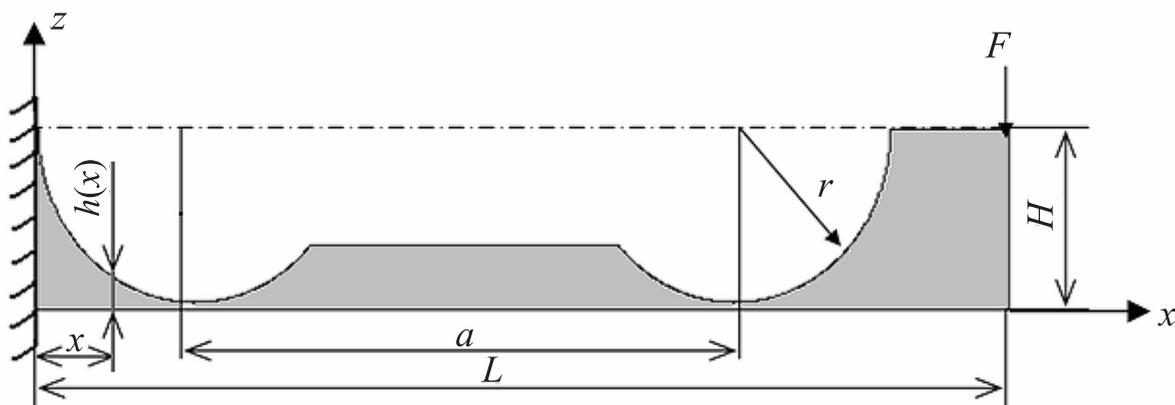


Рис. 4. Расчетная схема УЭ в виде двойной консольной балки со сложной формой выемки

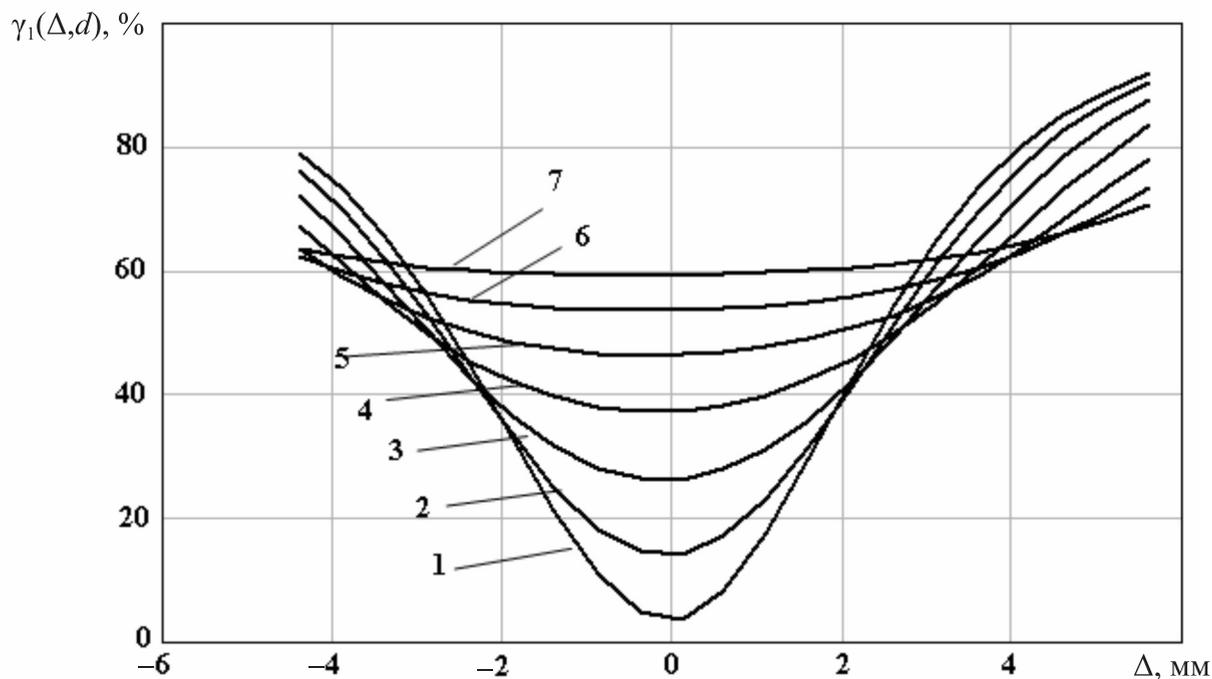


Рис. 5. Зависимость вариаций чувствительности $\gamma_1(\Delta, d)$ от параметров Δ и d для УЭ со сложной формой выемки
 1 – $d = 2$ мм; 2 – $d = 4$ мм; 3 – $d = 6$ мм; 4 – $d = 8$ мм; 5 – $d = 10$ мм; 6 – $d = 12$ мм; 7 – $d = 14$ мм

пределению, изображенному на рис. 2 а. Отличие заключается в существенно большей симметрии и остроте пиков сжатия и растяжения, координаты которых $x_1 = 14,5$ мм; $x_2 = 64,5$ мм. Зависимость вариаций чувствительности (2) тензорезистивного канала, реагирующего на деформацию сжатия, представлена в виде семейства кривых, изображенных на рис. 5. Параметр кривых – база d используемых тензорезисторов. Аргумент семейства кривых – величина технологических допусков Δ на установку тензорезистора в точку $x = x_1$.

Для небольших значений аргумента $|\Delta| \leq 2$ мм кривые, изображенные на рис. 5, имеют вид парабол, вершины которых лежат на линии $\Delta = 0$. Фокус парабол пропорционален параметру d . Поэтому для исследуемого варианта УЭ использование тензорезисторов с большими значениями базы приводит к сильному снижению чувствительности тензорезистивного канала. Для $d = 14$ мм (кривая 7) это снижение достигает 60 % от номинального значения чувствительности, т. е. более чем в два раза. С другой стороны, кривая 7 очень пологая в окрестности вершины,

что означает малую зависимость чувствительности тензорезистивного канала от технологических ошибок Δ при установке тензорезисторов. В диапазоне $|\Delta| \leq 2$ мм ордината кривой 7 изменяется в пределах 2 %. Использование малобазных тензорезисторов в исследуемом варианте УЭ вряд ли целесообразно, т. к. соответствующие кривые (например, кривые 1 и 2) обнаруживают очень сильную зависимость от аргумента Δ .

Приведенные оценки вариаций чувствительности хорошо подтверждаются численным моделированием с применением метода конечных элементов.

Производство современных тензодатчиков силы сопряжено с выполнением трудоемких и дорогостоящих технологических операций по установке тензорезисторов. Полученные результаты позволят более обоснованно подходить к выбору размеров и назначению технологических допусков на точность их установки. Это поможет снизить трудоемкость и стоимость изготовления тензодатчиков, в особенности, тензодатчиков высших классов точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тензодатчики: Листок-каталог [Текст] / Разработчик и изготовитель весоизмерительная компания «ТЕНЗО-М». –М.: 2011. –66 с.
2. Weighing components for the construction of process vessel scales: Листок-каталог [Текст] / Разработчик и изготовитель Sartorius. –Goettingen, Germany, 2011. – 10 с.
3. Весоизмерительные технологии НВМ: Листок-каталог [Текст] / Разработчик и изготовитель «НВМ». –М.: 2011. –15 с.
4. **Шнейдерман, А.Л.** Систематические погрешности упругого элемента однокомпонентных динамометров [Текст] / А.Л. Шнейдерман // Приборы и системы управления. –1971. –№10. –С. 35–37.
5. **Аш, Ж.** Датчики измерительных систем: Кн. 2 [Текст] / Ж.Аш [и др.]; Пер. с фр.; Под ред. А.С. Обухова. –М.: Мир, 1992. –480 с.
6. **Абанин, В.А.** Совершенствование методов и средств измерения силовых параметров в испытательной технике [Текст] / В.А. Абанин, Е.А. Абанина, Г.А. Привалов // Датчики и системы. –2010. –№11. –С.11–16.
7. Справочник конструктора точного приборостроения [Текст] / Г.А. Веркович, Е.Н. Головенкин, В.А. Голубков [и др.]; Под ред. К.Н. Явленского [и др.]. –Л.: Машиностроение, 1989. –792 с.

ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт-4, Teflon®) является диэлектрическим материалом, обладающим набором выдающихся физико-химических свойств, среди которых основное внимание привлекают низкие значения диэлектрической постоянной и тангенса угла диэлектрических потерь в широком диапазоне радиочастот, высокая химическая пассивность и температурная стабильность, гидрофобность и сверхнизкий коэффициент трения [1]. Такой набор свойств объясняет высокий интерес к ПТФЭ со стороны микроэлектронной, медицинской промышленности, а также с точки зрения создания устройств микросистемной техники. Так, с использованием ПТФЭ пленок прогнозируется существенное улучшение свойств органических светодиодов (OLED) [2], повышение качества защитных покрытий электронных приборов [3], улучшение биосовместимости медицинской электроники [4] и снижение трения и износа механического оборудования.

Однако более широкое применение ограничивается отсутствием подходящих растворителей ПТФЭ, поэтому технологии формирования таких покрытий базируются на распылении или окунании изделий в эмульсии ПТФЭ с последующей термообработкой. Очевидный недостаток таких методик – необходимость подвергать изделия нагреву до температур выше 300 °С для спекания ПТФЭ с целью создания стойких однородных пленок, что может оказаться неприемлемым для ряда материалов подложки. Более того, такие методики нанесения ПТФЭ не позволяют сформировать однородную ультратонкую пленку в силу того, что размер зерна ПТФЭ в суспензии, как правило, превышает 1 мк.

В последнее время в ряде работ, начиная с [5], предложена новая технология химического осаждения пленок ПТФЭ из газовой фазы (ХОГФ) на

холодные подложки, основанная на предварительном разложении окиси гексафторпропилена (HFPO, мономер-06) на нагретой нихромовой нити. Такой способ привлекает внимание относительной простотой химических реакций и удобством контроля процесса осаждения, а также возможностью формирования пленок нанометровой толщины. Низкая температура подложки делает возможным осаждение ПТФЭ на нетермостойкие материалы.

В работе [6] продемонстрирована возможность осаждения ПТФЭ на подложки из нержавеющей стали, при этом состав полученных пленок практически соответствовал стехиометрическому. Проведенный рентгеновский фотоэлектронный анализ пленок подтвердил, что полимер содержал преимущественно – CF₂-звенья (т. е. молекулы полимера имели линейную конфигурацию) и звенья с наличием углеводородных фрагментов и кислорода в следовых количествах. В ходе определения молекулярной массы методом ионно-циклотронной масс-спектрометрии (FT ICR-MS) установлено, что наибольшие сигналы от фрагментов молекул ПТФЭ лежали в диапазоне массовых чисел 880–2480 Да, при этом диапазон простирался вплоть до значений около 4000 Да.

Из сказанного выше становится очевидным, что методика ХОГФ пленок ПТФЭ с активацией окиси гексафторпропилена на накаливаемой нити представляет значительный научно-технический интерес. Цель данной работы – конструирование и изготовление оборудования и получение предварительных данных по ХОГФ пленок ПТФЭ.

Методика. ХОГФ пленок ПТФЭ проводилось в экспериментальном реакторе, изображенном на рис. 1.

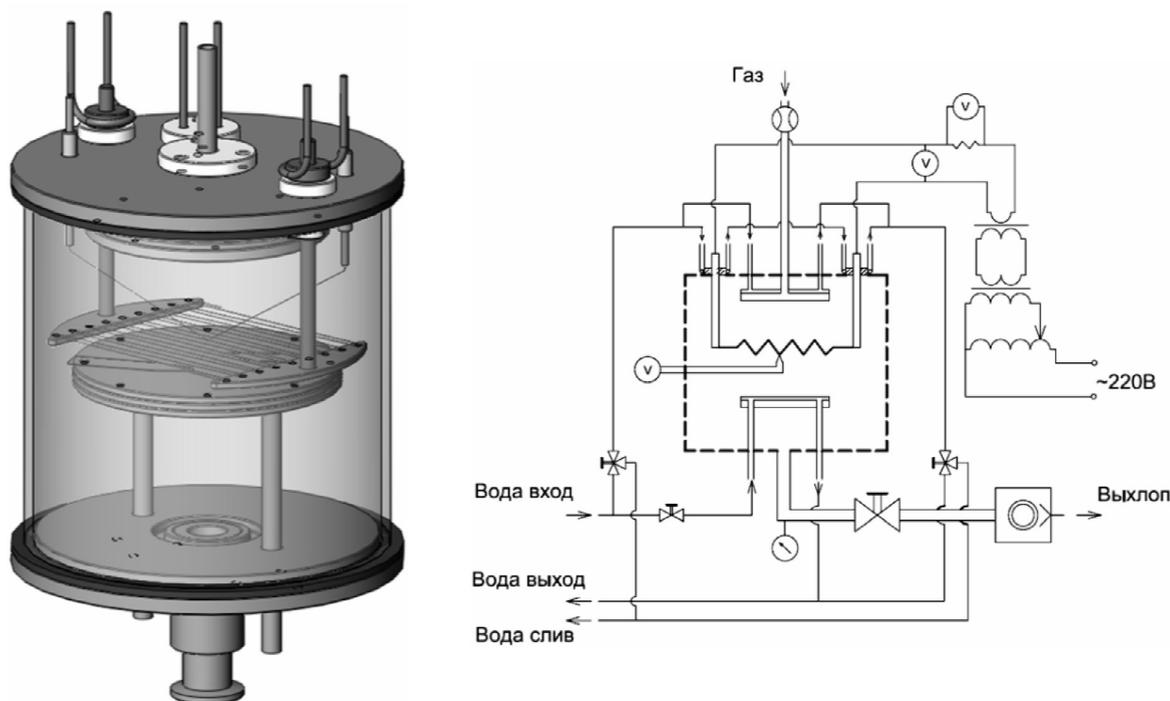
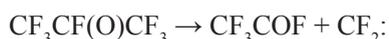
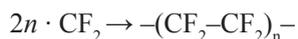


Рис. 1. Реактор ХОГФ пленок ПТФЭ и схематическое представление вакуумной, газовой систем, системы водоснабжения и электропитания

Реагент (окись гексафторпропилена) подавался через газораспределительное устройство, расположенное в верхней части реактора, проходил вниз сквозь массив накаливаемых вольфрамовых нитей и разлагался согласно реакции [7]:



Дифторкарбеновые радикалы CF_2 , увлекаемые потоком газа, далее достигали поверхности подложки, установленной на поверхности водоохлаждаемого пьедестала (подложкодержателя), полимеризуясь с образованием пленки ПТФЭ по механизму



Экспериментальный реактор выполнен в виде вертикального цилиндра с холодными кварцевыми стенками, на торцах которого смонтированы фланцы из нержавеющей стали. Вакуумно плотное соединение торцевых фланцев со стенками реактора осуществлялось при помощи прокладок, изготовленных из вакуумной резины. На верхнем фланце установлен ввод для подачи газа с закрепленным на нем водоохлаждаемым газораспределительным устройством, смонтированы водоохлаждаемые медные токовводы, выводы

сигнала термопары и вводы воды для охлаждения газораспределительного устройства. Водоохлаждаемый пьедестал смонтирован на нижнем торцевом фланце, на оси которого располагался патрубок подключения реактора к системе откачки. В реакторе реализована возможность перемещения газораспределительного устройства и пьедестала вдоль оси реактора для изменения расстояния между массивом накаливаемых нитей, пьедесталом и газораспределительным душем.

Подложки фиксировались двумя лепестками, что обеспечивало стабильный тепловой контакт с пьедесталом и не допускало перемещения подложки в течение эксперимента.

Массив резистивно нагреваемых вольфрамовых нитей установлен на держателях, расположенных на медных осях токовводов. Контроль температуры нитей осуществлялся с помощью хромель-алюмелевой термопары, закрепленной на выводах сигнала термопары, спай которой размещался непосредственно на поверхности центральной накаливаемой нити на равном удалении от ее краев.

Вакуумная система состояла из двухступенчатого пластинчато-роторного насоса и запорного клапана, допускающего плавную регулировку

проходного сечения. Расход реагента измерялся ротаметром. Рабочее давление в реакторе определялось вакуумметром Пирани, предварительно откалиброванным для работы с окисью гексафторпропиленом. Базовое давление перед началом процесса осаждения не превышало 1 Па, в процессе осаждения давление поддерживалось на уровне 20 Па при расходе реагента 19 мл/мин.

Состав пленок, осажденных на подложки из бромида калия, определялся методом просвечивающей ИК Фурье-спектроскопии (спектрометр ФСМ 1201). Данные усреднялись по двум измерениям (128 сканов каждое) с разрешением 1 см^{-1} и дважды сглаживались с окном 5 см^{-1} . Толщины пленок измерялись с помощью лазерного эллипсометра ЛЭФ-752 в режиме многоугловых измерений, морфология поверхности пленок определена на атомно-силовом микроскопе NT-MDT Solver P47H. Для этих целей пленки осаждались на подложки из кремния марки КЭФ-5 (111).

Результаты. Температурная зависимость скорости осаждения полученных пленок, представленная на рис. 2 а, имеет экспоненциальный характер. На основании этого вычислено значение кажущейся энергии активации процесса осаждения, которое составило 148,8 кДж/моль, что хорошо согласуется со значением 151,2 кДж/моль, соответствующим реакции распада окиси гексафторпропилена за счет многофотонного поглощения ИК излучения [8]. Такое хорошее совпадение позволяет предположить, что в исследованных условиях вольфрамовая нить накала в основном

играет роль источника ИК излучения, поглощение которого приводит к образованию радикалов CF_2 , участвующих в полимеризации ПТФЭ. Увеличение температуры нити приводит к росту излучаемой (и поглощаемой молекулами реагента) ИК мощности, что, в свою очередь, приводит к увеличению концентрации радикалов CF_2 и соответствующему росту скорости осаждения пленки.

Спектры ИК поглощения полученных пленок приведены на рис. 2 б. В целом, спектры соответствуют спектрам поглощения ПТФЭ, полученного методом классической свободнорадикальной полимеризации [9]. Наиболее четко выражены линии поглощения, соответствующие деформационным колебаниям: CF_2 группировки с максимумами при 511 и 555 см^{-1} ; CF_3 группировки с дублетом при $625/638 \text{ см}^{-1}$; а также полосы поглощения, соответствующие симметричным и ассиметричным валентным колебаниям CF_2 группировки с максимумами при 1155 и 1211 см^{-1} соответственно (расшифровка по [10]). Также было отмечено, что с увеличением температуры нити накала поглощение в области $3000\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$, соответствующее валентным колебаниям гидроксильных групп, усиливается (вставка на рис. 2 б).

Наличие гидроксильных групп в пленках, по всей видимости, может быть связано с тем, что при увеличении концентрации CF_2 радикалов в газовой фазе вблизи поверхности подложки за счет роста температуры нити накала, скорость процесса формирования зародышей молекул ПТФЭ увеличивается и начинает конкурировать

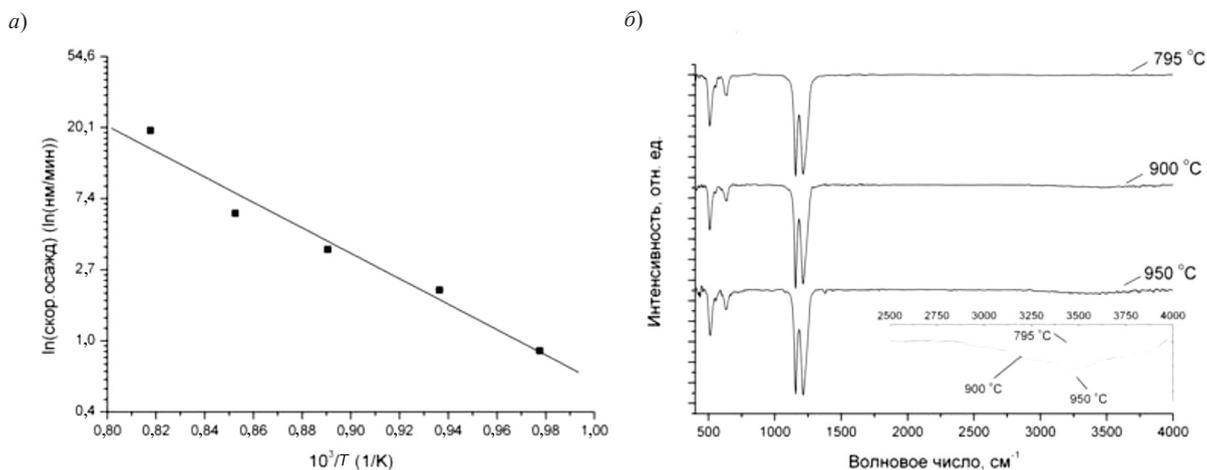


Рис. 2. Зависимости, выявленные в ходе проведения эксперимента: а – температурная зависимость скорости осаждения пленок; б – спектры ИК поглощения пленок, полученных при различных температурах накаленной нити

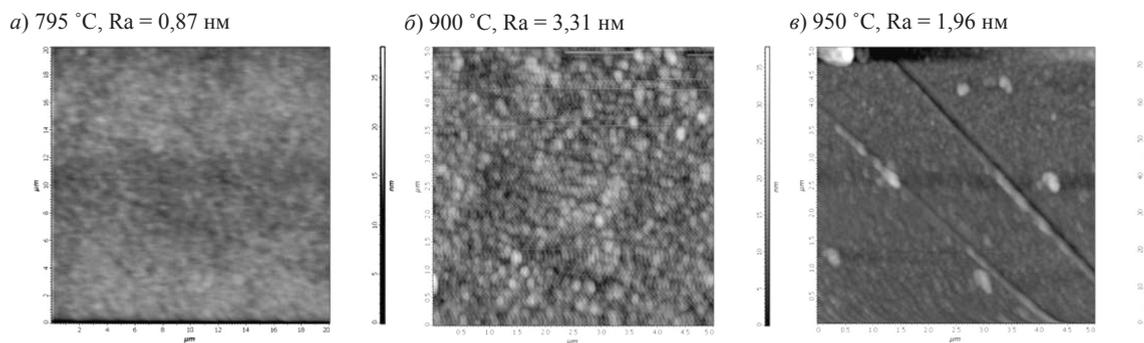
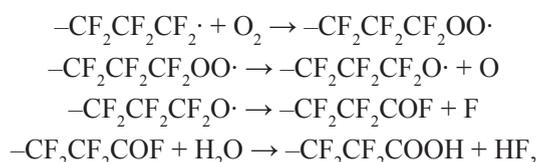


Рис. 3. Изображения поверхности пленок, осажденных при различных температурах нити накала, полученные методом атомно-силовой микроскопии

со скоростью процесса достройки полимерной цепи. Это приводит к тому, что количество коротких молекул с ненасыщенной связью на их концах увеличивается. После перемещения осажденной пленки в атмосфере воздуха, свободные связи насыщаются водой по механизму [10]:



что и наблюдается в спектрах ИК поглощения. Также этот факт может косвенно свидетельствовать об уменьшении средней длины полимерной цепи и снижении молекулярной массы осаждаемого полимера.

На рис. 3 представлены изображения поверхности пленок, полученные методом атомно-силовой микроскопии, отражающие морфологию поверхности. Было обнаружено, что кажущаяся пористость пленки растет в диапазоне температур нити 795 – 900 °С и уменьшается при дальнейшем увеличении температуры (до 950 °С). Такой характер можно объяснить следующим образом. При низкой температуре (795 °С), соответствующей невысокой концентрации CF_2 радикалов в газовой фазе, доминирует процесс достройки полимерных цепей, протекающий в плоскости подложки. По этой причине пленка имеет гладкую, нерыхлую поверхность. Длина полимерных цепочек в этом случае имеет наибольшее значение, что подтверждается видимым отсутствием ИК поглощения гидроксильными группами, шероховатость поверхности минимальна и равна 0,87 нм. При увеличении температуры нити (900 °С) концентрация CF_2 радикалов вблизи под-

ложки растет, процесс образования зародышей молекул ПТФЭ начинает конкурировать с процессом достройки цепи. Однако интенсивность зародышеобразования недостаточна для заполнения образующихся между молекулами полимера пустот. В результате формируется рыхлая (пористая) пленка, состоящая из молекул с относительно небольшой длиной цепи, шероховатость поверхности имеет наибольшее значение и равна 3,31 нм. Наличие существенного количества сравнительно коротких молекул подтверждается поглощением ИК излучения гидроксильными группами. Высокая температура нити накала (950 °С) обуславливает высокую концентрацию CF_2 радикалов в газовой фазе, что приводит к доминированию процесса формирования зародышей новых полимерных цепей на поверхности подложки. Плотность зародышеобразования такова, что больших пор не образуется. Получаемая при этом пленка гладкая, обладает сравнительно низкой пористостью, средняя длина молекулярной цепи мала, шероховатость поверхности составляет 1,96 нм. Подтверждением предположения о наименьшей длине полимерных цепей является наиболее интенсивное поглощение ИК излучения гидроксильными группами.

Анализ изображений поверхности пленки, полученных методом атомно-силовой микроскопии, свидетельствует о том, что при высокой температуре, равной 950 °С и соответствующей высокой концентрации CF_2 радикалов в газовой фазе, начинается протекание процесса гомогенной полимеризации, приводящего к синтезу порошков, оседающих на поверхность подложки. Таким образом, дальнейшее увеличение температуры нити накала в данных условиях нецелесообразно с точки зрения формирования однородной пленки.

В ходе проведения работы создано экспериментальное оборудование, позволяющее проводить исследование процесса ХОГФ пленок ПТФЭ. Получены предварительные экспериментальные данные, подтверждающие возможность формирования тонких пленок ПТФЭ в результате разложения окиси гексафторпропилена на накаливаемой вольфрамовой нити. Температурная зависимость скорости осаждения носит экспоненциальный характер. Значение кажущейся энергии активации процесса составляет 148,8 кДж/моль. Состав пленок, полученных при низкой температуре нити накала, спектроскопически неотличим

от ПТФЭ, полимеризованного традиционными способами, тогда как при высокой температуре накаленной нити пленки содержат гидроксильные группы. Пленки, сформированные при низкой температуре нити накала имеют наименьшую шероховатость, с ростом температуры шероховатость увеличивается, достигая наибольшего значения при 900 °С. При дальнейшем увеличении температуры шероховатость снижается, происходит процесс гомогенной полимеризации ПТФЭ в газовой фазе, приводящий к оседанию порошков на поверхность подложки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Паншин, Ю.А.** Фторопласты [Текст] / Ю.А. Паншин, С.Г. Малкевич, Ц.С. Дунаевская. –Л.:Химия, 1978. –232 С.
2. **Kim, W.J.** Dependence of Efficiency Improvement and Operating-Voltage Reduction of OLEDs on Thickness Variation in the PTFE Hole-Injection Layer [Текст] / W.J. Kim, Y.H. Lee, T.Y. Kim [et al.]// J. Korean. Phys. Soc. –2007. –№ 51. –P. 1007–1010.
3. **Pannemann, C.** PTFE-Encapsulation for Pentacene based organic Thin-Film Transistors [Текст]/C. Pannemann, T. Diekmann, U. Hilleringmann [et al] // Mat. Sci. –2007. –№ 25. –P. 95–101.
4. **Horch, K.W.** Neuroprosthetics: Theory and Practice [Текст]/ K.W. Horch, G. Dhillon. –Singapore: World Scientific Publishing, 2004. –1288 P.
5. **Limb, S.J.** Growth of Fluorocarbon Polymer Thin Films with High CF₂ Fractions and Low Dangling Bond Concentration by Thermal Chemical Vapor Deposition [Текст]/ S.J. Limb, C.B. Labelle, K.K. Gleason [et al.]// Appl. Phys. Lett. –1996. –№ 68. –P. 2810–2812.
6. **Uvarov, A.** Molecular Properties Characterization of PTFE Films Deposited by Hot Wire CVD [Текст]/A. Uvarov, K. Uemura, S. Alexandrov [et al.] // Proc. of X CMM . –2010. –P. 500–503.
7. **Brahms, D.L.S.** Fluorinated Carbenes [Текст] / D.L.S. Brahms, W.P. Dailey// Chem. Rev. –1996. –№ 96. –P. 1585–1632.
8. **Dunyakhin, V.A.** Decomposition of hexafluoropropylene oxide in a strong IR field [Текст] / V.A. Dunyakhin, O.V. Kuricheva, V.V. Timofeev [et al.] // Russian Chemical Bulletin. –1995. –№ 11. –P. 2079–2086.
9. **Купцов, А.Х.** Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров [Текст]/ А.Х. Купцов, Г.Н. Жижин. – М.:Физматлит, 1978. –656 с.
10. **Lau, K.K.S.** Structure and Morphology of Fluorocarbon Films Grown by Hot Filament Chemical Vapor Deposition [Текст]/K.K.S. Lau, J.A. Caulfield, K.K. Gleason// Chem. Mater.–2000. –№ 12. –P. 3032–3037.

УДК 544.43

В.С. Протопопова, С.Е. Александров

ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ СЛОЕВ Ni ИЗ БИС-(ЭТИЛЦИКЛОПЕНТАДИЕНИЛ) НИКЕЛЯ

Одно из перспективных направлений использования тонких пленок никеля – их применение в качестве каталитических слоев для синтеза углеродных наноструктур – нанотрубок [1] и графенов [2], а также в качестве активных магнитных слоев [3] в различных устройствах. Качество никелевых слоев (толщина слоя, равномерность и однородность по

площади и толщине, размер зерна, кристаллическая структура, морфология, состав и т. д.) определяет их магнитные свойства [4], а также размерные и структурные характеристики синтезируемых на них углеродных наноматериалов [1, 2].

Метод химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) позволяет получать высококаче-

ственные покрытия на поверхности большой площади и на изделиях сложной геометрической формы, включая микро- и нанопористые поверхности [5]. Металлоорганические соединения благодаря хорошей летучести и невысоким температурам разложения широко используются в качестве реагентов ХОГФ. В частности, для получения Ni слоев используют карбонилы, β-дикетонаты, ацетилацетонаты и бис-π-циклопентадиенильные соединения [3, 6–8]. Традиционно осаждение металлических слоев проводят в присутствии водорода [6, 8], поскольку добавка H₂ может серьезно влиять на механизм ХОГФ процесса.

Цель настоящей работы – экспериментальная проверка возможности использования бис-(этилциклопентадиенил) никеля (структурная формула на рис. 1) в качестве реагента для получения никелевых слоев.

Методика. Технологическая установка, используемая для получения слоев никеля ХОГФ методом, состояла из четырех блоков: реакторного, газовакуумной системы, системы электропитания, блока контроля и управления. Устройство газовакуумной системы и реакторного блока схематично показано на рис. 1.

Тип используемого реактора – горизонтальный с «горячими стенками». Конструктивно реакторный блок выполнен из кварцевой трубы (длиной 800 мм, внутренним диаметром 56 мм), герметизированной по торцам быстросъемными вакуумными фланцами. В зону осаждения реактора помещался пьедестал из пироуглерода с подложками. Нагрев осуществлялся при помощи осесимметричной цилиндрической электропечи.

Температура в зоне осаждения варьировалась в диапазоне от 570 до 880 К.

Реагент ЭЦПН подавался в реактор из внешнего испарителя с постоянной площадью испарения потоком газа-носителя аргона. Нагрев осуществлялся при помощи термостатируемой электропечи. Температура печи менялась от 345 до 370 К. Для предотвращения деградации ЭЦПН с кислородом и парами воды воздуха, реагент загружался в испаритель в боксе с сухой инертной атмосферой (аргона или азота). Перед загрузкой испарителя в реактор проводили взвешивание.

Осаждение слоев Ni проводили при пониженном давлении, общее давление в реакторе поддерживалось 850 Па. Рабочие газы подавались в реактор по трем распределительным магистралям с общим потоком 100 см³/мин. Расход аргона через испаритель составлял 50 см³/мин, расход водорода – 25 см³/мин.

Морфологию осажденного на подложки материала исследовали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) Supra 55 VP. Состав пленок анализировали при помощи рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на спектрометрах Спектроскан МАКС-GV (НПО «Спектрон») и XRF-1800 Shimadzu.

Для определения толщины получаемых слоев Ni предложена методика, основанная на измерении интенсивности характеристической линии элемента при рентгено-флуоресцентном анализе. Метод реализован на РФА спектрометре Спектроскан МАКС-GV. Измерения проводили в идентичных условиях, площадь облучаемой части образца была постоянной и контролировалась

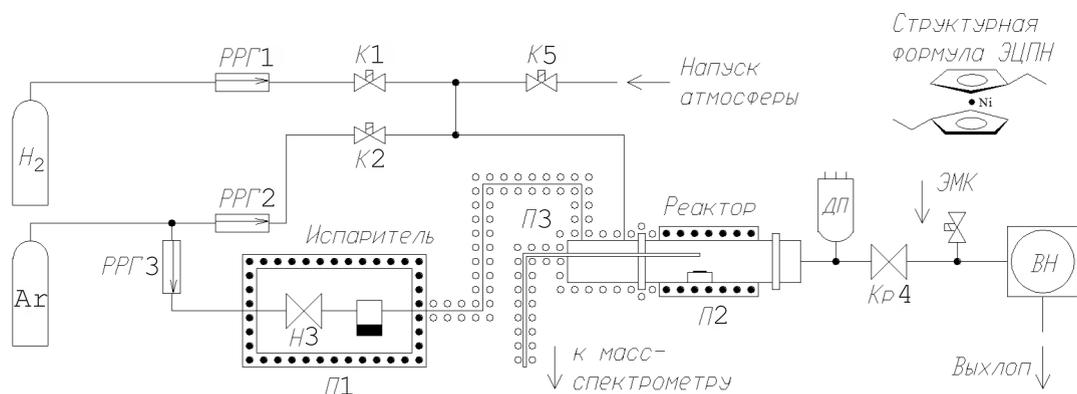


Рис. 1. Схема реакторного блока и газовакуумной системы

РРГ – регуляторы расхода газа; К – пневмоклапаны; Н – клапан-нагреватель; П – электропечи; Кр4 – кран-отсекатель; ВН – форвакуумный насос; ДП – датчик Пирани; ЭМК – электромагнитный клапан выпуска атмосферы в насос

по площади окна в оправке образца (радиусом 10 мм).

Для градуировки спектрометра были получены стандартные образцы на имеющейся технологической установке для ХОГФ синтеза. Толщина слоев измерялась по высоте ступеньки, полученной в результате механического удаления части пленки, при помощи атомно-силовой микроскопии (АСМ) на приборе Solver-PRO «НТ-МДТ».

Результаты. Необходимо отметить, что анализ литературных данных показал, что для некоторых бис-π-циклопентадиенильных соединений никеля, таких, как никелецен [7, 8] и бис-(метилциклопентадиенил) никеля [7], получены зависимости парциального давления пара от температуры. Известно, что ЭЦПН может быть использован как реагент для молекулярного наслаивания пленок NiO [9], однако сведения о его физико-химических свойствах носят фрагментарный характер. Поэтому на первом этапе работы было проведено исследование процесса испарения ЭЦПН в имеющейся технологической установке в смеси с аргоном.

Парциальное давление реагента определялось при помощи метода уноса [10] по изменению массы реагента, помещенного в испаритель. Количество испарившегося реагента регулировалось температурой испарителя и расходом газа-носителя (Ar).

На рис. 2 а представлен график зависимости парциального давления реагента ЭЦПН от температуры испарения. Как показывают полученные

результаты, парциальное давление реагента возрастало от 50 до 120 Па при увеличении температуры испарения от 345 до 370 К, при расходе газа-носителя 50 см³/мин. Уравнение, описывающее изменение парциального давления реагента от температуры испарения, в указанном диапазоне T имело следующий вид:

$$\ln P = 18,98 - 5,21 \cdot 1000/T, \quad (1)$$

где P – парциальное давление ЭЦПН, Па; T – температура испарения, К. Из уравнения (1) найдена энтальпия испарения реагента, которая составила $\Delta H_v = 43 \pm 1$ кДж·моль⁻¹. Для сравнения энтальпия испарения тетракарбонила никеля составляет $29,8 \pm 0,3$ кДж·моль⁻¹ [11], найденная для диапазона температур 293–313 К.

На рис. 2 б показаны графики зависимостей парциального давления реагента ЭЦПН и массы испарившегося вещества от расхода газа-носителя аргона.

Как следует из представленных данных, с увеличением расхода газа-носителя от 50 до 450 см³/мин парциальное давление ЭЦПН нелинейно уменьшается от 100 до 10 Па. Важно отметить, что масса испарившегося вещества не зависела от расхода аргона в пределах погрешности измерений массы, которая, вероятнее всего, обусловлена малыми колебаниями температуры испарителя, охлаждаемого газовым потоком. Таким образом, показано, что для достижения парциальных давлений ЭЦПН в интервале 10–120 Па, достаточном для реализации ХОГФ процесса,

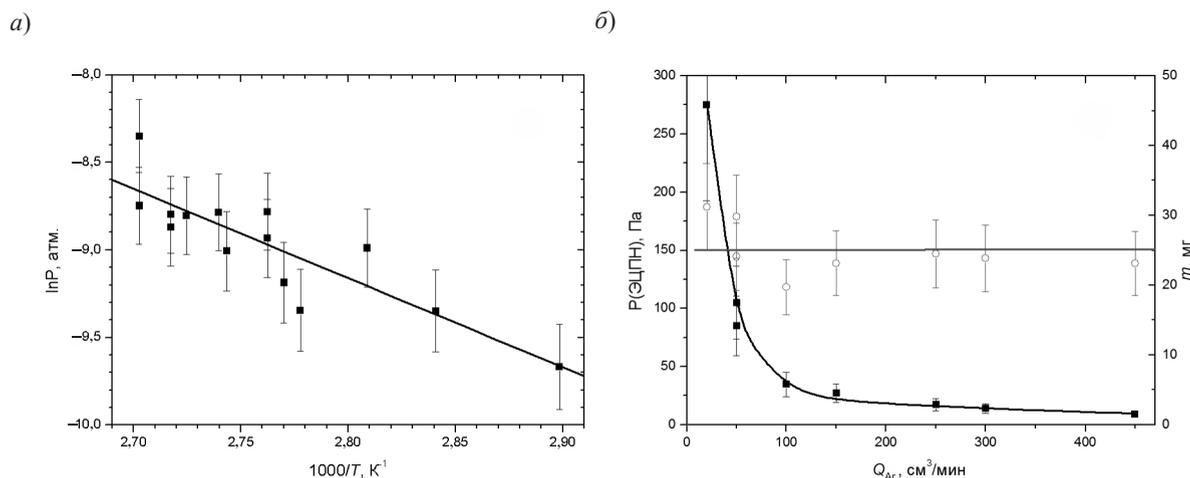


Рис. 2. График зависимостей парциального давления и массы испарившегося ЭЦПН от технологических параметров:

а – от температуры испарителя, при $Q(\text{Ar}) = 300$ см³/мин; б – от расхода газа-носителя Ar, при $Q(\text{Ar}) = 20\text{--}450$ см³/мин, $T_{\text{исп}} = 363$ К

требуются сравнительно высокие температуры: 345–370 К.

Важнейший технологический параметр, определяющий применение разрабатываемой ХОГФ технологии, – наименьшая температура, при которой возможно осаждение качественных пленок с приемлемыми скоростями. В связи с большой ролью водорода в процессах разложения бис-π-циклопентадиенильных соединений [6, 8], изучалось влияние температуры на скорость осаждения как при пиролизе ЭЦПН, так и в системе ЭЦПН–Н₂–Ag. Исследования проводились при следующих условиях: парциальное давление ЭЦПН варьировалось от 10 до 120 Па, общее давление в реакторе поддерживали постоянным – 850 Па, общий расход Ag составлял 100 см³/мин, а через испаритель – 50 см³/мин. В экспериментах с водородом поток водорода составлял 25 см³/мин.

Результаты экспериментов по определению температурного интервала осаждения слоев никеля представлены на рис. 3 а, в–д и в таблице.

Как следует из полученных данных, скорость осаждения пленок никеля в системах ЭЦПН–Ag и ЭЦПН–Н₂–Ag экспоненциально растет с температурой в исследованном интервале (рис. 3 а). Энергии активации процессов, найденные из графика зависимости скорости осаждения от температуры подложки, построенного в аррениусовских координатах, составили 152±2 Дж·моль⁻¹ и 149±2 Дж·моль⁻¹, соответственно, для системы с водородом и без него. Однако скорость осаждения пленок примерно в четыре раза больше при введении водорода в реакционную систему.

Рис. 3 б–г иллюстрируют изменение морфологии получаемых слоев в зависимости от температуры подложки. Как показали результаты РЭМ, размер зерен никеля с повышением температуры осаждения увеличивается. В случае процесса пиролиза ЭЦПН в аргоне размер зерен растет в диапазоне 10–50 нм, а для системы ЭЦПН–Н₂–Ag увеличивается от 12 до 120 нм. Интересно отметить, что пленки никеля, полученные в системе ЭЦПН–Н₂–Ag при температурах выше 770 К, были образованы крупными зернами, состоящими из более мелких частиц, размер которых практически не зависел от температуры и составлял 12–15 нм. Это свидетельствует о протекании процессов агломерации более мелких зерен, обнаруживаемом только в системе ЭЦПН–Н₂–Ag.

Результаты РФА анализа полученных слоев показали присутствие в них углерода в количестве 1,3–2 масс. %, причем в пределах погрешности анализа температура осаждения и состав реакционной системы не влиял на содержание углерода в пленках (см. табл.). Тогда как при использовании карбонила никеля в качестве реагента для ХОГФ, содержание углерода в слоях составляло 0,2–0,58 % [11].

Результаты экспериментов по исследованию влияния парциального давления реагента на скорость роста, морфологию и состав получаемых слоев представлены на рис. 3 б и в таблице.

Как видно из рисунка, скорость осаждения слоев никеля нелинейно зависит от парциального давления реагента во всем исследованном диапазоне. Хотя при парциальных давлениях ХОГФ выше 40 Па характер зависимостей близок к линейному в обеих реакционных системах ЭЦПН–Ag и ЭЦПН–Н₂–Ag.

Результаты исследования морфологии образующихся пленок указывают на увеличение размера зерен с ростом парциального давления реагента. Увеличение парциального давления реагента от 60 до 105 Па в системе ЭЦПН–Ag приводит к росту среднего диаметра зерен с 10 до 20 нм. Такая же тенденция наблюдалась и в системе ЭЦПН–Н₂–Ag. Однако из сравнения морфологии слоев, полученных при одинаковых условиях в системе с водородом и без него (рис. 3 з и е, соответственно), видно, что при добавлении водорода размер зерна увеличивается.

Как показывают результаты химического анализа осаждаемых слоев, парциальное давление ЭЦПН не влияло на количество углерода в пленках, концентрация которого находилась в интервале 1,3–1,7 масс. %.

Исследования показали, что ЭЦПН может быть использован в качестве реагента для ХОГФ получения слоев никеля. Парциальное давление реагента возрастало от 50 до 120 Па при увеличении температуры испарения от 345 до 370 К.

Никелевые пленки с небольшим содержанием углерода (до 2 масс. %) осаждались в диапазоне температур 720–870 К с приемлемыми для практического использования скоростями осаждения (до сотен нм/ч). При добавлении водорода в реакционную газовую смесь скорость осаждения увеличивается приблизительно в четыре раза.

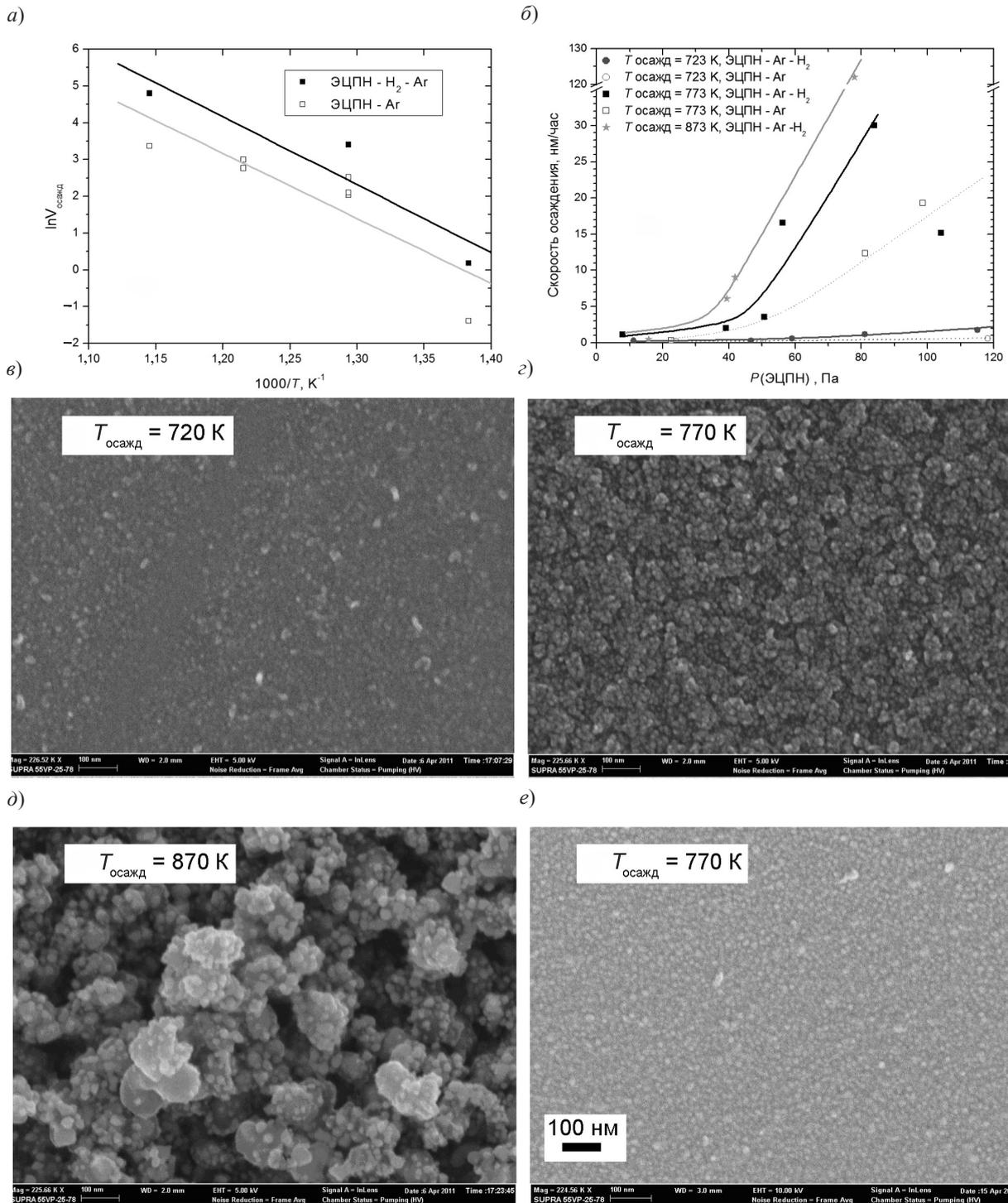


Рис. 3. Зависимости свойств осаждаемых слоев от технологических параметров:
 а – скорости осаждения от температуры подложки при $P(\text{ЭЦПН}) = 80$ Па; б – скорости осаждения от парциального давления ЭЦПН; в–е – морфологии получаемых слоев по снимкам РЭМ, при $P(\text{ЭЦПН}) = 80$ Па, для реакционных схем в–д – ЭЦПН– H_2 –Ar, е – ЭЦПН–Ar

Результаты АСМ и РФА анализа слоев Ni*

$T_{\text{осажд}}$, К	P (ЭЦПН), Па	Толщина, нм	Ni содерж., масс. %	Содерж. С, масс. %
ЭЦПН–H ₂ –Ar				
773	56	16	98,4	1,6
773	80	30	98,3	1,7
773	105	15,6	98,5	1,5
873	80	120	98	2
ЭЦПН–Ar				
773	80	13	98,7	1,3
773	105	20	98,6	1,4

* Условия эксперимента: $P_{\text{общ}} = 850$ Па, $Q_{\text{общ}} = 100$ см³/мин, $Q(\text{Ar}_{\text{исп}}) = 50$ см³/мин, $Q(\text{H}_2) = 25$ см³/мин.

Температура осаждения и парциальные давления реагента практически не сказываются на содер-

жании углерода в пленках, но заметно влияют на средний размер зерна в осаждаемых слоях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Choi, Y.C.** Effect of surface morphology of Ni thin film on the growth of aligned carbon nanotubes by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition [Текст] / Y.C. Choi, Y.M. Shin, S.C. Lim [et al.] // J. Appl. Phys.–2000.– Vol. 88(5). –P. 4898–4903.
- Pollard, A.J.** Formation of Monolayer Graphene by Annealing Sacrificial Nickel Thin Films [Текст] / A.J. Pollard, R.R. Nair, S.N. Sabki [et al.] //J. Phys. Chem. C Letters. –2009.– Vol. 113(38). –P. 16565–16567.
- Kim, Y.-G.** Fabricating magnetic Co-Ni-C thin-film alloys by organometallic the vapor deposition [Текст] / Y.-G. Kim, D. Byun, C. Hutchings [et al.] // J. Appl. Phys. –1991. –№ 70. –P. 6062–6064.
- Шалыгина, Е.Е.** Влияние отжига на магнитные и магнитооптические свойства пленок Ni [Текст] / Е.Е. Шалыгина, Л.В. Козловский, Н.М. Абросимова [и др.] //ФТТ–2005. –Vol. 47(4). –P. 660–665.
- Blackburn, J.M.** Deposition of conformal copper and nickel films from supercritical carbon dioxide [Текст]/ J.M. Blackburn, D.P. Long, A. Cabanas [et al.] //Science. –№ 294. –P. 141–145.
- Fraser, B.** Controlled Growth of Ni Particles on Si(100) [Текст]/ B. Fraser, A. Hampp, H.D. Kaesz// Chemistry of Materials. –1996. –№ 8. –P. 1858–1864.
- Ishikawa, M.** Ni Precursor for Chemical Vapor Deposition of NiSi [Текст]/ M. Ishikawa, T. Kada, H. Machida, [et al.] //Japanese J. of Applied Physics. –2004. –Vol. 43(4B). –P. 1833–1836.
- Brissonneau, L.** MOCVD-Processed Ni Films from Nickelocene. Part I: Growth Rate and Morphology [Текст] / L. Brissonneau, C. Vahlas//Chem. Vap. Deposition. –1999. –Vol. 5 (4). –P. 135–142.
- Lu, H.L.** Atomic Layer Deposition of NiO Films on Si(100) Using Cyclopentadienyl-Type Compounds and Ozone as Precursors [Текст] / H.L. Lu, G. Scarel, C. Wiemer [et al.] //J. of The Electrochemical Society. –2008. –Vol 155 (10). –P. H807–H811.
- Морачевский, А.Г.** Термодинамика расплавленных металлических и солевых систем [Текст] / А.Г. Морачевский. – М.: Metallurgy, 1987. –240 с.
- Разуваев, Г.А.** Металлоорганические соединения в электронике [Текст] / Г.А. Разуваев, Б.Г. Грибов, Г.А. Домрачев [и др.]. –М.: Наука, 1972. – 479 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПОПАРНОГО СРАВНЕНИЯ В ЗАДАЧЕ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ

Вопрос автоматизированного составления расписания занятий в некоторых вузах все еще остается открытым. Это объясняется многокритериальностью и многовариантностью задачи составления оптимального расписания. Методистам отдела учебного планирования вуза приходится сталкиваться с большим количеством ограничений по аудиторному фонду, времени, с приоритетами профессорско-преподавательского состава (ППС), человеческим фактором и оперативной модификацией расписания и т. п. Следовательно, из множества возможных вариантов размещения занятия в расписании необходимо выбрать наиболее подходящий [1] на начальном этапе автоматизированного составления расписания. Эту задачу предлагается решить при помощи попарного сравнения альтернатив по методу порогов сравнимости ЭЛЕКТРА (ELECTRE – Elimination Et Choix Traduisant la Realite – исключение и выбор, отражающие реальность) [2].

Пусть дано множество, состоящее из m критериев z_1, \dots, z_m с количественными шкалами оценок; множество номеров критерия обозначим $I = \{1, \dots, m\}$; веса критериев $\alpha_1, \dots, \alpha_m$; множество n альтернатив $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ с оценками по критериям $z_k = f_k(x_k), \dots, z_m = f_m(x_k), k = 1, \dots, n$. В качестве критериев в задаче составления расписания могут выступать приоритеты ППС, время переходов между аудиториями, вместимость аудиторий и их специализация.

Чтобы выбрать лучшую группу альтернатив размещения учебных занятий в расписании, на первом этапе производится сравнение всех имеющихся вариантов. Для пары альтернатив $x_a, x_b \in X$ по критериальным оценкам $f_1(x_a), \dots, f_m(x_a)$ и $f_1(x_b), \dots, f_m(x_b)$ вычисляются значения двух спе-

циальных индексов – согласия и несогласия. Они определяют согласие или несогласие с тем, что альтернатива $x_a \in X$ превосходит альтернативу $x_b \in X$.

Выдвигается гипотеза о превосходстве альтернативы x_a над альтернативой x_b . Множество номеров критерия $I = \{1, \dots, m\}$ разбивается на три подмножества:

$I^+(x_a, x_b) = \{i : f_i(x_a) > f_i(x_b)\}$ – подмножество критериев, по которым x_a предпочтительнее x_b ;

$I^\infty(x_a, x_b) = \{i : f_i(x_a) \propto f_i(x_b)\}$ – подмножество критериев, по которым x_a эквивалентно x_b ;

$I^-(x_a, x_b) = \{i : f_i(x_a) < f_i(x_b)\}$ – подмножество критериев, по которым x_b предпочтительнее x_a .

Вводим C_{x_a, x_b} – индекс согласия с гипотезой о превосходстве x_a над x_b и d_{x_a, x_b} – индекс несогласия с гипотезой о превосходстве x_a над x_b . Индекс согласия находим как отношение суммы весов критериев подмножеств $I^+(x_a, x_b)$ и $I^\infty(x_a, x_b)$ к общей сумме весов (1):

$$C_{x_a, x_b} = \frac{\sum_{i \in I^+(x_a, x_b) \cup I^\infty(x_a, x_b)} \alpha_i}{\sum_{i=1}^m \alpha_i}. \quad (1)$$

Индекс несогласия d_{x_a, x_b} определяем на основе учета относительных значений проигрышей альтернативы x_a альтернативе x_b . Для каждого критерия z_i из подмножества $i \in I^-(x_a, x_b)$ вычисляются разности значений критерия для альтернатив x_a, x_b . Полученное значение делится на длину шкалы этого критерия, затем в качестве индекса несогласия принимается наибольшее относительное значение:

$$d_{x_a, x_b} = \max_{i \in I^-(x_a, x_b)} \frac{|f_i(x_b) - f_i(x_a)|}{L_i}, \quad (2)$$

где L_i – длина шкалы по i -му критерию.

Из выражений (1) и (2) имеем свойства индексов согласия (3) и несогласия (4):

$$0 \leq d_{x_a x_b} \leq 1; \quad (3)$$

$$0 \leq C_{x_a x_b} \leq 1, \quad (4)$$

$C_{x_a x_b} = 1$, если подмножество $I(x_a, x_b)$ пусто; $C_{x_a x_b}$ сохраняет значение при замене одного критерия на несколько с тем же общим весом; $d_{x_a x_b}$ сохраняет значение при введении более детальной шкалы по i -му критерию при той же ее длине.

На втором этапе задаются уровни согласия и несогласия (пороговые значения), с которыми сравниваются значения вычисленных индексов для каждой пары альтернатив. Если индекс согласия выше заданного уровня, а индекс несогласия – ниже, то одна из альтернатив превосходит другую. Если $C_{x_a x_b} \geq C_1$ и $d_{x_a x_b} \geq d_1$, то альтернатива x_a объявляется лучшей по сравнению с альтернативой x_b , т. е. альтернатива x_a – доминирующая. В противном случае альтернативы несравнимы.

На третьем этапе из множества альтернатив удаляются доминирующие, а оставшиеся альтернативы образуют ядро (например, вначале принимают во внимание вместимость аудитории, а затем – ее специализацию). При этом альтернативы, входящие в ядро, могут быть эквивалентными или несравнимыми.

На четвертом этапе последовательно вводятся меньший по значению уровень согласия и больший уровень несогласия (более слабые пороговые значения), такие, что $C_{r+1} \leq C_r$ и $d_{r+1} \leq d_r$, $r = 2, 3, \dots$, при которых выделяются ядра с меньшим количеством альтернатив.

Процесс поиска лучших альтернатив останавливается, когда число альтернатив в ядре приемлемо для лица, принимающего решение (ЛПР) либо их количество меньше заранее заданного.

В последнее ядро входят наилучшие альтернативы, а последовательность ядер определяет упорядоченность альтернатив по качеству.

Таблица 1

Результаты оценивания альтернатив размещения учебного занятия

Альтернатива	Критерий		
	z_1	z_2	z_3
x_1	1	10	2
x_2	3	30	5
x_3	4	60	8
x_4	2	15	3

Например, пусть заданы альтернативы (варианты размещения занятия в расписании) x_1, x_2, x_3, x_4 , которые оценены по следующим критериям: z_1 – приоритет преподавателя (1 – «Проректор, декан», 2 – «Профессор», 3 – «Доцент», 4 – «Старший преподаватель, ассистент»), z_2 – время переходов между корпусами (мин), z_3 – количество занятых аудиторий одной кафедры. Результаты оценивания альтернатив размещения учебного занятия приведены в табл. 1.

Пусть веса критериев $\alpha_1=3$, $\alpha_2=2$, $\alpha_3=1$, а соответствующие длины шкал критериев $L_1=10$, $L_2=120$, $L_3=15$.

Вес критерия α_1 наибольший, поскольку при составлении расписания занятий в первую очередь необходимо учитывать приоритет профессорско-преподавательского состава, в частности, занятость проректоров, деканов и заведующих кафедрами [3].

В табл. 2 и 3 вычислены значения индексов согласия и несогласия альтернатив размещения учебного занятия из выражений (1) и (2) соответственно.

Зададим уровни согласия и несогласия, с которыми сравниваются вычисленные индексы для каждой пары альтернатив размещения учебного занятия: $C_1 \geq 0,83$ и $d_1 \leq 0,2$.

Таблица 2

Значения индексов согласия

Альтернатива	x_1	x_2	x_3	x_4
x_1	-	0,83	0,83	0,16
x_2	0,83	-	0,83	0,16
x_3	0,16	0,16	-	0,16
x_4	0,16	0,83	0,83	-

Таблица 3

Значения индексов несогласия

Альтернатива	x_1	x_2	x_3	x_4
x_1	-	0,2	0,4	0,06
x_2	0,2	-	0,2	0,125
x_3	0,416	0,25	-	0,375
x_4	0,416	0,13	0,33	-

Далее, из множества альтернатив удаляются доминирующие альтернативы. Вначале удаляется альтернатива x_3 , поскольку при попарном сравнении для всех альтернатив с индексом $C_1 \geq 0,83$ альтернатива x_3 является наименее предпочтительной. Кроме того, при сравнении индексов $d_1 \leq 0,2$ из табл. 3 определяется, что индексы несогласия у этой альтернативы самые высокие, т. е. она не подходит к гипотезе о предпочтении альтернатив. И действительно, по сведениям табл. 1 данная альтернатива самая слабая, т. к. у нее два критерия из трех возможных уступают остальным альтернативам (самый низкий приоритет ППС – «Старший преподаватель, ассистент», и максимально допустимое время переходов между корпусами – 60 мин). Аналогично удаляется альтернатива x_2 (приоритет ППС «Доцент», время перехода между корпусами – 30 мин). Оставшиеся альтернативы образуют первое ядро (табл. 4 и 5).

Таблица 4

Значения индексов согласия первого ядра альтернатив

Альтернатива	x_1	x_4
x_1	-	0,16
x_4	0,16	-

Таблица 5

Значения индексов несогласия первого ядра альтернатив

Альтернатива	x_1	x_4
x_1	-	0,06
x_4	0,416	-

На следующем этапе вводятся более «слабые» значения уровней согласия и несогласия: $C_1 \geq 0,16$ и $d_1 \leq 0,25$. Из табл. 4 можно сделать вывод, что альтернативы x_1 и x_4 несравнимы. Но, проанализировав значения индексов несогласия из табл. 5, можно определить, что альтернатива x_1 предпочтительнее альтернативы x_4 (по двум критериям из трех возможных). В последнее ядро входит наилучшая альтернатива x_1 (у нее наивысший приоритет ППС – «Проректор, декан» и минимальное время перехода (10 мин), а третий критерий занятости аудиторий уступает остальным альтернативам, однако необходимо учесть, что критерий z_3 имеет самый малый вес $\alpha_3=1$). Последовательность ядер определяет упорядоченность альтернатив по качеству: $x_1 \succ x_4 \succ x_2 \succ x_3$. Упорядоченные альтернативы представлены в табл. 6.

Таким образом, преимущество данной методики с использованием метода ЭЛЕКТРА состоит в том, что лицо, принимающее решение в задаче выбора наилучшего варианта размещения учебного занятия может поэтапно выделить предпочтения в процессе назначения уровней согласия и несогласия альтернатив. При использовании отношений несравнимости данная методика позволяет выделить пары альтернатив с противоречивыми оценками и остановиться на ядре, формирование которого достаточно обосновано с точки зрения имеющейся информации. Удаление наименее предпочтительных альтернатив дает возможность упорядочить имеющиеся варианты размещения информационных элементов учебного процесса по заданному приоритету при составлении расписания занятий вуза. Ценность использования предложенного метода заключается

Таблица 6

Упорядоченные по качеству альтернативы

Альтернатива	Критерий		
	z_1	z_2	z_3
x_1	1	10	2
x_4	2	15	3
x_2	3	30	5
x_3	4	60	8

в том, что лицо, принимающее решение, однажды заполнив базы данных приоритетов и весов критериев, может предоставить программному обе-

спечению выбирать подходящие варианты размещения учебных занятий в автоматизированной системе составления расписаний занятий вуза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Атрощенко, В.А.** Обобщенный критерий эффективности задачи принятия решений в системе составления расписаний занятий вуза: Статья [Текст] / В.А. Атрощенко, И.С. Семенюта. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. –С. 451–455.

2. **Рыков, А.С.** Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации: Мо-

нография [Текст] / А.С. Рыков. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2009. –С. 174–178.

3. **Атрощенко В.А.** К вопросу проектирования автоматизированной системы составления расписаний с учетом приоритетов заявок: Статья [Текст] / В.А. Атрощенко, И.С. Семенюта. –Одесса: Черноморье, 2010. – С. 55–58.

ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС СТУДЕНЧЕСКИХ НАУЧНЫХ РАБОТ



Министерство образования и науки ежегодно проводит открытый конкурс на лучшую научную работу по естественным, техническим и гуманитарным наукам среди студентов в высших учебных заведениях Российской Федерации.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет – ведущий вуз по направлениям 07 (Системный анализ, проектирование, управление и обработка информации) и 57 (Проблемы развития высшего образования).

В данном журнале публикуется две статьи победителей – участников конкурса 2008 года.

*Н.А. Карастелкина, студентка 5-го курса
Научный руководитель к.э.н., доцент Е.В. Жертовская
Таганрогский технологический институт
Южного федерального университета
Работа удостоена медали по направлению 07*

УДК 007:65.01

СТРАТЕГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНОГО ПОДХОДА

Стремительное развитие туризма в нашей стране, обусловленное многими факторами, в том числе отменой лицензирования деятельности туристских организаций, повлекло за собой невероятное усиление конкуренции. В этой связи, в последнее время особую важность принимают проблемы стратегического управления туристским предприятием в условиях формирующегося рынка туристских услуг [3].

Однако не существует стратегии, единой для всех компаний. Поэтому стратегический анализ – один из ключевых аналитических элементов стратегического управления, поскольку в зна-

чительной мере определяет стратегические возможности и выбор стратегии развития компании, позволяет частично снять неопределенность при принятии стратегических решений.

Стратегический анализ деятельности туристского предприятия на основе когнитивного подхода для планирования и разработки стратегического поведения туристского предприятия в современных условиях является инновационным инструментом, позволяющим разработать стратегию его дальнейшего развития.

Для проведения стратегического анализа туристского предприятия осуществлен сбор не-

обходимой информации, в совокупности характеризующей его состояние, выявлены внешние и внутренние факторы, влияющие на его формирование и перспективное развитие. Систематизация полученной информации позволяет провести комплексную оценку потенциала туристского предприятия и анализ системы управления этим потенциалом.

Проведен анализ внешних и внутренних факторов, влияющих на формирование и перспективное развитие туристского предприятия [2]. Для того чтобы сделать выводы о том, на ка-

кие факторы способно оказать продуктивное влияние импульсное воздействие на состояние предприятия, с помощью программного обеспечения разработана *программная система когнитивного моделирования*, построена когнитивная карта взаимодействия туристского предприятия (рис. 1).

На основе когнитивной карты, приведенной на рис. 1, разработана когнитивная модель ситуации и когнитивная карта взаимодействия туристского предприятия с внешней средой, а на ее основе – когнитивная модель взаимодействия

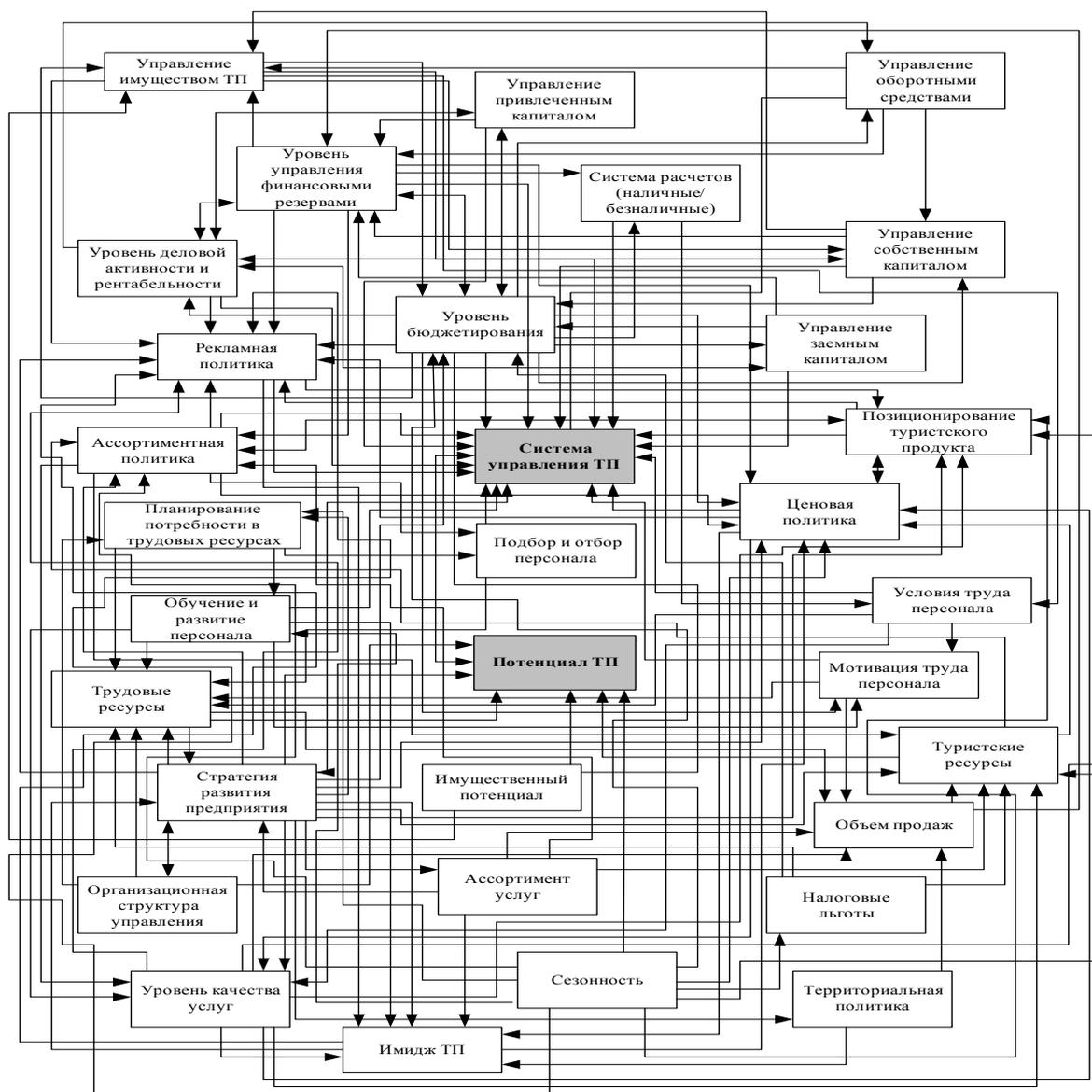


Рис. 1. Когнитивная карта «Взаимодействие факторов внешней среды»

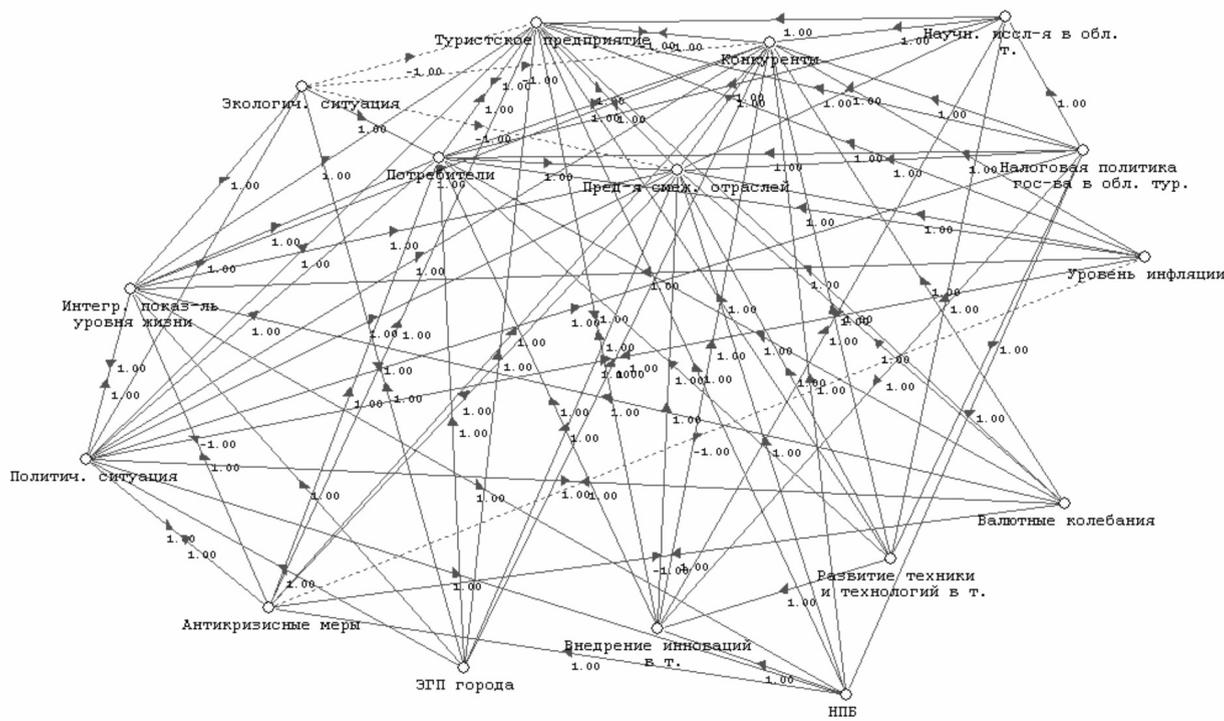


Рис. 2. Когнитивная модель взаимодействия туристского предприятия с внешней средой

туристского предприятия с внешней средой, показанная на рис. 2.

Когнитивные карты и модели отражают влияние наиболее важных факторов и возможных взаимосвязей между ними. Причем состояние самого предприятия ясно просматривается через призму системы внутренних факторов, а комплексные взаимосвязи – через влияние внешних факторов на туристское предприятие.

Разработанная когнитивная модель (рис. 2) позволяет использовать технологию когнитивного анализа для исследования взаимовлияния факторов. Для математического описания модели строятся соответствующие ей матрицы смежности, а затем с помощью программной системы когнитивного моделирования (ПС КМ) проводятся основные этапы когнитивного анализа.

Формирование списка приоритетных проблем развития туристского предприятия – основа для проведения стратегического анализа его деятельности. Именно выявление проблем позволяет выработать механизмы и стратегию их ликвидации.

Практически все проблемы возникают вследствие отсутствия комплексного подхода к стратегическому развитию предприятия и системе

управления туристским предприятием (отсутствие системного подхода): отсутствия действенной стратегической политики и механизма ее реализации [4].

Когнитивный подход предусматривает проведение сценарных исследований на основе проверки модели взаимодействия туристского предприятия и его внутренних и внешних факторов [1].

Рассматривается сценарий развития туристского предприятия без наличия (влияния) стратегии развития, что позволяет получить обоснование необходимости разработки Концепции стратегического поведения туристского предприятия на определенном этапе моделирования и подтверждает непротиворечивость связей в анализируемой модели.

Формирование сценариев, моделирующих основные управленческие воздействия (разработка которых производится на основании ранее выявленных приоритетных проблем развития туристского предприятия по результатам SWOT-анализа), осуществляется по подготовленному протоколу моделирования. В протоколе последовательно задаются активизирующие вершины, в которые вносятся векторы управляющих воздействий.

Все сценарии, полученные в результате анализа, могут служить альтернативами для стратегического управления дальнейшим развитием туристского предприятия. Для выбора рационального варианта стратегического поведения следует воспользоваться моделью типа платежной матрицы [5].

Целесообразно также использовать такое правило оценки математического ожидания полезности выбранной стратегии, как принцип максимизации математического ожидания полезности – принцип принятия рациональных решений.

Таким образом, опора на результаты исследования возможного развития туристского предприятия позволяет выбрать какую-либо одну конкретную стратегию, т. е. разработать концепцию

стратегического поведения туристского предприятия на основе импульсного воздействия по таким конкретным направлениям, как, например, «территориальная политика», «антикризисные меры», «условия труда персонала» и «позиционирование туристского продукта» [5].

На основе стратегического анализа деятельности туристского предприятия с помощью когнитивного подхода можно сделать вывод о том, что эффективность функционирования предприятия может быть достигнута путем реализации разработанной Концепции стратегического поведения. Именно эти основные моменты в системе функционирования предприятия являются рычагами, воздействуя на которые можно добиться осуществления поставленных руководством целей и достижения желаемых результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горелова, Г.В.** Когнитивный анализ и моделирование устойчивого развития социально-экономических систем [Текст] / Г.В. Горелова, Е.Н. Захарова, Л.А. Гинис. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 2005. – 288 с.
2. **Жертовская, Е.В.** Разработка комплексной методики выбора и принятия управленческих решений в области развития туристского комплекса в социально-экономической системе: Дис. ... канд. эк. наук [Текст] / Е.В. Жертовская. – Ростов-на-Дону, 2007. – 27 с.

3. **Моисеева, Н.К.** Стратегическое управление туристской фирмой [Текст] / Н.К. Моисеева. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 208 с.
4. Планирование на предприятии туризма: Учеб. пособие [Текст] / Под ред. Е.И. Богданова. – СПб.: Бизнес-пресс, 2003. – 288 с.
5. **Пьявченко, О.Н.** Методы и алгоритмы моделирования развития сложных ситуаций [Текст] / О.Н. Пьявченко, Г.В. Горелова, А.В. Боженок [и др.]. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 157с.

*Г.С. Ежевская, студентка 5-го курса
Научный руководитель д.т.н., профессор А.А. Денисов
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Работа удостоена медали по направлению 07*

УДК 303.052

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫМ ОБРАЗОВАНИЕМ

1. Определение информационных потребностей лица, принимающего решение (ЛПР)

Понятие о необходимой информации можно получить, основываясь на структуре целей и функций объекта, вычленив те из них, которые

глава администрации (руководитель) возлагает на себя. Очевидно, что все задачи руководитель выполнять не может, поэтому часть функций он перекладывает на своих подчиненных: начальников отделов, ответственных секретарей, начальников ЖЭУ района, директоров школ и т. д.

Определим круг обязанностей аппарата муниципальной администрации: 1. Обеспечение жильем населения. 2. Обеспечение района медицинскими объектами всех уровней (поликлиники, роддома, больницы, хосписы, отделения скорой и неотложной помощи). 3. Ремонт старого и введение в эксплуатацию нового дорожного покрытия. 4. Обеспечение района транспортом. 5. Создание торговых точек. 6. Контроль налогообложения. 7. Обеспечение района объектами образования всех уровней (детские сады, школы, средне-специальные и высшие учебные заведения). 8. Строительство религиозных зданий в соответствии с составом населения. 9. Строительство судебных и иных правовых объектов. 10. Обеспечение района силовыми органами и органами правопорядка. 11. Строительство музеев, библиотек, театров. 12. Обеспечение спортплощадками, стадионами, бассейнами и иными спортивными сооружениями. 13. Обеспечение армии кадрами. 14. Создание рекреационных и парковых зон.

Очевидно, что все эти задачи очень удачно вписываются в методику Акоффа–Эмери – Изобилие, Правда, Добро, Красота [1]. Представим в виде схемы задачи РУ (рис. 1): Экономика и Политика (1–6, 13), Образование (7, 8), Право и Разрешение конфликтов (9, 10), Культура (11, 12, 14).

Таким образом, обозначив круг вопросов, возложенных на районную администрацию (РА), можно судить о ее информационных потребностях.

Очевидно, что информацию по столь обширному кругу задач РА не может искать и анализировать самостоятельно. Поэтому определим полноту и достаточность этой информации.

2. Определение информационных потоков

Для принятия решения по всем функциям, отмеченным в первой главе, необходимо иметь достаточно большой объем информации и хорошо в нем ориентироваться. Учитывая постоянное увеличение количества материала и данных, задача по их обработке одним ведомством становится практически нереальной [2]. Поэтому действует ряд подчиненных, которые помогают главе администрации в определении приоритетов в развитии объекта, а также в сборе и анализе информации (нижняя часть рис. 2).

Функции каждого из них достаточно своеобразны, но иногда пересекаются. Поэтому при проектировании системы следует учесть и тот факт, что работы одного из них могут основываться на предыдущих результатах других.

Сопоставим информационные потоки от этих ведомств с перечнем задач, которые с помощью предоставляемой ими информации предстоит решить управляющему объектом, а затем сформулировать, какой информации не хватает, а какая – лишняя. Необходимо также отметить, что под информационными потребностями понимается не буквально вся необходимая или интересная ЛПР информация, а только достаточная для принятия управленческих решений (рис. 2).

Как видно на рисунке, подчиненные ведомства предоставляют информацию не только по выбранному администратором направлениям, но и по более крупным направлениям функционирования объекта. Это означает, что получаемую от них информацию следует переправлять другим органам власти для более эффективного использования.

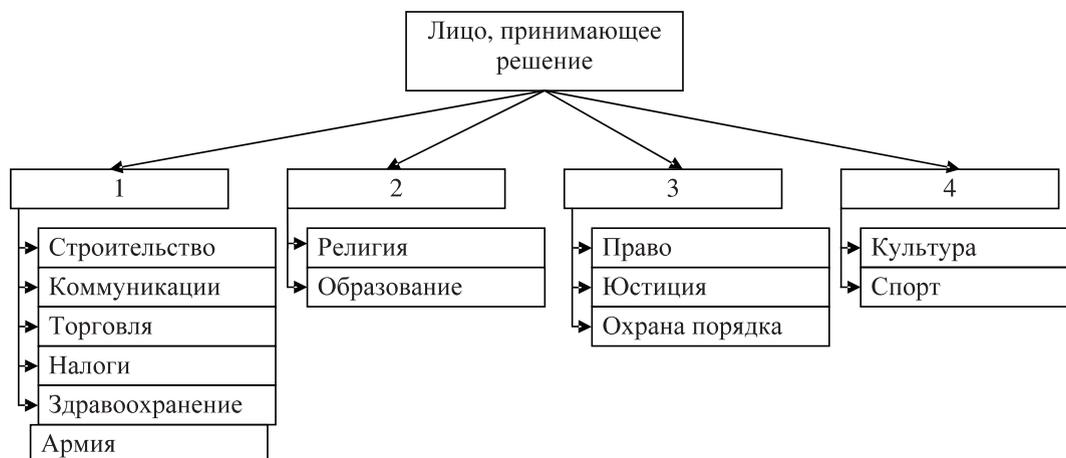


Рис. 1. Информационные потребности ЛПР

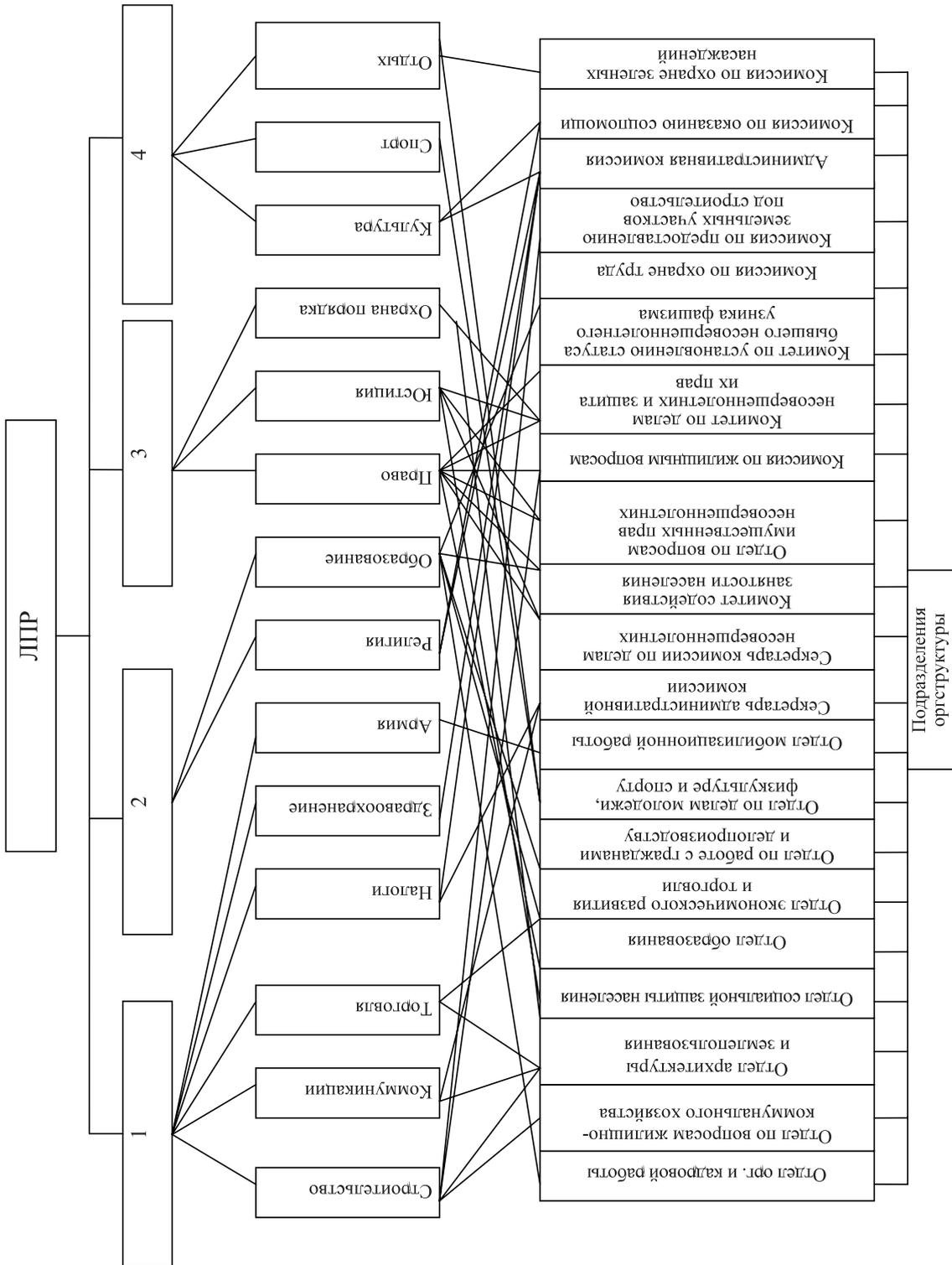


Рис. 2. Принятие управленческих решений

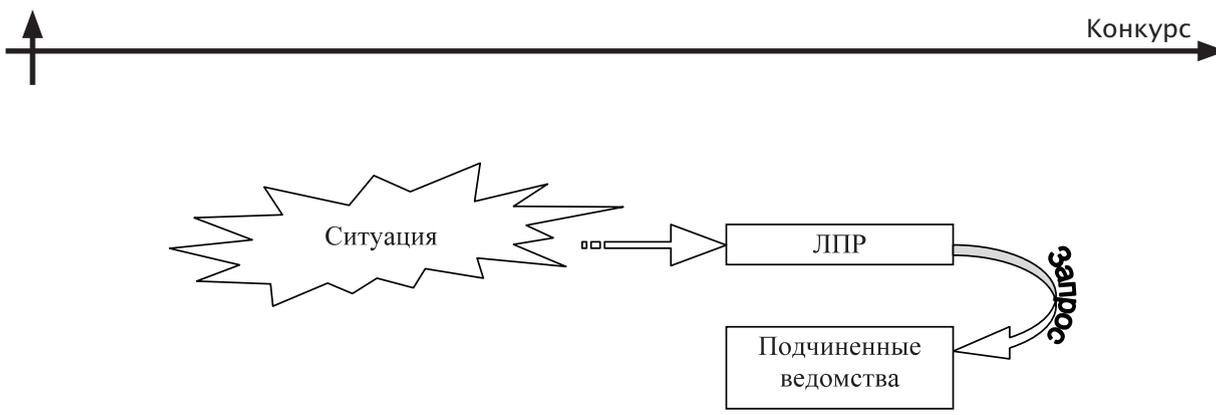


Рис. 3. Инициирование запросов

Следует также отметить, что необходимы некоторые дополнительные потоки информации, т. к. нельзя принимать столь важные решения без соответствующей информационной базы. Стоит учитывать и зарубежный опыт.

Однако существенным недостатком такого метода получения информации является ее вторичность. Администратору предоставляется только обработанная информация, а источник первичной информации и метод анализа остается неизвестным. В связи с этим необходимо включить в информационный массив и источник первичной информации. Эта первичная информация может представлять собой как научно-технические данные (новые открытия, современная техника), так и статистические (количественные) [3].

Такую первичную информацию могут предоставлять как непосредственные ее обработчики (эксперты различных комиссий и начальники отделов), так и источники формирования этой информации: Росстат, различные исследовательские и научные центры, НИИ.

После составления данной схемы можно определить, что некоторая информация, необходимая для принятия управленческих решений, либо уже обработана, либо использовалась ранее. Поэтому логичный шаг на пути создания эффективной информационной системы – включение в ее структуру некой базы документов, в которой будут храниться результаты предыдущих изысканий. Условно назовем ее *Базой Знаний*.

Стоит отметить, что любая крупная организация, а тем более государство, не может бездействовать, пока руководство будет принимать решения, особенно, если это связано с какими-либо коренными изменениями. Поэтому необходимо включить в структуру системы блок *Контрольной информации*, на основании которой можно вносить коррективы в текущее планирование. Такой подход можно использовать при переходе от частного к общему.

3. Структура информационной системы

При проектировании полноценной информационной системы для принятия управленческих решений следует принять во внимание, что круг проблем государства крайне широк, но не бесконечен. В связи с этим в процессе управления могут и будут появляться ситуации, аналогичные случавшимся ранее, а, возможно, и идентичные. Поэтому не стоит пренебрегать накопленным опытом, нужно его использовать и собирать новый [4]. Для этого следует создать некую Базу Знаний, которая будет служить хранилищем для результатов деятельности органов власти и самого главы администрации.

Так как, в основном, запросы инициируются главой районной администрации, то получится следующая схема (рис. 3).

Под ситуацией в данном случае понимается любое возможное экономическое, политическое или социальное изменение в районе.

Поскольку нашу информационную систему можно внедрять на всех уровнях, сбор данных для Базы Знаний будет происходить быстрее. При появлении некой проблемы логичным решением будет обращение к Базе Знаний и проверка ситуации на совпадения (рис. 4).

Если совпадение найдено, то результат передается экспертам, которые в свою очередь подстраивают ситуацию под исследуемую и выдают некоторое экспертное решение, но без отрыва от теоретических знаний и понятий, т. к. будет ис-

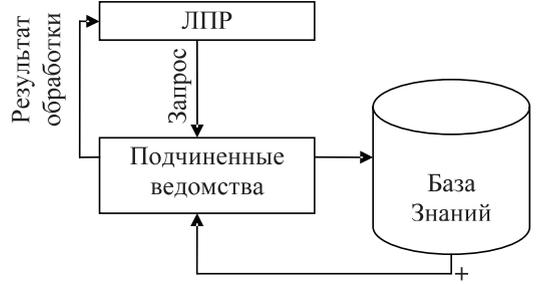


Рис. 4. Обращение к Базе Знаний

следоваться и обрабатываться огромный массив данных, и необходима полноценная поисковая система [5].

Для того чтобы эта часть системы полноценно работала, необходимо ввести некоторые ограничения. Например, унифицировать документы: все поступающие и выдаваемые документы должны быть *одинаковой формы*. Первым определяющим фактором в описании документа должна быть *тематика*, а также *ключевые слова*, по которым данный документ можно будет отличить от всех остальных. Следует также учитывать *уровень*, с которого поступил документ (регион, область и т. д.). Во избежание проблем с пониманием текста конечным пользователем каждая статья должна быть снабжена *теоретической справкой*, либо ссылкой на раздел теории.

Таким образом, этот блок можно охарактеризовать следующим образом:

- 1) по источнику инициативы – по запросам пользователя;
- 2) по периодичности или срочности – ретроспективный поиск;
- 3) по способу доведения документов до потребителя – непосредственная передача документов;
- 4) по назначению, цели – практическое использование.

Однако чаще будут возникать ситуации, которые не случались ранее. В этом случае по инициативе ЛПР будет формулироваться некоторая проблема. Данный запрос будет направляться в соответствующее ведомство. Затем эксперты этого ведомства будут анализировать запрос ЛПР, искать необходимую первичную информацию, (будь то научно-техническая или статистическая информация), проводить анализ и выдавать некий результат, который в свою очередь заносится в Базу Знаний (рис. 5).

Основываясь на этих экспертных и первичных данных, ЛПР принимает свое решение, которое не противоречит Конституции и федеральным законам, и направляет его на рассмотрение администрации.

На данном этапе проблем у конечного пользователя с пониманием темы возникать не должно, т. к. к каждому результату изысканий экспертов прикрепляется ссылка на теоретический материал, который по запросу может быть предоставлен для изучения.

Если рассматривать этот блок с точки зрения конечного пользователя, то его характеристики таковы:

- 1) по источнику инициативы – по запросам пользователя;
- 2) по периодичности или срочности – текущее оповещение;
- 3) по способу доведения документов до потребителя – непосредственная передача документов;
- 4) по назначению, цели – ознакомление.

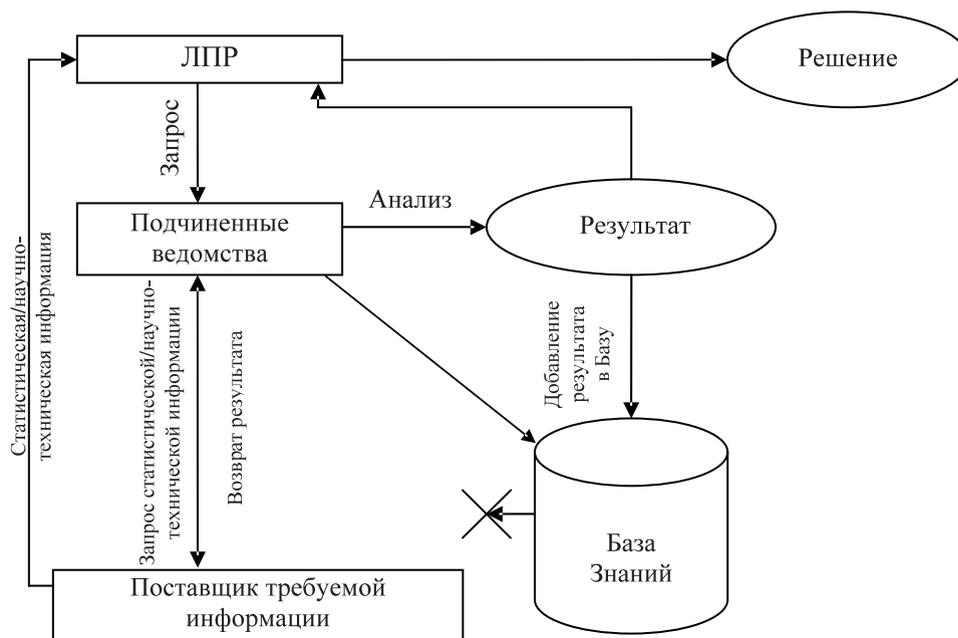


Рис. 5. Занесение результатов в Базу Знаний

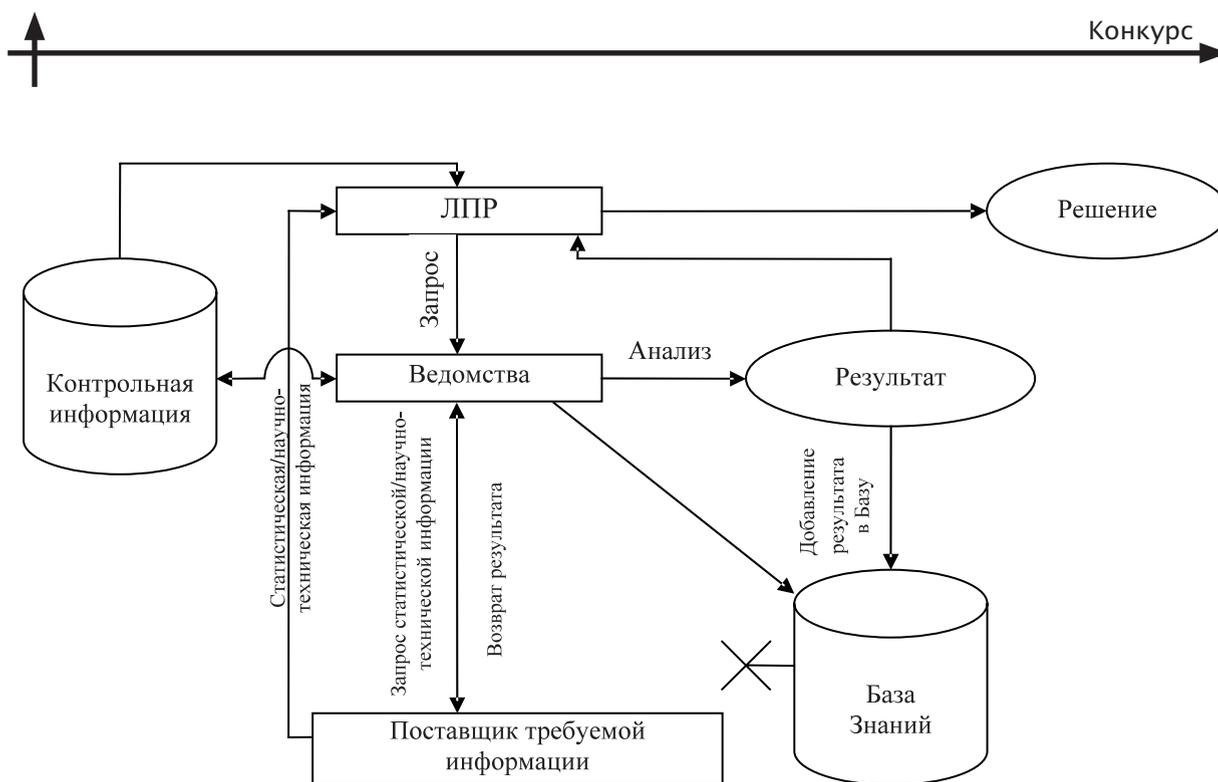


Рис. 6. Формирование решения

Однако с точки зрения экспертов характеристика блока выглядит несколько иначе:

- 1) по источнику инициативы – по запросам пользователя;
- 2) по периодичности или срочности – ретроспективный поиск;
- 3) по способу доведения документов до потребителя – двухступенчатое обслуживание;
- 4) по назначению, цели – практическое использование.

Возникает проблема контроля исполнения решения, а также проблема контроля эффективности. Так как одна из задач администратора – создание эффективного объекта управления, контроль за результатами деятельности является неотъемлемой частью деятельности аппарата управления. Для этого необходимо ввести еще один информационный массив Контрольной информации. В нем будет скапливаться информация по результатам исполнения решений, принятых в той или иной ситуации. Вся информация этого массива может использоваться как для инициации нового запроса экспертам, так и самими экспертами для определения результатов и оценки эффективности предыдущих нововведений.

В данном случае форма документа также имеет значение, т. к., например, читать пространственный текст не всегда удобно и малоинформативно. Поэтому структура документа должна иметь строгую форму:

- область применения;
- характер нововведения;
- потраченные средства.

С учетом изменений, к которым это приведет, характеристики следующие (рис. 6):

- по источнику инициативы – по запросам пользователя;
- по периодичности или срочности – текущее оповещение;
- по способу доведения документов до потребителя – непосредственная передача документов;
- по назначению, цели – практическое использование (планирование).

Благодаря такой структуре информационной системы получаем следующие преимущества:

простоту инициации запросов со стороны лица, принимающего управленческие решения – для начала процесса решения необходим лишь выбор области жизни объекта, в которой возникает ситуация;

понятность получаемой информации, благодаря неразрывной связи теоретической и экспертной информации – пользователь не должен обладать некими специфическими знаниями для интерпретации полученных результатов, поскольку вся необходимая теоретическая часть будет приложена к выходному документу;

все накопленные результаты предыдущих изы-

сканий доступны, что в совокупности с удобным поисковым механизмом и грамотным запросом ускорит получение результата;

возможность многоуровневого контроля испол-

нения решений и указов – при наличии базы контрольной информации можно получить результаты по интересующему вопросу как самостоятельно, так и прибегнув к помощи экспертов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акофф, Р.** О целеустремленных системах [Текст] / Р. Акофф, Ф. Эмери. – М.: Сов. радио, 1974. – 272 с.

2. **Волкова, В.Н.** Основы теории систем и системного анализа: Учебник для студентов вузов [Текст] / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. – 520 с.

3. **Волкова, В.Н.** Применение системного анализа при управлении созданием и развитием предприятий

и организаций [Текст] / В.Н. Волкова, А.В. Кукушкин, С.В. Широкова. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2004. – 51 с.

4. **Волкова, В.Н.** Проектирование информационных систем [Текст] / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. – 43 с.

5. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник [Текст] / Под ред. В.Н. Волковой и В.Н. Козлова. – М.: Высш. шк., 2004. – 616 с.



Конференция «Технологии Microsoft в теории и практике программирования»

Начиная с 2004 года факультет технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета проводит конференцию студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада «Технологии Microsoft в теории и практике программирования». Цели конференции – подготовка участников к будущей работе в профессиональных программистских коллективах, создающих программный продукт высокого качества, поддержка изучения современных информационных технологий и инструментальных средств в соответствии с мировыми стандартами и действующими международными сертификационными требованиями, а также выявление талантливых молодых специалистов в области разработки и использования программных систем.

Особенность конференции заключается в том, что участник должен проявить свои знания и умения не столько в области программирования различных математических головоломок, сколько в области разработки и использования программных продуктов и систем в условиях, максимально приближенных к реальным процессам проектирования и разработки современных систем различной степени сложности.

Конференция проводится в три этапа: на первом отбираются и ревьюируются работы участников, присылающих короткие статьи – заявки на участие. На их основе отбираются приглашенные докладчики на второй этап. Присланные статьи публикуются в сборнике материалов конференции. Второй этап проходит в виде докладов и демонстраций на секциях.

Результатом является отбор 10–12 докладов на третий этап. Все участники секционных презентаций награждаются дипломами третьей степени. Отобранные участники разыгрывают дипломы первой и второй степени. Решение о премировании участников конкурса принимает конкурсная комиссия, в которую входят руководители секций и представители организаций спонсоров.

С 2004 по 2010 год спонсором конференции была всемирно известная компания Microsoft.

Для проведения конференции в 2011 году объединили усилия Центр инноваций Microsoft и факультет технической кибернетики СПбГПУ.

В данном журнале публикуется четыре статьи победителей – участников конференции 2011 года. Публикуемые работы отличает инновационный характер, ориентация на реализацию полученных результатов, широкое применение технологий MS при создании программного обеспечения и документации.

Декан ФТК, профессор,
доктор технических наук

И.Г. Черноруцкий

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АСПЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

Аспектнo-ориентированное программирование (АОП) [1, 2] – перспективный подход к разработке программ, предлагающий средства для модуляризации сквозной функциональности и ее автоматизированного добавления в целевую программу. АОП расширяет традиционную концепцию модуля по Г. Майерсу [3] понятием *аспект* (aspect). Аспект – это специальный модуль, содержащий фрагменты кода сквозной функциональности, активируемые в заданных точках целевой программы.

Aspect.NET [4] – языково-независимая среда разработки АОП-приложений для платформы Microsoft.NET. Aspect.NET является расширением (add-in) популярной интегрированной среды разработки Microsoft Visual Studio. Это означает, что разработчики могут использовать Aspect.NET как часть Visual Studio, с ее многочисленными возможностями для разработки программного обеспечения (сборка, отладка, профилирование и др.). Аспект в системе Aspect.NET определяется как исходный код класса, аннотированный конструкциями метаязыка Aspect.NET.ML. Структура метаязыка Aspect.NET.ML и его семантика не привязаны к конкретному языку реализации, что позволяет использовать одни и те же спецификации аспектов на Aspect.NET.ML в сочетании с различными языками их реализации. Подобная языковая независимость метаязыка АОП – важный принцип Aspect.NET. Вставка кода действий аспекта выполняется автоматически подсистемой внедрения аспектов (weaving). Aspect.NET использует статическое внедрение на уровне промежуточного языка платформы .NET MSIL (Microsoft Intermediate Language), благодаря чему достигается высокая производительность результирующего приложения.

Цель данной работы – исследование вариантов практического применения АОП при разработке программных систем, а также демонстрация использования аспектно-ориентированного подхода как при решении сугубо прикладных задач

в коммерческих проектах, так и для реализации классических методологий программирования. В частности, в статье рассматривается проблема управления сквозной функциональностью в приложениях для Microsoft BizTalk Server, а также применение АОП и системы Aspect.NET для поддержки технологии контрактного проектирования (Design-by-Contract) в .NET-приложениях.

Применение методов АОП в приложениях для Microsoft BizTalk Server. MS BizTalk Server [5] – программный продукт корпорации Microsoft, предназначенный для решения задач комплексной автоматизации бизнес-процессов и интеграции разнородных систем. Приложения для Microsoft BizTalk Server, как правило, представляют собой достаточно сложную конструкцию из взаимосвязанных модулей – артефактов BizTalk, собственных вспомогательных библиотек с кодом, библиотек сторонних разработчиков и т. д. Эти особенности приложений для Microsoft BizTalk Server неизбежно поднимают проблему управления сквозной функциональностью. Данная проблема усугубляется тем, что многие артефакты BizTalk не имеют представления в виде исходного кода в привычном смысле этого слова, вместо этого они представлены в виде описания на некотором метаязыке.

К счастью, практически все артефакты MS BizTalk Server при компиляции превращаются в обыкновенные .NET-сборки, что делает возможным единообразную работу с ними при помощи инструментов для работы с MSIL-кодом. В частности, эта особенность дает возможность применить методы аспектно-ориентированного программирования. Отметим, что не всякий инструмент аспектно-ориентированного программирования подходит для решения указанных задач, а лишь поддерживающий *статическое внедрение* действий аспектов на уровне двоичного кода. Статическое внедрение на уровне исходного кода невозможно, т. к. артефакты BizTalk имеют разную природу и описываются различными метаязыками



(например, XLANG/s). *Динамическое* внедрение действий аспекта во время выполнения существенно снижает производительность приложения.

Основная идея применения аспектно-ориентированного подхода и системы Aspect.NET в приложениях для BizTalk заключается в следующем. Как уже отмечалось выше, многие артефакты BizTalk описываются с помощью специальных метаязыков. В случае оркестровок таким языком является XLANG/s, схем сообщений – язык XSD, каналов доставки – типизированный XML, трансформаций – XSL. Всякий из артефактов при компиляции превращается в обыкновенную .NET-сборку. Однако ни для одного из упомянутых языков не существует компилятора в MSIL-код. Вместо этого непосредственно перед компиляцией происходит конвертация конкретного метаязыка в код на языке C#, из которого средствами встроенного компилятора получается двоичный MSIL-код. При детальном анализе генерируемого C# кода можно выявить соответствия между конструкциями исходного метаязыка и объектами C#. Основываясь на выявленных соответствиях, можно создать библиотеку аспектов для решения конкретной задачи в терминах конструкций языка C#, с последующим внедрением в двоичный код. Отметим, что такой подход к применению АОП в проектах для BizTalk

является не только безопасным и надежным методом добавления сквозной функциональности, но и зачастую единственно возможным, т. к. позволяет выйти за рамки предопределенного поведения структурных элементов метаязыков. Рассмотрим несколько сценариев практического применения предложенного подхода и системы Aspect.NET в приложениях для MS BizTalk Server.

Использование Aspect.NET для преодоления ограничений языка XLANG/S. Ярким примером ограничений, налагаемых текущей версией XLANG/s, является отсутствие поддержки пользовательских блоков Finally при обработке ошибок. Конвертер самостоятельно определяет, какие ресурсы необходимо освободить, и генерирует соответствующий код метода Finally. Однако он анализирует лишь «родные» объекты BizTalk, игнорируя созданные пользователем вспомогательные .NET-сущности, которые также могут нуждаться в очистке перед уничтожением (например, объекты, реализующие интерфейс IDisposable).

При помощи Aspect.NET описанное выше ограничение можно с легкостью преодолеть. Для этого необходимо создать аспект, выполняющий всю необходимую работу по очистке ресурсов, и внедрить его непосредственно перед каждым вызовом метода Finally (листинг 1).

```
%before %call Finally(..)
    %action
    public static void CleanupResources()
    {
        //Perform any needed cleanup actions
    }
```

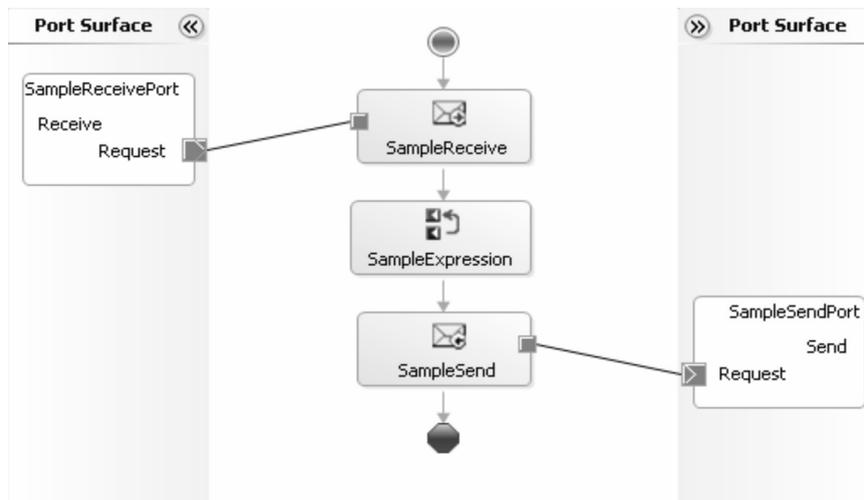
Листинг 1: Пример аспекта для пользовательской очистки ресурсов

После внедрения данного аспекта перед каждым вызовом «сгенерированного» метода Finally будет вызываться метод CleanupResources, реализующий всю необходимую функциональность по дополнительной очистке «собственных» ресурсов.

Использование Aspect.NET для задач протоколирования оркестровок. Другой важной проблемой, стоящей перед разработчиками BizTalk-приложений и не имеющей в настоящий момент удобного решения, является протоколирование (logging) оркестровок. Суть проблемы заключается в том, что лишь несколько структурных элементов оркестровок (shapes) допускают вставку дополнитель-

ного пользовательского C# кода, который, в т. ч. может осуществлять протоколирование.

Основная часть конструкций XLANG/s оперирует исключительно в терминах данного языка, не имеющего инструментов для ведения лога. Следствием этого является либо полный отказ разработчика от протоколирования, либо добавление в оркестровку огромного числа дополнительных структурных элементов под названием Expression, допускающих непосредственную вставку C# кода. Во втором случае оркестровка теряет свою наглядность, и образуются дополнительные издержки времени выполнения. Кроме того, в силу упомянутой выше проблемы «черного



Экспериментальная оркестровка

ящика» при конвертации в C#, нет никаких гарантий, что состояние, записанное в лог в элементе Expression, будет адекватно отражать состояние оркестровки в непосредственно следующем за ним другом структурном элементе. Как правило, разработчики не прибегают к протоколированию оркестровок из-за указанных сложностей и довольствуются исследованием системы (с помощью стандартных административных средств MS BizTalk Server) непосредственно перед и после выполнения оркестровки.

Тем не менее, применив аспектно-ориентированный подход, можно без потери наглядности и производительности решить задачу протоколирования оркестровки. Для этого необходимо знать алгоритм работы конвертера, чтобы сопоставить структурные элементы XLANG/s и конструкции языка C#. Однако соответствующее сопоставле-

ние можно также провести на основе «ручного» анализа графического представления оркестровки и генерируемого на ее основе C# кода.

Рассмотрим простую оркестровку, представленную на рисунке. Предположим, что нам необходимо протоколировать информацию обо всех входящих сообщениях. За прием сообщений отвечает порт SampleReceivePort и структурный элемент SampleReceive, составляющие единую логическую сущность (названия назначаются разработчиком самостоятельно).

Отметим еще раз, что в данном случае вставить код для протоколирования стандартными средствами BizTalk в принципе невозможно. После компиляции проекта с оркестровкой откроем соответствующий файл с C# кодом и найдем все вхождения фразы «SampleReceivePort» в сгенерированном коде (листинг 2).

```

case 3:
    if
        (!SampleReceivePort.GetMessageId(__ctx0__.__subWrapper0.getSubscripti
            on(this), __seg__, __ctx1__, out __msgEnv__))
        return Microsoft.XLANGs.Core.StopConditions.Blocked;
    if (__ctx1__.__SampleXmlMessage != null)
        __ctx1__.UnrefMessage(__ctx1__.__SampleXmlMessage);
        __ctx1__.__SampleXmlMessage = new
            __messagetype_System_Xml_XmlDocument("SampleXmlMessage", __ctx1__);
        __ctx1__.RefMessage(__ctx1__.__SampleXmlMessage);
        SampleReceivePort.ReceiveMessage(0, __msgEnv__,
            __ctx1__.__SampleXmlMessage, null,
            (Microsoft.XLANGs.Core.Context)_stateMgrs[1], __seg__);
    
```

Листинг 2: Фрагмент сгенерированного C# кода

Очевидно, что непосредственно за прием сообщений в данном фрагменте кода отвечает метод `SampleReceivePort.ReceiveMessage`, выделенный полужирным курсивом. Очевидно, что всякая при-

емка сообщений осуществляется посредством метода `ReceiveMessage`. Это дает возможность создать аспект для протоколирования информации обо всех входящих в оркестровку сообщений (листинг 3).

```
%after %call ReceiveMessage(..)
%action
public static void LogRecieveInfo(int ctxId,
    Microsoft.XLANGs.Core.Envelope envelope,
    __messageType_System_Xml_XmlDocument message)
{
    //Log message information
}
```

Листинг 3: Пример аспекта для протоколирования входящих сообщений

Методы аспектно-ориентированного программирования могут с успехом применяться и к остальным артефактам BizTalk – схемам (schemas), трансформациям (maps), каналам доставки (pipelines). Применение Aspect.NET к данным артефактам возможно благодаря тому, что, несмотря на различную природу, все указанные артефакты компилируются в обыкновенные .NET-сборки.

Применение АОП и системы Aspect.NET для поддержки технологии Design-by-Contract. Технология проектирования по контракту (Design-by-Contract) [6] – процесс проектирования, предполагающий разработку формальных, точных и верифицируемых спецификаций для каждого программного элемента. Контрактная спецификация представляет собой набор утверждений (предусловия, постусловия и инварианты), четко описывающих, что должен и не должен делать каждый конкретный метод. Технология была предложена Бертраном Мейером еще в 1986 г. в контексте разработки языка программирования Eiffel, однако сегодня его идея особенно актуальна в рамках задачи эффективного повторного использования так называемых «надежных компонентов» (trusted components), в корректности которых не должно быть никаких сомнений.

Если некоторый компонент предоставляет окружению свою функциональность, он может наложить *предусловие* (precondition) на ее использование. Предусловия выражают ограничения, выполнение которых необходимо для корректной работы программы. Корректная система никогда не вызовет функциональность, если не выполняется ее предусловие. В свою очередь компонент может гарантировать выполнение некоторого

действия с помощью *постусловия* (postcondition). Постусловие определяет состояние, завершающее выполнение программы. *Инвариант* (invariant) класса – это утверждение, выражающее фундаментальные соотношения, характерные для данного класса. Инвариант применяется к классу как целому, и этим отличается от предусловий и постусловий, характеризующих отдельные методы. Инвариант должен выполняться перед вызовом и после вызова каждого метода данного класса.

Язык Бертрана Мейера Eiffel не является общепотребимым, что препятствует распространению концепции контрактного проектирования на практике. В то же время в традиционных языках программирования при реализации контрактных пред- и постусловий разработчик сталкивается со следующими сложностями.

- Во-первых, код проверки пред- и постусловий перемешивается с основным кодом компонента. Это снижает ясность кода и, что более важно, снижает способность программного компонента к повторному использованию. Например, если в другой системе будут более жесткие требования к производительности, может возникнуть необходимость отключить проверки, что неизбежно ведет к модификации кода.

- Во-вторых, код проверки пред- и постусловий рассредоточивается по всей системе. Если возникнет потребность изменить какое-либо из условий, то придется произвести изменения во всех модулях, на которые оно распространяется. При этом достаточно тяжело поддерживать систему в согласованном состоянии.

Проверка утверждений контракта – типичный пример сквозной функциональности, реализация которой присутствует во многих про-

граммных модулях. В рамках классического объектно-ориентированного подхода не существует возможности локализовать в отдельные модули функциональность, которая пронизывает всю систему. В данной работе предлагается реализовать контрактное проектирование с помощью аспектно-ориентированного программирования [7]. При та-

ком подходе основная бизнес-логика компонента не изменяется, контрактная спецификация реализуется в отдельном программном модуле – аспекте. После чего происходит автоматическое внедрение контрактных аспектов в заданные точки программы на уровне бинарных файлов и сборок.

Рассмотрим небольшой пример (листинг 4).

```
public static void LoadInnerEntities(IEnumerable<Tender> tenders)
{
    // possible ArgumentNullException, ArgumentException
    foreach (Material material in materials)
        dicMaterials.Add(material.Id, material);
    foreach (Supplier supplier in suppliers)
        dicSuppliers.Add(supplier.Id, supplier);
    foreach (Price price in prices)
        dicPrices.Add(price.Id, price);

    // possible ArgumentNullException, KeyNotFoundException
    foreach (Tender tender in tenders)
    {
        tender.Material = dicMaterials[tender.MaterialId];
        tender.Supplier = dicSuppliers[tender.SupplierId];
        tender.Price = dicPrices[tender.PriceId];
    }
}
```

Листинг 4: Пример целевого приложения

Представленный фрагмент исходного кода целевого приложения содержит несколько потенциально уязвимых мест при работе со словарем. Следуя принципам контрактного проектирования, прежде чем вызвать метод, разработчик должен убедиться, что выполнены его предусловия. То есть перед добавлением элемента нужно проверить, что элемента с таким ключом еще нет в словаре. А перед извлечением – что такой ключ в словаре, наоборот, присутствует. В обоих случаях нужно также убедиться, что передаваемый ключ не равен нулевой ссылке. Если добавлять эти проверки напрямую в код, объем данного фрагмента возрастет как минимум в полтора раза. Не говоря уже о том, что на сопровождение и внесение изменений в готовый программный код, по оценкам исследователей, тратится около 70 % времени работы разработчика.

Вместо этого реализуем контрактную спецификацию в виде аспекта (листинг 5).

При внедрении данного аспекта в указанные точки исходного кода, получаем точно такую же программу, как если бы все проверки вносились

вручную. При этом имеем следующие преимущества.

- Во-первых, обеспечивается ясность, наглядность и легкость сопровождения исходного кода программы. Основной код компонента не подвергается изменениям, интеграция контракта осуществляется аспектным компоновщиком на уровне бинарных файлов и сборок.

- Во-вторых, АОП предоставляет возможность автоматического добавления новой сквозной функциональности в код целевых приложений, в отличие от традиционных сред разработки, в которых эти операции приходится выполнять вручную.

- В-третьих, используя графический пользовательский интерфейс системы Aspect.NET, можно настраивать необходимый уровень проверок: включить все проверки, оставить только предусловия или же полностью отключить (например, в конечной версии продукта, если имеются жесткие требования к производительности). При этом, поскольку исходный код компонента не модифицируется, полностью сохраняется его способность к повторному использованию.



```
[AspectDescription(«Contract for IDictionary»)]
public class DictionaryAspect : Aspect
{
    [AspectAction(«%before %call IDictionary.Add»)]
    public static void CheckAddPrecondition()
    {
        IDictionary targetObject = (IDictionary)TargetObject;
        Contract.Requires<ArgumentNullException>(key != null);
        Contract.Requires<ArgumentException>(!targetObject.Contains(key));
    }

    [AspectAction(«%before %call IDictionary.get_Item»)]
    public static void CheckGetItemPrecondition()
    {
        IDictionary targetObject = (IDictionary)TargetObject;
        Contract.Requires<ArgumentNullException>(key != null);
        Contract.Requires<KeyNotFoundException>(targetObject.Contains(key));
    }
}
```

Листинг 5: Реализация контрактной спецификации в виде аспекта

- В-четвертых, АОП широко поддерживается различными средами разработки ПО, что способствует распространению концепции контрактного проектирования на практике.

Microsoft BizTalk Server, являясь мощным и гибким инструментом автоматизации бизнес-процессов, не лишен ряда существенных недостатков. Характерными проблемами являются управление сквозной функциональностью и преодоление ограничений метаязыков, используемых для описания артефактов BizTalk. Данные проблемы могут эффективно решаться с помощью аспектно-ориентированного программирования. Благодаря возможности работать с дво-

ичными .NET-сборками, инструмент Aspect.NET позволяет решать такие задачи, как преодоление ограничений метаязыка XLANG/s, протоколирование оркестровок, автоматизация обобщенных бизнес-процессов и другие задачи, связанные с добавлением или изменением функциональности в готовых BizTalk-артефактах и приложениях.

В статье продемонстрировано применение аспектно-ориентированного программирования для реализации контрактного проектирования. Аспектно-ориентированный подход, безусловно, решает проблемы, связанные с запутанным и расфокусированным кодом, и предоставляет простое и мощное решение для реализации проверки контрактных контрактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kiczales, G.** Aspect-oriented programming [Текст] / G. Kiczales, J. Lamping, A. Mendhekar [et al.] // Proc. of the European Conference on Object-Oriented Programming (ECOOP). –June 1997. –P. 220–242.
2. **Safonov, V.O.** Using aspect-oriented programming for trustworthy software development [Текст] / V.O. Safonov. –John Wiley & Sons, 2008. –338 p.
3. **Майерс, Г.** Надежность программного обеспечения [Текст] / Г. Майерс; пер. с англ. Ю.Ю. Галимова; под ред. В.Ш. Кауфмана. –М.: Мир, 1980. –360 с.
4. **Сафонов, В.О.** Aspect.NET – инструмент аспектно-ориентированного программирования для разработки надежных и безопасных программ [Текст] / В.О. Сафонов // Компьютерные инструменты в образовании. –2007. –№ 5. –С. 3–13.
5. **Beckner, M.** BizTalk 2006 recipes: a problem-solution approach [Текст] / M. Beckner, B. Goeltz, B. Gross [et al.]. –Apress, 2006. –534 p.
6. **Meyer, B.** Object-oriented software construction, [Текст] / B. Meyer; 2nd ed. –Prentice Hall, 1997. –1254 p.
7. **Когай, А.Р.** Применение аспектно-ориентированного программирования для поддержки технологии Design-by-Contract [Текст] / А.Р. Когай // Компьютерные инструменты в образовании. – 2010. – № 4. –С. 12–20.

ИНТЕРАКТИВНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГРАФА ИКТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ ОРГАНИЗАЦИИ

Высокая сложность ИКТ-инфраструктур (далее – Сетей) определяет необходимость разработки инструментов построения разнообразных, определяемых пользователем, интерактивных визуальных представлений графов Сетей и их связей с административной и пространственной структурами организации как на уровне элементарных единиц, так и на уровне их произвольных агрегаций. Такие инструменты позволят исследователям методов сетевого управления представлять в удобном виде структуру экспериментальных сетевых платформ (ЭП) [1] и наблюдаемых потоков данных, разрабатывать интерактивные модели, получать необходимые высокоуровневые представления Сетей.

В коммерческих системах, например IBM Tivoli [2] и HP Network Node Manager, набор визуализаций фиксирован. Универсальные системы, такие, как Graphviz [3] и Gephi [4], предоставляют большой выбор алгоритмов раскладки графов, а Gephi поддерживает интерактивность, но отсутствие интеграции с системами сетевого управления и ЭП затрудняет использование этих средств для визуализации Сетей.

Цель исследования – разработка инструмента, позволяющего получать разнообразные интерактивные визуальные представления графа Сети в соответствии с задачами, которые решают исследователи или системные администраторы. Визуализация должна поддерживать интерактивное изменение параметров раскладки, перемещение, масштабирование, сокрытие фрагментов и произвольное агрегирование.

В статье рассмотрен реализованный инструмент визуализации как подсистема экспериментальной платформы Nest [5], предназначенной для исследования моделей и методов сетевого управления. Новым в представленном подходе является использование для представления графа реализации трехструктурной объектной модели данных SON [6], представляющей Сеть, административную и пространственную структуры организации, а также описание преобразований объектов модели в визуальные представления с помощью разработанного авторами предметно-

ориентированного языка на базе Clojure (диалект Lisp для среды Java).

Объектная модель архитектуры организации. Система Nest основана на разработанной простой трехструктурной объектной модели данных SON, объединяющей три подмодели подсистем архитектуры организации – пространственную (S – Spatial), организационную (O – Organizational) и аппаратно-сетевую (N – Network). Диаграмма классов модели представлена на рис. 1. Класс Occupancy связывает три модели, описывая часть помещения, которое принадлежит одной организационной единице и содержит определенные устройства.

Объекты классов SON и отношения между ними образуют граф SON, представляющий граф Сети.

Предметно-ориентированный язык визуализации. Язык позволяет задать преобразование объектов модели в визуальные объекты. Преобразование определяется набором правил. Каждое правило – пара p, f , где p – шаблон, который задается функцией, типом или набором свойств объекта, f – функция, отображающая последовательности выбираемых в соответствии с шаблоном объектов SON в визуальные объекты (рис. 2).

Для описания p и f используется синтаксис

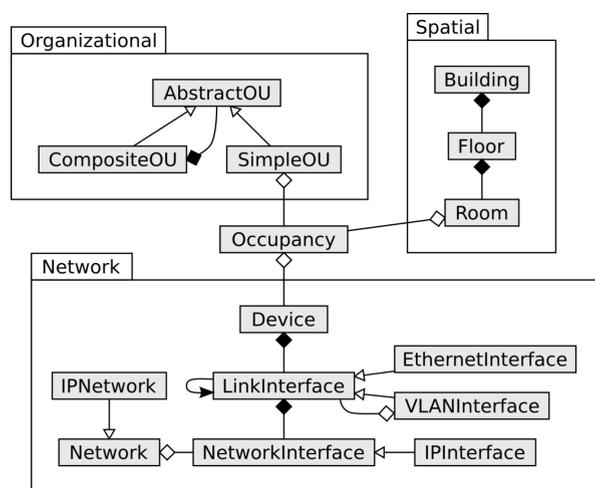


Рис. 1. Диаграмма классов SON

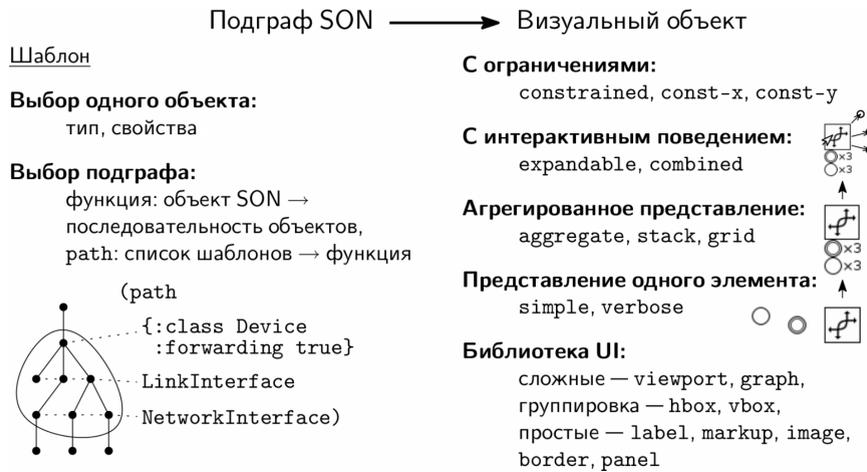


Рис. 2. Компоненты правила визуализации

языка Clojure, основанный на S-выражениях, и библиотека функций и макроопределений визуализации, включающая функции для выборки объектов SON и библиотеку интерактивных визуальных компонентов. Визуальные объекты описываются в декларативном стиле в виде комбинации функций библиотеки.

В примере (листинг 1) функция path возвращает функцию, объединяющую элементы структуры вдоль путей, заданных списком типов вершин. Выражение (path Room Occupancy) определяет правило для объекта класса Room (комната) и всех связанных с ним объектов класса Occupancy (часть комнаты, занятая определенной организационной единицей). В правой части правила определена функция, которая берет из списка объектов, соответствующих правилу, первый (комната), получает номер комнаты, создает текстовое поле (label), содержащее этот номер, добавляет фон (panel) и обрамление (border).

```
(path Room Occupancy)
  #(-> % first .getNumber label (panel 5) border)
(path Device LinkInterface NetworkInterface)
  #(-> % aggregate (const-y 0))
Network default
```

Листинг 1: Пример правил визуализации

```
(path Device LinkInterface NetworkInterface)
#(-> %
  aggregate
  (handle (:mouse-clicked _
    (with-rules [{ default }
      (replace-elements %)))))
```

Листинг 2: Пример правил визуализации с обработкой событий

Во втором правиле для отображения устройства вместе с его интерфейсами сетевого и канального уровня использовано агрегированное представление объектов (aggregate) и задано ограничение (координата y должна иметь нулевое значение), которое будет учтено при размещении объектов на экране. Последнее правило задает для объектов типа Network (сеть) использование стандартного визуального представления.

В примере применены следующие элементы синтаксиса языка Clojure: #() – объявление анонимной функции с аргументом %, -> – последовательная запись вложенных форм (включение очередного выражения в следующую форму на вторую позицию). Пример визуализации для данного набора правил показан на рис. 3.

Для визуальных объектов можно определять действия, выполняемые в ответ на события ввода. В листинге 2 показана модификация второго правила из листинга 1. К агрегированному визу-

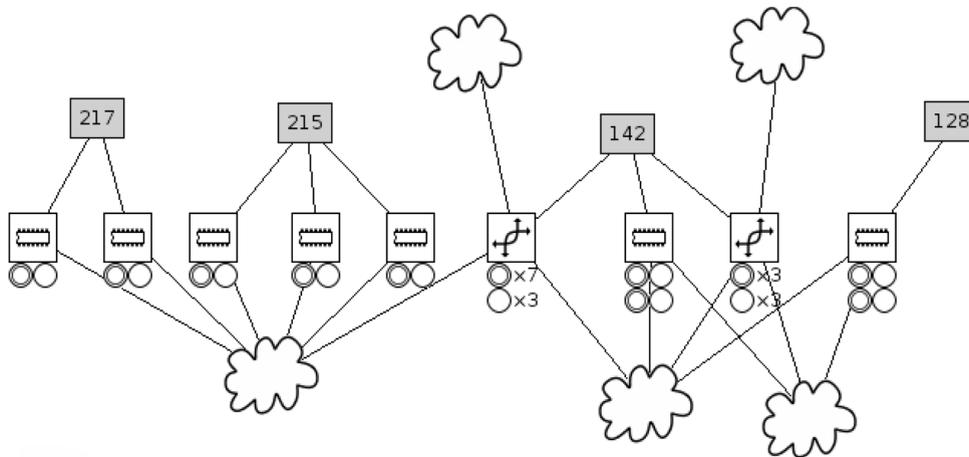


Рис. 3. Пример визуализации и обозначения
(☁) – сеть; (⌘) – маршрутизатор; (⊞) – устройство;
(○) – интерфейс канального уровня; (○) – интерфейс сетевого уровня

альному представлению устройства с его интерфейсами добавлен обработчик нажатия на кнопку мыши, который заменяет агрегированное представление стандартным визуальным представлением для каждого элемента. Для этого элементы заново добавляются в граф в контексте другого набора правил, который задан с помощью макроопределения with-rules. Новый набор состоит из одного правила «{} default».

Для размещения визуальных объектов на экране с учетом размеров вершин графа и ограничений разработан эффективный алгоритм раскладки графа, являющийся развитием алгоритмов, описанных в [7, 8]. Рассмотрение алгоритма раскладки выходит за рамки данной статьи.

Построение визуальных объектов. Для построения и отрисовки визуальных объектов и обработки событий ввода разработана многопоточная библиотека графического интерфейса пользователя Induvon. Достоинством этой библиотеки является то, что ее базовые элементы интерфейса не имеют состояния (координат, размеров и положения в иерархии), а определяющие их данные вычисляются при отрисовке, фиксируются для обработки событий ввода и используются до завершения отрисовки следующего кадра.

Такой подход дает возможность строить динамические интерфейсы с большим числом интерактивных элементов, позволяя избежать дублирования и необходимости синхронизации состояния между приложением и библиотекой интерфейса. Этим преимуществом также обладает подход IMGUI [9], который используется при разработке компьютерных игр для описания

пользовательского интерфейса в императивном стиле. Предлагаемый в данной статье подход предполагает как императивное, так и декларативное описание интерфейса и допускает многопоточную работу.

Части интерфейса могут быть отрисованы асинхронно в параллельных потоках. Для исключения блокировок при этом используется метод тройной буферизации. В системе визуализации эта возможность использована для создания уменьшенного изображения всего графа сети. Синхронное построение уменьшенного изображения при каждом изменении графа вызвало бы существенное увеличение времени отклика на действия пользователя.

Реализация. Система визуализации реализована в виде подключаемого модуля для системы Nest. Классы объектной модели входят в ядро Nest. Для хранения объектов архитектуры организации используется объектно-реляционная проекция. Система Nest предоставляет абстрактный интерфейс для доступа к объектам SON, что позволяет модулю визуализации получать объекты как из базы данных, так и непосредственно от подсистемы автоматизированного построения графа сети.

Модуль визуализации реализован на языке Clojure с использованием доступных в нем средств параллельного программирования. Отрисовка графа сети, отрисовка миниатюры графа и раскладка графа выполняются параллельно. В реализации алгоритма раскладки вычисление сил, действующих на каждую вершину, выполняется параллельно для групп вершин (количество потоков зависит от количества доступных процес-



сорных ядер). Для управления модулем визуализации можно использовать интерактивную среду программирования REPL.

Система визуализации опробована на графе сети Петрозаводского государственного университета (ПетрГУ). Сетевая структура ПетрГУ представлена 4551 объектом SON, включая 1349 объектов сетевых устройств. Система визуализации позволила исследовать структуру сети ПетрГУ в интерактивном режиме.

Библиотека Indyvon составляет 1333 строки кода, исключая пустые строки и комментарии, модуль визуализации – 1650 строк кода.

Представлен метод визуализации, основанный на использовании предметно-ориентированного языка для описания преобразования объектов трехструктурной модели архитектуры организации в граф интерактивных визуальных объектов

и программная реализация метода в виде модуля экспериментальной платформы Nest.

Для работы с интерактивными визуальными объектами разработана библиотека Indyvon, базовые элементы интерфейса которой не имеют состояния, что позволяет строить динамические интерфейсы с большим числом интерактивных элементов и обеспечивает многопоточное выполнение. Функции и макроопределения библиотеки, обеспечивающие простое построение интерактивных объектов, составляют часть предметно-ориентированного языка визуализации.

Основной интерес для дальнейшего исследования представляет интеграция в систему визуализации различных дополнительных динамических данных о работе Сети: информация о потоках, информация регистрационных файлов различных сетевых служб, изменения графа Сети во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Report of NSF Workshop on Network Research Testbeds. 2002 [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www-net.cs.umass.edu/testbed_workshop/testbed_workshop_report_final.pdf

2. IBM Corp. IBM Tivoli Network Manager Version 3.7 Topology Visualization Guide, 2007 [Электронный ресурс].

3. **Ellson, J.** Graphviz and dynagraph — static and dynamic graph drawing tools [Текст] / J. Ellson, E.R. Gansner, E. Koutsofios [et al.] // GRAPH DRAWING SOFTWARE. —Springer-Verlag, 2003. —P. 127–148.

4. **Bastian, M.** Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks [Электронный ресурс] / M. Bastian, S. Heymann, M. Jacomy. —Режим доступа: <http://www.aai.org/ocs/index.php/ICWSM/09/paper/view/154>

5. **Крышень, М.А.** Проект Nest: структурное представление системы поставщика сетевых услуг [Текст] / М.А. Крышень, А.С. Колосов, А.С.

Тидор, Ю.А. Богоявленский // Матер. межвуз. конкурса-конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада «Технологии Microsoft в теории и практике программирования». —СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. —С. 49–51.

6. **Крышень, М.А.** Объектное представление и визуализация структуры поставщика сетевых услуг [Текст] / М.А. Крышень, А.С. Колосов, Ю.А. Богоявленский // Труды XV Всерос. науч.-метод. конф. Телематика 2008. —СПб.: 2008. —Т. 1. —С. 168–169.

7. **Fruchterman, T.M.J.** Graph drawing by force-directed placement [Text] / T.M.J. Fruchterman, E.M. Reingold // Softw. Pract. Exper. —1991. —Vol.21. —№11. —P. 1129–1164.

8. **Hu, Y.** Efficient and high quality force-directed graph drawing [Text] / Y. Hu // The Mathematica J. —2005. —Vol. 10. —P. 37–71.

9. **Barrett, S.** Immediage Mode GUIs [Text] / S. Barrett // Game Developer. —Sept. 2005. —P.34–36.

УДК 004.415

П.Д. Дробинцев, Р.И. Ким, В.П. Котляров

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИМВОЛИЧЕСКИХ ТРАСС

В современном процессе разработки программного обеспечения (ПО) активно исполь-

зуются методы верификации. Это связано с растущей сложностью разрабатываемого ПО, что

приводит к невозможности использования для обеспечения качества только методов традиционного тестирования. В то же время в связи с применением программных комплексов в проблемных областях, критичных к надежности, требования к качеству производимого ПО постоянно растут. Применение верификации позволяет гарантировать высокое качество продукта за счет детальной проверки функциональности разрабатываемых систем в различных условиях применения, сокращая при этом трудозатраты на этапе проектирования. Настоящая статья посвящена описанию технологии генерации символических трасс, получаемых в процессе верификации модели программы, а также их использования в процессе автоматизации тестирования.

Верификация модели приложения

Использование верификации в процессе разработки ПО позволяет обнаружить дефекты, которые могут быть пропущены в процессе традиционного тестирования. Это связано в первую очередь с тем, что для полной проверки разрабатываемого приложения необходимо выполнить огромное количество тестов на различных наборах данных, что вряд ли осуществимо на практике. В то же время методы верификации дают возможность статической проверки модели системы, что позволяет оперировать огромными пространствами состояний в ходе анализа. Следует отметить, что верификация проводится на этапе дизайна до момента разработки кода приложения, т. к. она основана на построении и анализе модели будущего ПО, таким образом, потенциальные дефекты могут быть обнаружены еще до начала стадии кодирования, что существенно сокращает затраты на их исправление [1]. В настоящее время известны различные подходы к верификации программ. Среди них – методы проверки на модели (model checking) [2] и дедуктивные методы (deductive methods).

Проверка на модели – это автоматический метод верификации последовательных и параллельных систем с конечным числом состояний. Основная парадигма метода – перебор состояний модели системы с целью поиска состояний, в которых не соблюдается определенное свойство пользователя. Главная проблема применения методов проверки на модели – эффект «комбинаторного взрыва» в пространстве состояний. Эта проблема на практике особенно проявляется

в системах, состоящих из десятков и сотен взаимодействующих компонент, а также в системах, обладающих сложными структурами данных, способными принимать большое количество значений. В таких системах количество глобальных состояний может оказаться настолько велико, что времена доказательства при верификации становятся малореальными. За последнее десятилетие в области усовершенствования методов проверки на модели был достигнут существенный прогресс, связанный с представлением моделей в виде BDD (Binary Decision Diagram). Однако в общем случае время на проверку промышленного программного комплекса остается неприемлемо большим, что приводит к ограничению (упрощению) верифицируемых моделей и к росту вероятности пропуска ошибок.

Дедуктивный анализ ориентирован на верификацию символических моделей, что подразумевает применение аксиом и правил вывода для доказательства правильности функционирования системы. На ранних этапах исследований приложений дедуктивного анализа основное внимание уделялось доказательству правильности работы всей системы компонент. При этом время анализа не ограничивалось, поэтому разработчик или эксперт, в роли которого часто выступал математик или логик, мог проводить подобные доказательства даже вручную. Современные условия производства сильно ограничивают время фазы проектирования, поэтому инструментальные средства автоматизированы и адаптированы на направленный перебор различных путей продолжения доказательства из текущего состояния.

Следует отметить, что как при использовании методов проверки на модели, так и при использовании дедуктивных методов, доказываемся правильность поведения не самого ПО, а его модели, созданной с использованием того или иного математического аппарата. Верификация на моделях позволяет обнаруживать возможные дефекты на ранних стадиях разработки и вносить необходимые корректировки, однако для проверки поведения приложения необходимо проводить эксперименты над кодом, для чего использовать методы тестирования. Таким образом, верификация и тестирование являются взаимно дополняемыми подходами в процессе обеспечения гарантии качества.

Интеграция верификации и тестирования

крупных программных комплексов возможна при проведении тестирования на основе результатов верификации. В рамках подобного тестирования проверяются не все варианты поведения системы, а лишь те, что были выделены в процессе верификации по определенному критерию.

Для использования результатов верификации в тестировании они должны быть представлены в виде, пригодном для создания тестов. Наиболее распространенной формой представления результатов в современных инструментах служат событийные сценарии или последовательности состояний системы и воздействий, переводящих одно состояние в другое. Такие последовательности называются *поведенческими трассами* или *сценариями*. В случае поиска с помощью верификации множества путей поведения, покрывающих некоторую функциональность системы, результат представляется в виде множества трасс.

В настоящее время большинство инструментов верификации предоставляют возможность получения результатов в виде трасс, описанных на одном из известных языков спецификаций (MSC [5], UML [6]). При этом поведение, описываемое трассой, содержит всю информацию, необходимую для генерации теста (конкретные значения параметров передаваемых системе сигналов, значения переменных и т. п.). Подобная трасса называется *конкретной*. При использовании конкретных трасс для генерации тестов наиболее существенной проблемой остается проблема «комбинаторного взрыва», т. к. количество конкретных трасс, сгенерированных системой верификации, огромно, и прогнать каждую из них в

виде теста не всегда представляется возможным. Для решения данной проблемы используются символические трассы, которые объединяют совокупность поведений системы и содержат символические, а не конкретные значения, определяющие заданное поведение.

Символические трассы и области толерантности

Символическая трасса – это сценарий поведения системы, объединяющий множество конкретных трасс, эквивалентных по управлению, и содержащий диапазоны значений переменных, для которых поведение системы будет лежать в рамках описанной трассы. Основное преимущество символической трассы перед трассой с конкретными значениями – существенное сокращение количества вариантов поведения системы, подлежащих рассмотрению на фазе тестирования, за счет объединения композиции множества поведений, основанной на доказательстве их поведенческой эквивалентности. Следует также отметить, что символическая трасса, полученная с использованием верификации, позволяет утверждать, что поведение системы после подстановки любого конкретного значения, лежащего в диапазоне, будет описывать доказанное в рамках трассы поведение системы.

Ряд современных инструментов верификации позволяет получать символические трассы как результат проведения фазы верификации. Одним из подобных инструментов является VRS (Verification of Requirements Specification) [3]. На рис. 1 и 2 использованы результаты, полученные

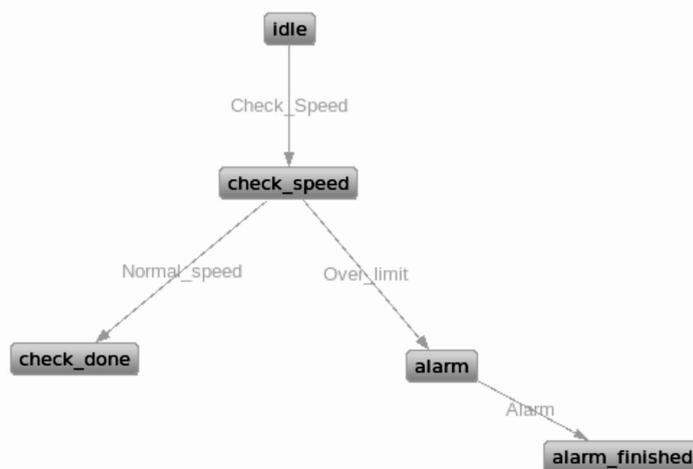


Рис. 1. Пример описания свойства ПО

VRS в процессе при верификации промышленного проекта.

На рис. 1 приведено конечно-автоматное представление свойств, содержащихся в требовании к программной системе, встроенной в автомобиль и контролирующей наличие пристегнутого ремня безопасности. В требовании задано, что при значении переменной *Current_Speed* больше 20 и отсутствии клипсы ремня в устройстве должен раздаваться звуковой сигнал, предупреждающий об опасности, при условии, что скорость автомобиля ограничена 250 км/ч.

Из рисунка видно, что находясь в состоянии *idle*, система может получить сигнал *check_speed* и в зависимости от результатов проверки перейти в состояние *check_done* или в состояние *alarm*, в котором возникает необходимость подачи звукового сигнала.

Если ограничить поведение системы только наличием описанного свойства, то с использованием системы верификации мы можем получить как 230 трасс с конкретными значениями параметра *Current_Speed* при превышении порога в 20 км/ч и 20 трасс без его превышения (при

условии, что скорость имеет тип *integer* и может изменяться на единицу), так и две эквивалентные символические трассы. На рис. 2 приведены две символические трассы, первая из которых представляет набор эквивалентных поведений, где описывается поведение без превышения допустимой скорости, а вторая – поведение при необходимости выдавать сигнал предупреждения.

С точки зрения тестирования при использовании трасс с конкретными значениями параметров мы имеем 250 вариантов тестов для каждого значения параметра, а также несколько тестов, проверяющих нарушение границ в 250 и нуль, например, задав значение скорости минус 1 и 251. Перебор всех вариантов для полного тестирования такого элементарного примера достаточно проблематичен. С другой стороны, в символических трассах мы получаем доказанные при верификации диапазоны значений переменной (области толерантности). В рамках этих областей поведение системы доказано, это диапазоны $21 \div 250$ и $0 \div 20$. Таким образом, для полного тестирования поведения системы необходимо сгенерировать всего четыре теста: один будет содержать значение из первого

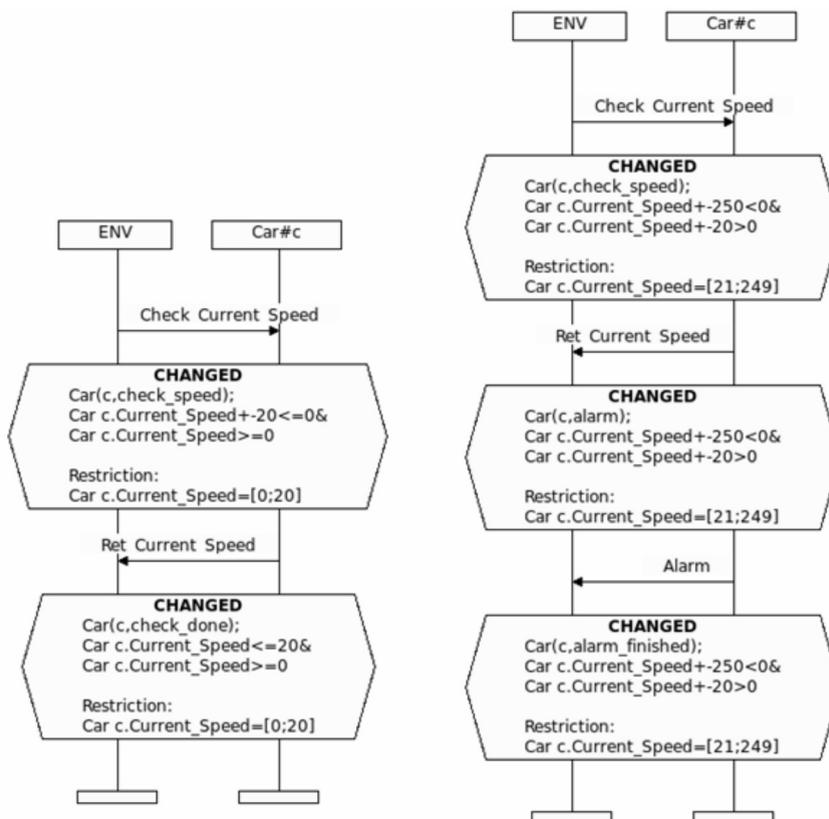


Рис. 2. Символические трассы поведения системы

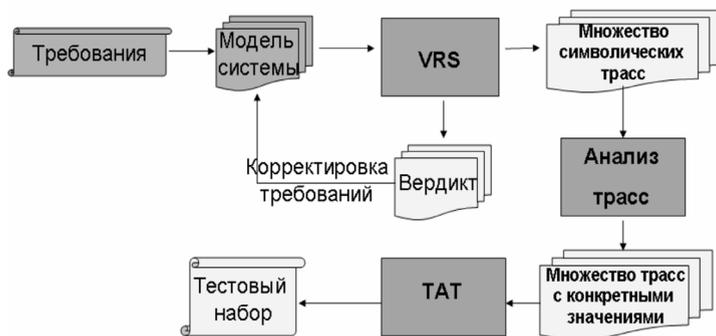


Рис. 3. Технология автоматизации тестирования
 (□) исходные данные; (■) инструментарий

диапазона, второй – из второго диапазона, а также тесты, выходящие за рамки диапазонов. Применение интегрированного подхода верификации и тестирования с использованием символьских трасс в реальных промышленных проектах приводит к сокращению тестовых наборов на порядки без потери качества тестируемого приложения.

Генерация тестового набора

Использование сгенерированных в рамках верификации символьских трасс для генерации тестов, исполняемых на готовом ПО, требует для каждого цикла тестирования автоматизации подстановки конкретных значений в параметры входных воздействий. На рис. 3 представлена технологическая цепочка автоматизации тестирования.

Процесс тестирования с использованием символьских трасс и областей толерантности использует следующие этапы.

1. Анализ данных, полученных с помощью инструментария VRS. На данном этапе автоматически выделяются все области толерантности переменных, входящих в параметры входных воздействий на систему, с целью их дальнейшего использования для подстановки конкретных значений.

2. Автоматическое построение конфигурационного файла, содержащего следующие данные о параметрах: значения параметров на границах допустимых значений и за их границами. Значения разделяются на следующие категории: значения на границе, значения за границей допустимого

диапазона и значение внутри диапазона. Таким образом, по одной символьской трассе можно автоматически получить по пять трасс для каждой области толерантности переменной типа integer и по две трассы для переменной перечислимого типа.

3. Автоматическое построение конкретизированных трасс для цикла тестирования. Данные из конфигурационного файла подставляются в исходную символьскую трассу с целью получения трасс с конкретными значениями.

4. Тестирование модели с помощью инструментария автоматизации тестирования ТАТ [4]. Данный инструментарий преобразует полученную трассу в тест на целевом языке и позволяет провести его исполнение и анализ результатов.

Применение технологии, основанной на генерации и анализе символьских трасс, позволяет существенно сократить количество тестов, которые необходимо выполнить в процессе тестирования и избежать проблемы «комбинаторного взрыва». При этом за счет использования средств верификации качество конечного кода приложения остается на заданном уровне, т. к. все поведения в рамках символьской трассы доказаны системой верификации. Использование рассмотренной технологии хорошо зарекомендовало себя в рамках ряда промышленных проектов по разработке сложных телекоммуникационных комплексов.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 11-07-90412-Укр_ф_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barry, W. Boehm Characteristics of software quality [Текст] / W. Barry. –North-Holland Pub. Co, 1978.
 2. Кларк, Э.М. Верификация моделей программ: Model Checking [Текст] / Э.М. Кларк, О. Грамберг, Д. Пелед. –МЦНМО, 2002.

3. Letichevsky, A. Basic Protocols, Message Sequence Charts and the Verification of Requirements Specifications [Текст] / A. Letichevsky, J. Kapitonova, A.(Jr). Letichevsky, V. Volkov, S. Baranov, V. Kotlyarov [et al.]. –ISSRE 2004, WITUL. –Rennes, 04.11.2005. –P. 30–38.

4. **Веселов, А.О.** Автоматизация тестирования в области телекоммуникаций [Текст] / А.О. Веселов, В.П. Котляров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – №4(103). – С. 180–185.

5. Recommendation ITU-T Z.120. Message Sequence Chart (MSC), 11/2000 [Электронный ресурс].

6. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.uml.org/>

УДК 004.415

И.В. Никифоров, А.В. Петров, Ю.В. Юсупов, В.П. Котляров

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИК ФОРМАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЕРИФИКАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ПО УСМ-СПЕЦИФИКАЦИЯМ

Современные тенденции в создании качественного программного обеспечения (ПО) заключаются в более детальном анализе исходных требований и применении высокоуровневого дизайна системы на ранних этапах разработки. Это связано с тем, что наиболее дорогостоящими являются ошибки этапов анализа требований и дизайна, поэтому актуальна идея выявления и исправления ошибок на ранних стадиях процесса создания ПО.

Проектирование требований связано с выделением целей, функций и ограничений на систему. В нем выделяются задачи сбора и формализации требований, согласования формализации с заказчиком, моделирования проблемы, проверки полноты и непротиворечивости требований. Известен ряд промышленных инструментов [6, 9], позволяющих частично решать перечисленные выше задачи, основной недостаток которых – ориентация либо на прозрачную для пользователя формализацию, либо на доказательство корректности требований, сформулированных в алгебраической нотации.

Наиболее удачное решение перечисленных задач найдено в интеграции инструментов формализации (jUCMNav [7]), верификации (VRS [1]) и транслятора нотаций формализации в нотацию верификации (UCM2BP [3]).

Нотация формализации Use Case Map (UCM) [5] позволяет структурно изображать сценарии поведения разрабатываемой системы в удобной и понятной пользователю и заказчику графической форме. Исследуя модель системы в нотации UCM, разработчик может определить визуально

проблемные места в архитектуре, обнаружить ошибки и внести соответствующие изменения, разрешающие выявленные проблемы как в исходных требованиях, так и в рассматриваемой модели.

Ручной анализ модели по сравнению с автоматическим для реальных проектов, как правило, неприемлем, поэтому в статье приведено решение задачи преобразования модели системы в нотации UCM в модель, пригодную для автоматической верификации и тестирования (модель VRS – проект из базовых протоколов [2]).

Use Case Map – язык формализации

Нотация UCM [8] достаточно проста и содержит ограниченный набор элементов, предназначенных для спецификации поведенческих сценариев разрабатываемых систем. К элементам UCM-диаграмм относятся: компоненты Team, задающие на диаграмме объект исследования или наблюдения; элементы Responsibility, отображающие выполнение каких-либо действий; StartPoint и WaitingPlace, используемые для задания начальной точки сценария и точки ожидания соответственно, когда дальнейшее исполнение возможно после наступления некоторого события или выполнения условия, и др. Используя элементы UCM-нотации можно задавать линейные или параллельные сценарии (AndFork) поведения с последующей их синхронизацией (AndJoin). Элемент FailurePoint участвует в описании механизма генерации и обработки исключений. Элемент Timer используется для задания системного таймера как для случаев простой временной задерж-

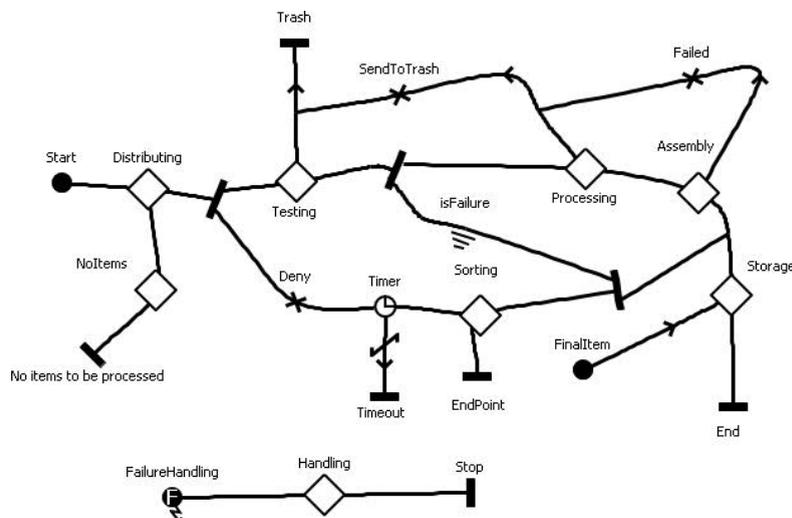


Рис. 1. Высокоуровневая UCM-диаграмма обработки заявок в телекоммуникационной системе

ки, так и для задержки, определяемой сложным логическим поведением.

Особо стоит отметить структурный элемент (**Stub – ромб на диаграмме**), позволяющий представлять иерархическую структуру системы и вести разработку покомпонентно от диаграммы самого верхнего уровня до детального описания низкоуровневых диаграмм.

На рис. 1 представлен фрагмент высокоуровневой UCM-модели, описывающей обработку заявок в телекоммуникационной системе. Диаграмма содержит несколько станций обработки, изображенных элементами **Stub**. Анализ системы можно проводить, начиная с верхнего уровня. После того, как корректность верхнего уровня доказана, можно детализировать функциональность каждой станции, рассматривая ее отдельно от всей системы, а затем объединять результаты и проводить интегральный анализ поведения всей системы.

Использование нотации UCM значительно облегчает разработку телекоммуникационных систем и бизнес-процессов. Кроме того, упрощается процесс общения заказчика с разработчиками, т. к. UCM-диаграммы интуитивно понятны для человека, являющегося специалистом в предметной области.

Применение инструмента jUCMNav на ранних стадиях разработки – важный этап в рамках технологической цепочки создания качественного программного продукта (ПП).

Язык верификации

Совместно с высокоуровневым моделированием системы на ранних этапах разработки активно применяются формальные методы для

доказательства корректности разрабатываемой системы. Формальные методы используют формальные языки. В настоящее время существует множество формальных языков, основная задача которых – описание и доказательство корректности процессов, структур данных и архитектуры программных систем, а также повышение качества за счет поиска и исправления ошибок на моделях. Здесь стоит упомянуть такие языки, как UML, SDL, LOTOS, RSL, ML, MSC, Estelle, CASL, SMV и др. Такое разнообразие связано с тем, что каждый из перечисленных языков создавался для решения задач в определенной области производства ПП.

Для дальнейшей работы была выбрана нотация базовых протоколов, являющаяся довольно простым формализмом с сильным математическим аппаратом, используемым в теории инсерционного программирования для описания взаимодействующих в среде агентов [2]. Базовые протоколы используются как исходные данные в интегрированной технологии VRS/TAT. Инструмент верификации VRS [1] и инструмент автоматизации тестирования TAT [1] составляют мощную пару для выявления ошибок и дефектов в разрабатываемом ПП, позволяя использовать результаты верификации для создания тестовых наборов.

Задача данной работы – создание транслятора UCM2BP для преобразования UCM-моделей в модели из базовых протоколов. Внедрение такого транслятора в технологическую цепочку способствует автоматизации построения формальной модели, пригодной для поиска и исправления ошибок в требованиях до начала этапа генерации целевого кода.

Методы генерации формальной модели

Язык базовых протоколов достаточно гибок и позволяет, используя различные методики формализации, изобразить одно и то же поведение системы по-разному. В трансляторе UCM2BP [3] предложено и реализовано четыре метода формализации: «цветок», «дерево» со статическими агентами, «дерево» с динамическими агентами и смешанный метод.

Метод «цветок». Метод предполагает, что очередность применения базовых протоколов базируется на значениях управляющей переменной. При этом состояния у всех агентов одинаковые (idle). Моделирование параллельных потоков внутри одного агента происходит также на основе управляющих переменных, отвечающих за последовательность вызова базовых протоколов в каждом из потоков. На рис. 2 изображен простой граф переходов для модели, состоящей из шести базовых протоколов (A, B, C, D, E и F). В построении графа используются только состояния агента, что не позволяет судить о реальном поведении модели, в котором участвуют управляющие переменные и логические выражения над другими переменными модели. Построение «точного» графа осуществляется в процессе проверки на модели (model checking, deductive checking), когда происходит обход дерева поведения модели с постоянным вычислением состояний, следующих за текущим узлом.

Преимущество данного подхода – возможность описания объекта моделирования с помощью только одного агента, используя управляющие переменные для кодирования необходимого количества параллельных потоков и их синхронизации. К недостаткам этого метода следует отнести большие временные и ресурсные затраты, необходимые на вычисление и хранение состояний дерева поведения модели. Поскольку состояние агента во всех базовых протоколах одинаковое, то на каждом шаге приходится вычислять значения всех переменных, находящихся в ПРЕД-условии базового протокола, что напрямую отражается на времени работы верификатора и объемах затрачиваемой для вычислений памяти.

Метод «цветок» демонстрирует простоту в интерпретации, но не позволяет работать с моделями крупных размеров (более 500 базовых протоколов) из-за огромных временных затрат.

Метод «дерево». В данном методе поток управления сохраняется за счет состояний аген-

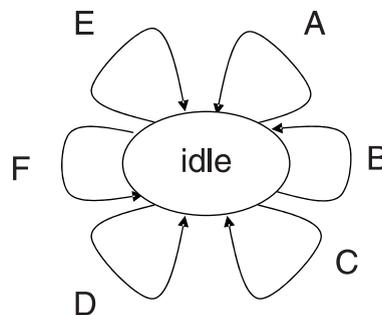


Рис. 2. Граф состояний агента (метод «цветок»)

та, что дает значительное сокращение времени на вычисление следующих за текущим узлом состояний по сравнению с методом «дерево». Это преимущество напрямую отражается в сокращении времени обхода дерева поведения модели.

После проведенных экспериментов было установлено, что метод «дерево» в 6 раз превосходит метод «цветок» по времени проверки модели. Помимо скорости обхода дерева поведения к преимуществу стоит также отнести свойство наглядности, т. к. уже по «грубому» графу переходов можно судить о реальном поведении агента, характеризующего весь процесс целиком или один из его параллельных потоков (рис. 3). Построение «точного» графа осуществляется во время проведения проверки на модели и представляет собой параллельную композицию всех агентов анализируемой системы, погруженных в верификационную среду.

Недостатком данного подхода является то, что пользователь вынужден использовать дополнительные агенты для моделирования параллельных потоков внутри одного процесса. Это приводит к усложнению структуры модели, ее читаемости и анализа. Однако если в системе отсутствуют фрагменты с таким поведением, то использование метода «дерево» всегда будет иметь преимущество по сравнению с методом «цветок».

Метод «дерево» можно разделить на два отдельных метода в зависимости от используемого типа агента: статический или динамический. Различие между статическими и динамическими агентами заключается в том, что статические агенты создаются в самом начале функционирования модели и живут вплоть до ее смерти. При этом верификатор вынужден анализировать все агенты модели на каждом шагу, что не всегда необходимо (возможны ситуации, когда отработавший агент больше никогда не будет задействован в текущем

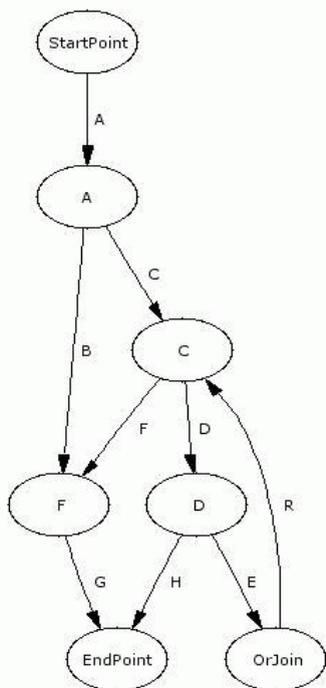


Рис. 3. Граф состояний агента (метод «дерево»)

режиме модели). Это приводит к огромному числу переборных состояний, а, следовательно, и к увеличению времени проверки модели. Использование динамических агентов [4] позволяет ограничивать время анализа, исключая более не используемые агенты. При этом удаляются все переменные исключенного агента, что дает выигрыш по ресурсным затратам верификации.

Смешанный метод. Совместное использование метода «цветок» и метода «дерево» позволяет объединить преимущества обоих методов: сократить время проверки на модели, повысить читаемость модели и упростить ее структуру. Первое достигается использованием метода «дерево» на

линейных участках поведения, а второе и третье – за счет использования метода «цветок» на параллельных потоках в рамках одного процесса. Это дает возможность при моделировании параллелизма вместо введения дополнительных агентов ограничиться управляющими переменными. Однако для этого формализатор должен на UCM-диаграмме пометить линейные участки путей, где будет применяться метод «дерево». К таким участкам принадлежат параллельные потоки, которые не содержат операций над общими переменными, и порядок их выполнения не влияет на поведение модели. Недостаток метода – дополнительные ручные трудозатраты на разметку.

Использование на этапе дизайна UCM-нотации, инструментария верификации и тестирования VRS/TAT и транслятора UCM2BP позволяет создать адекватные требованиям архитектурные модели разрабатываемых систем, проводить их покомпонентный анализ в процессе верификации и генерировать тестовые наборы.

В результате получено снижение конечной стоимости ПП и увеличение его надежности за счет выявления ошибок на ранних стадиях разработки, доказательства корректности разрабатываемой системы и автоматической генерации программного продукта и тестов.

Применение различных методов формализации, удовлетворяя исходным требованиям, сокращает время верификации и упрощает архитектуру разрабатываемой системы.

Транслятор UCM2BP успешно внедрен в технологическую цепочку VRS/TAT и внес заметный вклад в уменьшение трудоемкости разработки ПП.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 11-07-90412-Укр_ф_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Веселов, А.О.** Автоматизация тестирования в области телекоммуникаций [Текст] / А.О. Веселов, В.П. Котляров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2010. –№4(103). –С. 180–185.
2. **Летичевский, А.А.** Спецификация систем с помощью базовых протоколов [Текст] / А.А. Летичевский, Ю.В. Капитонова, А.А. Летичевский (мл.) [и др.] // Кибернетика и системный анализ. –2005. –№4. –С. 3–21.
3. **Никифоров, И.В.** Генерация формальной модели системы по требованиям, заданным в нотации USE CASE MAP [Текст] / И.В. Никифоров, А.В. Петров, Ю.В. Юсупов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2010. –№ 4(103). –С. 191–195.
4. **Никифоров, И.В.** Использование динамических агентов при построении формальной модели по высокоуровневым UCM спецификациям [Текст] / И.В. Никифоров, Ю.В. Юсупов// Технологии Microsoft в теории и практике программирования. Матер. межвуз. конкурса-конф. студентов, аспирантов и молодых ученых Северо-Запада. 23.03.2011. –СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. –С. 108–109.
5. **Buhr, R.J.A.** Use Case Maps for Object-Ori-

ented Systems [Текст] / R.J.A. Buhr, R.S. Casselman.
—Prentice Hall, 1995.

6. IBM Rational RequisitePro [Электронный
ресурс] / Режим доступа: [http://www-01.ibm.com/
software/rational/](http://www-01.ibm.com/software/rational/)

7. jUCMNav [Электронный ресурс] / Режим
доступа: <http://jucmnav.softwareengineering.ca>

8. Recommendation ITU-T Z.151. User requirements
notation (URN), 11/2008 [Электронный ресурс].

9. Sybase PowerDesigner [Электронный ресурс] /
Режим доступа: <http://www.sybase.com/>

НАУЧНЫЙ СЕМИНАР ФТК

21 марта 2011 г.

Представляем аннотацию доклада доцента И.П. Симакова и аспиранта П.В. Холодных на научном семинаре факультета технической кибернетики.

И.П. Симаков, П.В. Холодных

КОРРЕКТНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В докладе рассмотрена корректная логико-математическая модель технических комплексов (ТК) в форме системы логических уравнений (СЛУ), отражающей в рамках общепринятых допущений все причинно-следственные связи, для решения задач объективной оценки структурной надежности, живучести и безопасности много-агрегатных ТК, характеризующихся большим числом технологически связанных элементов (агрегатов, механизмов, устройств) с «переплетающимися» длинноцепочечными контурами получения, преобразования и передачи ресурсов различных видов (энергии, вещества и информации), наличием «перемычек» и «закольцованных» схем с элементами распределения ресурсов.

В отличие от известных моделей, множество структурных элементов, выделенных в ТК, подразделяется на два класса: к первому классу относятся элементы-источники (производители) некоторого ресурса (например, ядерный реактор, аккумуляторные батареи); ко второму классу – элементы, обеспечивающие переработку одного вида ресурса в другой, передачу и/или распределение ресурсов (например, кабельные и трубопроводные коммуникации, распределители, насосы, турбогенераторы).

Кроме того, при составлении логического условия нормального функционирования каждого конкретного элемента дополнительно к бинарным переменным, характеризующим состояние его

собственной работоспособности и факт успешного функционирования, вводятся в рассмотрение так называемые *путевые маркеры*, помечающие классы элементов «ближайшего окружения», от которых на входы рассматриваемого элемента передаются соответствующие ресурсы, обеспечивающие и обуславливающие его работу.

Составленная таким образом система уравнений с включенными в нее путевыми маркерами описывает все функциональные и ресурсные связи в ТК и представляет собой математическую модель его структуры. Решение СЛУ может быть получено в аналитическом виде, например, методом последовательных подстановок, с последующим выводом всех необходимых для оценки надежности, живучести и безопасности ТК структурных функций – логических условий (критериев) выполнения ТК своего функционального назначения и условий обеспечения безопасности в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) как функций от индикаторов собственной работоспособности всех элементов в системе. При этом учет наличия в конъюнктах определенных комбинаций маркеров позволяет при минимизации ДНФ в полном объеме использовать правила булевой алгебры, не допуская при этом, как это имело место в известных моделях, ни появления «лишних» физически не осуществимых, ни «упущенных» (поглощенных) физически верных решений.

На базе разработанных моделей и методов на кафедре системного анализа и управления создан программный комплекс StructSolver, обеспечивающий на уровне главного конструктора проекта решение следующих задач:

определение всего множества комбинаций отказов элементов минимальной кратности, приводящих к потере работоспособности ТК и/или к нарушению условий его безопасности, включая проверку выполнимости детерминированных требований НТД и ТЗ к функционированию ТК при максимальных проектных авариях и критерия единичного отказа, исключая, тем самым, создание так называемых «структурно-порочных» систем;

сравнение по детерминированным критериям отказоустойчивости, отказобезопасности и живу-

чести вариантов функционально-топологических, технических и других структур автоматизированного ТК с различной степенью централизации управления;

определение всего множества наборов из минимального числа работоспособных элементов, обеспечивающих выполнение ТК своего назначения и/или безопасного функционирования с выработкой решений по реконфигурации его структуры при любых непредсказуемых комбинациях отказов элементов;

выполнение проектных расчетов вероятностных показателей структурной надежности ТК, включая вероятностный анализ безопасности для подтверждения соответствия проекта нормативным документам.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АКИМОВ Валерий Петрович – профессор кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-9678, e-mail: akimov@radio.rphf.spbstu.ru

АЛЕКСАНДРОВ Сергей Евгеньевич – заведующий кафедрой физической химии, микро- и нанотехнологии, проректор по связям с промышленностью Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, профессор, доктор химических наук.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29. Тел. (812) 552-61-71, e-mail: vicerektor.ind@spbstu.ru

АРАЛБАЕВ Ташбулат Захарович – заведующий кафедрой вычислительной техники Оренбургского государственного университета, профессор, доктор технических наук.

460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13. Тел. (3532) 37-25-51.

АТРОШЕНКО Валерий Александрович – декан факультета компьютерных технологий и автоматизированных систем Кубанского государственного технологического университета.

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. Тел. (861) 259-60-83, e-mail: atoschenko@kubstu.ru

АФНАСЬЕВА Екатерина Валерьевна – студентка кафедры информатики Санкт-Петербургского государственного университета.

198215, Санкт-Петербург, бульв. Новаторов, д. 65, кв. 41. E-mail: fadeaway@yandex.ru

БИБАРСОВ Марат Рашидович – преподаватель кафедры военных систем космической, радиорелейной и тропосферной связи Военной академии связи, доцент, кандидат технических наук.

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д.3. E-mail: bibarsovmr@rambler.ru

БОГОЯВЛЕНСКИЙ Юрий Анатольевич – заведующий кафедрой информатики и математического обеспечения Петрозаводского государственного университета, доцент, кандидат технических наук.

185000, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33. Тел. (8142) 71-10-84, e-mail: ybgv@cs.karelia.ru

БОРТЯКОВ Даниил Евгеньевич – доцент кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-60-88.

ВЕРЗИЛИН Дмитрий Николаевич – ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, профессор, кандидат технических наук, доктор экономических наук.

199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 39. E-mail: modusponens@mail.ru

ГАБРИЭЛЬЯН Дмитрий Давидович – профессор кафедры антенных устройств и теоретических основ радиоэлектронных систем Ростовского военного института ракетных войск, доктор технических наук.

344038, г. Ростов-на-Дону, пр. М. Нагибина, д. 24/50.

ГАЛИМОВ Ринат Равилевич – старший преподаватель кафедры вычислительной техники Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук.

460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13. Тел. (3532) 37-25-51.

ГЛЫБОВСКИЙ Станислав Борисович – аспирант кафедры радиофизики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: sgbs@mail.ru

ДАНИЛОВА Наталья Викторовна – ассистент кафедры высшей математики и исследования операций факультета математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета.

344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, д. 8а. Тел. (863)297-51-14, e-mail: danilova198686@mail.ru

ДОРОСИНСКИЙ Леонид Григорьевич – заведующий кафедрой автоматизированных систем управления Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, профессор, доктор технических наук.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45, e-mail: asu@rtf.ustu.ru

ДРОБИНЦЕВ Павел Дмитриевич – доцент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29

ДУБРОВИЧ Виктор Константинович – начальник отдела вычислительной электродинамики ООО «Научный центр прикладной электродинамики» Санкт-Петербургского филиала Специальной астрофизической обсерватории РАН, доктор физико-математических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: dvk47@mail.ru

ДБЯЧЕНКО Роман Александрович – доцент кафедры информатики Кубанского государственного технологического университета.

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. Тел. (861) 259-60-83, e-mail: emessage@rambler.ru

ЕЖЕВСКАЯ Галина Сергеевна – студентка Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29

ЗАКРЕВСКИЙ Григорий Викторович – ведущий инженер кафедры вычислительной техники Оренбургского государственного университета.

460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13. Тел. (3532) 37-25-51.

ЗАХАРОВ Алексей Александрович – доцент кафедры информационных систем Владимирского государственного университета, кандидат технических наук.

602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23. Тел. (49234) 77-1-22, e-mail: aa-zaharov@ya.ru

ИЛЬЮШИН Юрий Валерьевич – ассистент кафедры информатики и информационных технологий Пятигорского государственного технологического университета.

357500, г. Пятигорск, ул. 40 лет Октября, д. 56. E-mail: bdbyu@rambler.ru

КАРАСТЕЛКИНА Наталия Алексеевна – студентка Таганрогского технологического института Южного федерального университета.

347928, Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, д. 44.

КАРИМОВА Ляйля Камильевна – аспирант геологического факультета Казанского (Приволжского) федерального университета.

420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18. E-mail: lyailya_karimova@mail.ru

КИМ Руслан Игоревич – студент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29

КОГАЙ Анна Ростиславовна – младший научный сотрудник лаборатории Java-технологии, аспирант кафедры информатики Санкт-Петербургского государственного университета.

195004, Санкт-Петербург, г. Петродворец, Университетский пр., д. 28. E-mail: anna.kogay@gmail.com

КОЛОСОВ Александр Сергеевич – старший преподаватель кафедры информатики и математического обеспечения Петрозаводского государственного университета.

185000, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33. Тел. (8142) 71-10-84, e-mail: akolosov@cs.karelia.ru

КОРОТКОВ Александр Станиславович – ведущий кафедрой прикладной физики и оптики твердого тела Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, профессор, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-76-39, e-mail: korotkov@rphf.spbstu.ru

КОТЛЯРОВ Всеволод Павлович – профессор кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: vpk@ics2.ecd.spbstu.ru

КРИЦКАЯ Лидия Михайловна – доцент кафедры информатики Кубанского государственного технологического университета, кандидат технических наук.

350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. Тел. (861) 255-03-91.

КРЫШЕНЬ Михаил Александрович – старший преподаватель кафедры информатики и математического обеспечения Петрозаводского государственного университета.

185000, г. Петрозаводск, пр. Ленина, д. 33.

КУДРЯШОВ Эдуард Алексеевич – доцент кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. (812) 297-60-01, e-mail: ekudr@rambler.ru

ЛАПШИН Борис Алексеевич – профессор кафедры многоканальной проводной и оптической связи Военной академии связи, доктор технических наук.

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д.3. Тел. (812) 247-98-22, e-mail: balapshin@mail.ru

ЛЕБЕДЯНЦЕВ Валерий Васильевич – заведующий кафедрой автоматической электросвязи Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики, профессор, доктор технических наук.

630102, г. Новосибирск, НСО Кирова, д. 86. Тел. (383) 269-82-42, e-mail: lebvvv@mail.sibsutis.ru

ЛИТВИНЕНКО Станислав Петрович – начальник отделения НПОА имени академика Н.А. Семихатова.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45, e-mail: asu@rtf.ustu.ru

ЛИТВИНОВ Юрий Николаевич – соискатель кафедры информатики Кубанского государственного технологического университета.

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. Тел. (861) 259-60-83.

ЛЯШЕНКО Александр Леонидович – доцент кафедры процессов управления и информационных систем Северо-Западного государственного заочного технического университета, кандидат технических наук.

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5. Тел. (812) 335-26-55, e-mail: akuna_matata_kmv@mail.ru

МАКСИМОВА Татьяна Геннадьевна – заведующий кафедрой статистики Санкт-Петербургского торгово-экономического института, профессор, кандидат технических наук, доктор экономических наук.

194021, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, д. 50. E-mail: maximovatg@gmail.com

МАШКОВ Иван Алексеевич – аспирант кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-60-88, e-mail: mashkov_5267241@list.ru

МЕЩЕРЯКОВ Сергей Владимирович – соискатель Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доцент, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-60-88, e-mail: serg-phd@mail.ru

МОРОЗОВ Евгений Викторович – преподаватель, ассистент кафедры автоматической электросвязи Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики.

630102, г. Новосибирск, НСО Кирова, 86. Тел. (383) 269-82-42, e-mail: Joni6127@rambler.ru

НАГОРНЫЙ Владимир Степанович – профессор кафедры транспортных и технологических систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-60-88, e-mail: nagorny.vladim@yandex.ru

НАУМОВ Игорь Сергеевич – аспирант Пермского государственного технического университета.

614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29. Тел. (342) 219-80-11, e-mail: igor14-88@list.ru

НИКИФОРОВ Игорь Валерьевич – студент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

НОВИКОВ Артем Николаевич – адъюнкт кафедры антенных устройств и теоретических основ радиоэлектронных систем Ростовского военного института ракетных войск.

344065, г. Ростов-на-Дону, Днепроvский пер., д. 122, кв. 25. E-mail: band31@mail.ru

ОНЕГОВ Вадим Леонидович – ведущий научный сотрудник ООО «ТРАНС-СЕРВИС».

187118, г. Кириши, Волховская наб., 18. E-mail: archon1980@mail.ru

ПЕТРАКОВ Валерий Андреевич – доцент кафедры элементной базы военных систем связи, кандидат технических наук.

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3, Тел. (812) 247-98-22, e-mail: vapetr2012@yandex.ru

ПЕТРИЧЕНКО Григорий Семенович – заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов факультета компьютерных технологий и автоматизированных систем (КТАС) Кубанского государственного технологического университета, доцент, кандидат технических наук.

350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. Тел. (861) 255-03-91, e-mail: petry_gr@mail.ru

ПЕТРОВ Алексей Викторович – студент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29

ПОДОРОЖКИН Денис Юрьевич – аспирант кафедры информатики Санкт-Петербургского государственного университета.

198504, Санкт-Петербург, г. Петродворец, Университетский пр., д. 28. E-mail: podorozhkin@mail.ru

ПРИПАДЧЕВ Алексей Дмитриевич – доцент кафедры летательных аппаратов Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук.

460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13. Тел. (3532) 75-28-58, e-mail: aleksejj-pripadchev@rambler.ru

ПРОТОПОПОВА Вера Сергеевна – аспирант кафедры физической химии, микро- и нанотехнологии, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории ФТИМ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-61-71, e-mail: vera_protoporova@mail.ru

САФОНОВ Владимир Олегович – руководитель лаборатории Java-технологии, профессор кафедры информатики Санкт-Петербургского государственного университета, доктор технических наук.

198504, Санкт-Петербург, г. Петродворец, Университетский пр., д. 28.

СЕМЕНЮТА Ирина Сергеевна – аспирант кафедры информатики факультета компьютерных технологий Кубанского государственного технологического университета.

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. Тел. (8612) 255-03-91, e-mail: isemenuta@rambler.ru

СРУР Мохаммад Юсеф – аспирант Кубанского государственного технологического университета.

350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2. Тел. (861) 255-03-91.

СУШНИКОВ Виктор Александрович – аспирант кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. Тел. (812) 297-60-01, e-mail: sushnikov_v@mail.ru

ТИТЕНКО Евгений Анатольевич – доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники Юго-Западного государственного университета, кандидат технических наук.

305040, г. Курск, пр. Хрущева д. 16. Тел. (4712) 50-49-09, e-mail: johntit@mail.ru

ТКАЧУК Максим Игоревич – аспирант кафедры информационных систем Владимирского государственного университета.

602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23. Тел. (49234) 771-22.

УВАРОВ Андрей Анатольевич – аспирант кафедры физической химии, микро- и нанотехнологии, ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории технологии электронной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-61-71, e-mail: uvarov.andrew@gmail.com

ФОМЕНКО Людмила Николаевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и вычислительной техники Ростовского государственного строительного университета.

344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, д. 162, корп. 8, ауд. 242 Б. Тел. (863) 263-10-82, e-mail: detush@yandex.ru

ХАСАНОВ Рафаэль Илдарович – аспирант кафедры вычислительной техники Оренбургского государственного университета.

460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13. Тел. (3532) 37-25-51, e-mail: Hasanov0401@yandex.ru

ХРИСТОДУЛО Ольга Игоревна – докторант кафедры геоинформационных систем Уфимского государственного авиационного технического университета, доцент, кандидат технических наук.

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12. Тел. (347) 273-77-33, e-mail: o-hristodulo@mail.ru

ШАРОВАТОВ Александр Сергеевич – инженер ОАО КБ «Селена».

350000, г. Краснодар, ул. Красная, д. 135. E-mail: alexander_sharovatov@glyge.com

ШЕВЧЕНКО Александр Владимирович – студент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: av.shevch@gmail.com

ШТЕЙНБЕРГ Борис Яковлевич – заведующий кафедрой алгебры и дискретной математики факультета математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета, профессор, доктор технических наук.

344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, д. 8а, ауд. 204. Тел. (863)297-51-14, e-mail: borsteinb@mail.ru

ЮСУПОВ Юрий Вадимович – старший научный сотрудник кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29



АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Лебедев В.В., Морозов Е.В. АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИНВАРИАНТНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ПРИ РАЗНЫХ МЕТОДАХ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОЦЕНОК ИНФОРМАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Рассмотрен новый тип системы связи, использующий для передачи информации значения инвариантов групп преобразований, характеризующих канал связи. Исследована помехоустойчивость метода непосредственного деления оценок длин векторов информационных и опорных сигналов и метода максимального правдоподобия в сочетании с накоплением оценок длин векторов опорных сигналов.

ЛИНЕЙНЫЕ КАНАЛЫ СВЯЗИ. ГРУППЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ КАНАЛА СВЯЗИ. ИНВАРИАНТЫ ГРУППЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ. ИНВАРИАНТНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ.

Хасанов Р.И., Закревский Г.В., Галимов Р.Р., Аралбаев Т.З. МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА И СКОРОСТНОГО РЕЖИМА АВТОМОБИЛЯ НА ОСНОВЕ БЕСПРОВОДНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ.

Представлена мобильная аппаратно-программная система для регистрации и обработки данных о дорожном полотне и скоростном режиме автотранспортного средства и передачи их другим участникам дорожного движения с использованием беспроводных каналов связи.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА. ДОРОЖНОЕ ПОЛОТНО. АВТОТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО. ОБМЕН АВТОДОРОЖНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ.

Шевченко А.В., Коротков А.С. РАЗРАБОТКА МНОГОДИАПАЗОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИЕМНИКА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ.

Приведены результаты расчета и моделирования блоков генераторов, управляемых напряжением (ГУН), и смесителя, входящих в состав преобразователя частоты приемника сверхширокополосной системы связи. Разработаны микросхемы ГУН и смесителя диапазонов частот 3,1–5,0 ГГц и 6,0–10,6 ГГц с использованием параметров 180 нм КМОП-технологии.

ГЕНЕРАТОР, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ. СМЕСИТЕЛЬ. СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ. МОП-ТЕХНОЛОГИЯ.

Лапшин Б.А., Петраков В.А. СИНТЕЗ КОРРЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕШЕТОК.

Рассмотрена теория оптических многослойных решеток, являющаяся основой аналитического метода синтеза амплитудных корректоров и их реализации. Приведен пример расчета локального корректора амплитудных искажений, вносимых усилительным участком линейного тракта волоконно-оптической системы со спектральным разделением каналов.

ОПТИЧЕСКИЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ РЕШЕТКИ. ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ СВЯЗИ. СИНТЕЗ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Богоявленский Ю.А., Колосов А.С. ОРГАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДДЕРЖКА ОБЪЕКТНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ГРАФА ИКТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ ПОСТАВЩИКА УСЛУГ ИНТЕРНЕТА.

Представлен метод организации базы данных для хранения графа ИКТ-инфраструктуры (Сети) поставщика сетевых услуг, основанный на использовании объектно-ориентированной модели, а также алгоритм автоматизированного заполнения и обновления этой базы данных. Описана программная система, реализующая автоматизированную поддержку базы данных графа Сети.

ОБЪЕКТНАЯ БАЗА ДАННЫХ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПЛАТФОРМЫ. АНАЛИЗ СЕТЕЙ. ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ГРАФ СЕТИ.

Христодуло О.И. ИНТЕГРАЦИЯ ГИС В КОРПОРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ.

Рассмотрен подход к интеграции атрибутивных и пространственных данных в корпоративных системах обработки информации на основе нового типа структур данных – многомерных информационных объектов. Введены операции над однотипными и разнотипными многомерными информационными объектами.

ИНТЕГРАЦИЯ. АТРИБУТИВНЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ. МНОГОМЕРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОБЪЕКТЫ. ГИС. СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ.

Наумов И.С. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСАМИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ.

Описана модель, при помощи которой оценивается средний суммарный возможный ущерб от чрезвычайной ситуации при отсутствии обеспечения ресурсами процесса ее ликвидации.

РЕСУРС. ЧРЕЗВЫЧАЙНАЯ СИТУАЦИЯ. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ. ЛИКВИДАЦИЯ. РИСК. ЛОКАЛИЗАЦИЯ. УЩЕРБ. УСТОЙЧИВОСТЬ. УПРАВЛЯЕМОСТЬ.

Доросинский Л.Г., Литвиненко С.П. СОВМЕСТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛА.

Предложен алгоритм измерения координат нескольких источников сигнала, не разрешаемых по угловым координатам. Приведены результаты анализа.

СИНТЕЗ. ОЦЕНКА. АНТЕННАЯ РЕШЕТКА. УГЛОВЫЕ КООРДИНАТЫ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

Бибарсов М.Р., Габриэльян Д.Д., Новиков А.Н. ОПТИМАЛЬНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ СПЕКТРА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК.

Рассмотрен оптимальный метод пространственной обработки широкополосных сигналов в условиях помех. В качестве критерия эффективности выбран минимум среднеквадратического отклонения в полосе частот восстановленного после обработки спектра сигнала. Приведены аналитические выражения для оптимальной частотной зависимости весовых коэффициентов обработки, представлены результаты численного моделирования.

ОПТИМАЛЬНАЯ ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ. ШИРОКОПОЛОСНЫЙ СИГНАЛ. ВЕСОВОЙ КОЭФФИЦИЕНТ. СПЕКТР СИГНАЛА. АДАПТИВНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА.

Акимов В.П., Глыбовский С.Б., Дубрович В.К. ОТРАЖАЮЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ НА ОСНОВЕ ЛАМИНИРОВАННОЙ СЕТКИ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НИТЕЙ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ НЕРОВНОСТЕЙ РЕФЛЕКТОРОВ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН.

Предложен метод улучшения электродинамических свойств неровных металлических рефлекторов за счет применения корректирующей поверхности на основе ламинированной микросетки из металлических нитей. Разработан численно-аналитический метод расчета корректирующих структур для плоского и параболического рефлектора в приближении физической оптики с использованием усредненных граничных условий, а также приведены результаты его применения.

КОРРЕКЦИЯ НЕРОВНОСТЕЙ. КОРРЕКТИРУЮЩИЙ РЕФЛЕКТОР. ЗЕРКАЛЬНАЯ АНТЕННА. СЕТЧАТЫЙ ЭКРАН. УСРЕДНЕННЫЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ.

Нагорный В.С., Машков И.А. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ТУРБУЛИЗАЦИЕЙ СТРУИ ПОТОКОМ ИОНОВ.

По экспериментально полученным переходным характеристикам найдена передаточная функция электропневматического преобразователя с турбулизацией струи потоками униполярных ионов.

СТРУЯ. ТУРБУЛИЗАЦИЯ. ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ. ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Ильюшин Ю.В. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПОЛЯМИ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА.

Рассмотрены проблемы стабилизации температурного поля в туннельных печах конвейерного типа. Изучена возможность расчета температурного поля на основе функции Грина. Разработан программно-аппаратный комплекс для стабилизации температурных полей туннельной печи.

УПРАВЛЕНИЕ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ. УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ. СЕКЦИОННЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬ. ФУНКЦИЯ ГРИНА.



Ляшенко А.Л. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МЕТОДОМ РАСШИРЕННЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.

Рассмотрены проблемы анализа и синтеза систем с распределенными параметрами. Изложена методика построения области устойчивости систем с распределенными параметрами и распределенным ПИ-регулятором.

УПРАВЛЕНИЕ. СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ. ОБЛАСТЬ УСТОЙЧИВОСТИ.

Бортяков Д.Е., Мещеряков С.В. ИЕРАРХИЯ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН.

Изучены вопросы проектирования объектно-иерархических структур данных применительно к моделированию специальных грузоподъемных механизмов и машин. Изложены основные методы решения проблемы рекурсивности при организации иерархии в реляционных системах.

ГРУЗОПОДЪЕМНЫЕ МАШИНЫ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА. РЕКУРСИЯ. РЕЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ.

Титенко Е.А. ИСЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ПРОДУКЦИОННАЯ СИСТЕМА И РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЙ МУЛЬТИПРОЦЕССОР ДЛЯ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ.

Приведены теоретические и аппаратные средства реализации ветвящихся вычислительных процессов. Разработана структура реконфигурируемого мультипроцессора, имеющего распределенную коммутационную подсистему для различных типов параллелизма.

ПРОДУКЦИЯ. ИСЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА. РЕКОНФИГУРАЦИЯ. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ВЫВОД.

Атрощенко В.А., Дьяченко Р.А., Шароватов А.С., Литвинов Ю.Н. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

Рассмотрены вопросы прогнозирования многопараметрических систем. Представлен алгоритм определения параметров с наименьшим временем выхода за пределы допустимых значений.

МОНИТОРИНГ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ. МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. АППРОКСИМАЦИЯ. ИНТЕРПОЛЯЦИЯ.

Афанасьева Е.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ С ПОМОЩЬЮ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ЦЕПОЧЕК (НА ПРИМЕРЕ СТРАН ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЫ).

Представлены результаты применения двух видов вероятностных цепочек для моделирования процессов распределения ресурсов между странами Западной Европы.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ЦЕПОЧКИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ.

Верзилин Д.Н., Максимова Т.Г. РЕКОНСТРУКЦИЯ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ СОЦИУМА.

Предложена методика реконструкции распределений времени пребывания элементов социума в заданном состоянии. Определены взаимосвязи между вероятными распределениями времени. Разработаны процедуры, осуществляющие реконструкцию вероятностных распределений времени на основе выборки значений времени, прошедшего от перехода объектов в заданное состояние до критического момента. Проанализирована точность реконструкции вероятностных распределений.

СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СОЦИУМА. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ В ЗАДАННОМ СОСТОЯНИИ. ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ.

Бортяков Д.Е., Мещеряков С.В. НЕРЕКУРСИВНАЯ МОДЕЛЬ ИЕРАРХИИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

Предложен новый метод организации иерархии данных в объектно-реляционных системах. Главное преимущество новой иерархической структуры состоит в отсутствии рекурсии реляционных отношений, что позволяет эффективно моделировать транспортные и технологические объекты с большой глубиной вложенности.

ОБЪЕКТНО-РЕЛЯЦИОННАЯ СТРУКТУРА. ИЕРАРХИЯ. РЕКУРСИЯ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.

Петриченко Г.С., Крицкая Л.М., Срур М.Ю. МЕТОДИКА ПОИСКА И УСТРАНЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКАХ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ.

Приведена методика поиска и устранения неисправностей в электронных блоках средств вычислительной техники. Для составления методики применен функциональный подход с использованием информационного критерия.

ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК. ВЫБОР. ОПТИМИЗАЦИЯ. ПРИОРИТЕТНЫЙ. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД. ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ.

Данилова Н.В., Штейнберг Б.Я., Фоменко Л.Н. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СПРАВЕДЛИВОЙ ЦЕНЫ ЕВРОПЕЙСКОГО ОПЦИОНА.

Рассмотрен вопрос оптимизации расчетов справедливой цены Европейского опциона-колл. Приведен параллельный алгоритм, использующий разрез дерева на слабо связанные части и независимую обработку полученных поддеревьев.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ. БИНАРНОЕ ДЕРЕВО. СПРАВЕДЛИВАЯ ЦЕНА. ОПЦИОН. ТЕОРЕМА ГИРСАНОВА.

Припадчев А.Д. АНАЛИЗ ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ АВИАПРЕДПРИЯТИЯ.

Представлены методы на основе построения математических моделей процесса пассажирских перевозок в гражданской авиации для определения структуры необходимого парка воздушных судов.

ЛЕТНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДУШНОГО СУДНА. КОММЕРЧЕСКАЯ НАГРУЗКА. СКОРОСТЬ ПОЛЕТА.

Онегов В.Л., Каримова Л.К. АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОвого ПОЛЯ ЗЕМЛИ.

Предложена методика и алгоритмы построения объемной модели теплового поля Земли. Описан программный комплекс, реализующий предложенные алгоритмы. Приведены результаты анализа их устойчивости и первичной апробации на синтетических моделях теплового поля.

МОДЕЛЬ. ФИЛЬТР. ТЕПЛОвое ПОЛЕ. КОСМИЧЕСКИЙ СНИМОК. ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ.

Захаров А.А., Ткачук М.И. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН ПО ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.

Рассмотрена разработка алгоритма автоматической реконструкции трехмерных сцен по видеопоследовательности. Алгоритм основан на поиске точечных соответствий между кадрами. Приведены экспериментальные исследования алгоритма.

ТРЕХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ. ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ.

Кудряшов Э.А., Сушников В.А. ОЦЕНКА ВАРИАЦИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫХ КАНАЛОВ ДАТЧИКОВ СИЛЫ.

Изучены вариации чувствительности тензорезистивных каналов датчиков силы в зависимости от базы и места установки тензорезисторов на упругом элементе с неоднородным распределением деформации. Приведены результаты моделирования для двух вариантов упругого элемента типа двойная консольная балка.

ТЕНЗОРЕЗИСТОР. ВАРИАЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ. ДВОЙНАЯ КОНСОЛЬНАЯ БАЛКА.

Уваров А.А., Александров С.Е. ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА.

Рассмотрена конструкция экспериментального реактора, созданного для изучения процесса химического осаждения из газовой фазы пленок политетрафторэтилена с активацией окиси гексафторпропилена на накаливаемой вольфрамовой нити. Представлены результаты, подтверждающие возможность осаждения политетрафторэтилена, и некоторые зависимости характеристик пленок от условий процесса осаждения.

ХОГФ. ПТФЭ. ОКИСЬ ГЕКСАФТОРПРОПИЛЕНА. ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ. ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРОСКОПИЯ.



Протопопова В.С., Александров С.Е. ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ СЛОЕВ Ni ИЗ БИС-(ЭТИЛЦИКЛОПЕНТАДИЕНИЛ) НИКЕЛЯ.

Представлены результаты исследований процесса химического осаждения из газовой фазы слоев никеля из металлоорганического соединения бис-(этилциклопентадиенил) никеля (ЭЦПН). Показана возможность использования ЭЦПН для ХОГФ синтеза Ni тонких слоев. Изучены зависимости изменения скорости роста, морфологии, состава Ni слоев от технологических параметров для газовых систем ЭЦПН – Ar и ЭЦПН – Ar – H₂.

ХОГФ. МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКОЕ СОЕДИНЕНИЕ. БИС-(ЭТИЛЦИКЛОПЕНТАДИЕНИЛ) НИКЕЛЯ. СЛОИ Ni.

Семенюта И.С. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПОПАРНОГО СРАВНЕНИЯ В ЗАДАЧЕ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ.

Предложено решение задачи выбора оптимального варианта размещения занятий при автоматизированном составлении расписания занятий вуза с учетом упорядочивания альтернатив. Приведен алгоритм формирования альтернатив размещения учебного занятия.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТЬ. ПРИОРИТЕТ. КРИТЕРИЙ ОТБОРА. ШКАЛА ОЦЕНОК. МНОЖЕСТВО АЛЬТЕРНАТИВ. ИНДЕКС СОГЛАСИЯ. ИНДЕКС НЕСОГЛАСИЯ. ЯДРО АЛЬТЕРНАТИВ.

Карастелкина Н.А. СТРАТЕГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНОГО ПОДХОДА.

Предложена методология проведения стратегического анализа на основе когнитивного подхода. Представлены когнитивные карты и когнитивные модели взаимодействия туристского предприятия с внутренней и внешней средой.

ТУРИСТСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ. КОГНИТИВНЫЙ АНАЛИЗ. КОГНИТИВНАЯ МОДЕЛЬ. КОГНИТИВНАЯ КАРТА. ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ.

Ежевская Г.С. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫМ ОБРАЗОВАНИЕМ.

Рассмотрена модель информационной системы для принятия решений при управлении муниципальным образованием. Исследования проведены с учетом методик системного анализа.

МУНИЦИПАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА. МНОГОУРОВНЕВЫЙ КОНТРОЛЬ.

Подорожкин Д.Ю., Когай А.Р., Сафонов В.О. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АСПЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ.

Описаны примеры применения методов АОП при разработке программных систем. Рассмотрена проблема управления сквозной функциональностью в приложениях для Microsoft BizTalk Server, а также применение системы Aspect.NET для поддержки технологии контрактного проектирования (Design-by-Contract).

АСПЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ. ASPECT.NET. СКВОЗНАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ. BIZTALK SERVER. ПРОТОКОЛИРОВАНИЕ. КОНТРАКТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ.

Крышень М.А., Богоявленский Ю.А. ИНТЕРАКТИВНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГРАФА ИКТ-ИНФРАСТРУКТУРЫ ОРГАНИЗАЦИИ.

Представлен метод визуализации ИКТ-инфраструктуры организации, основанный на использовании предметно-ориентированного языка для описания преобразования объектов модели ИКТ-инфраструктуры в граф интерактивных визуальных объектов.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ. ГРАФ. ИНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ. СЕТЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ. ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ЯЗЫК ПРОГРАММИРОВАНИЯ.

Дробинцев П.Д., Ким Р.И., Котляров В.П. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИМВОЛИЧЕСКИХ ТРАСС.

Представлен подход к автоматической генерации тестового набора на основе символических трасс, являющихся результатом доказательства, проведенного на стадии верификации модели приложения. Рассмотрены достоинства и недостатки как традиционных методов тестирования и верификации, так и предлагаемого подхода.

ВЕРИФИКАЦИЯ. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ. СИМВОЛИЧЕСКИЕ ТРАССЫ.

Никифоров И.В., Петров А.В., Юсупов Ю.В., Котляров В.П. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИК ФОРМАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ВЕРИФИКАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ПО UCM-СПЕЦИФИКАЦИЯМ.

Представлен обзор методов, использующихся для построения формальных моделей систем по высокоуровневым Use Case Map-спецификациям. Перечислены преимущества и недостатки каждого из методов.

ТРЕБОВАНИЯ. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ. UCM.



ANNOTATION

KEYWORDS

Lebedyantsev V.V, Morozov E.V. THE ANALYSIS OF THE NOISE STABILITY OF THE INVARIANT COMMUNICATION SYSTEM AT DIFFERENT METHODS OF INFORMATION ELEMENTS ESTIMATIONS.

The new type of the communication system using for information transfer of value of invariants of groups of transformations, characterizing a communication channel is considered. The noise stability of two methods of calculation of estimations of information elements is investigated: a method of direct division of estimations of lengths of vectors of information and basic signals and a method of the maximum credibility in a combination to accumulation of estimations of lengths of vectors of basic signals.

LINEAR COMMUNICATION CHANNELS. GROUPS OF TRANSFORMATIONS OF A COMMUNICATION CHANNEL. INVARIANTS OF GROUP OF TRANSFORMATIONS. INVARIANT COMMUNICATION SYSTEMS. A NOISE STABILITY INVARIANT COMMUNICATION SYSTEMS.

Khasanov R.I., Zakrewsky G.V., Galimov R.R., Aralbaev T.Z. MOBILE SYSTEM OF MONITORING STATE OF THE ROAD SURFACE AND REGIME OF SPEED AUTOMOBILE BASED ON WIRELESS COMMUNICATION CHANNELS.

This paper proposes mobile hardware - software system for registration and processing data of the roadbed and speed mode of motor vehicle and for transfer them to other road users by wireless communication channels.

SYSTEM OF MONITORING. ROAD SURFACE. MOTOR VEHICLE. EXCHANGE OF THE AUTOMOBILE AND TRAFFIC INFORMATION.

Shevchenko A.V., Korotkov A.S. DESIGN OF A MULTIBAND DOWN-CONVERTER FOR ULTRA-WIDE BAND COMMUNICATION RECEIVER.

This paper proposes results of design and simulations of down-converters for ultra-wide band receiver working in 802.15.4a standard. The design of voltage control oscillator (VCO) block and mixer for 3.1-5.0 GHz and 6.0-10.6 GHz bands based on 180 um CMOS technology has been included.

VOLTAGE CONTROL OSCILLATOR. MIXER. ULTRA-WIDE BAND COMMUNICATIONS. MOS-TECHNOLOGY.

Lapshin B.A., Petrakov V.A. EQUALISER SYNTHESIS BASED ON OPTICAL MULTILAYER LATTICES.

The theory of optical multi-layer lattices is considered, being the baseline of analytic method of synthesis of amplitude equalizers and their realisation. The example is given of desing local equalizer of amplitude distortions, caused by amplification section of linears route of optical fiber communication line with WDM.

OPTICAL MULTILAYER LATTICES. OPTICAL NETWORKS of TELECOMMUNICATIONS. SYNTHESIS. OPTIMIZATION.

Bogoyavlensky Yu.A., Kolosov A.S. ORGANIZATION AND AUTOMATED MAINTENANCE OF AN ICT-INFRASTRUCTURE GRAPH OBJECT DATABASE OF AN INTERNET SERVICE PROVIDER.

In this paper we introduce a database organization method for storing an IT-infrastructure (Network) graph of a service provider based on the object-oriented model. Also we introduce an algorithm of automated filling and updating of the database. In this paper we also describe a software system which implements automated maintenance of the Network graph database.

OBJECT DATA BASE. TESTBEDS. NETWORK ANALYSIS. OBJECT-ORIENTED MODELLING. NETWORK TOPOLOGY.

Khristodulo O.I. INTEGRATION OF GIS IN CORPORATE INFORMATION PROCESSING SYSTEM BASED ON MULTIDIMENSIONAL INFORMATION OBJECTS.

This article describes an approach to integration of attribute and spatial data in enterprise information processing systems based on new types of data structures - multidimensional data objects. Introduced operations on the same type and multi-type multi-dimensional information objects.

INTEGRATION. ATTRIBUTE AND SPATIAL DATA. MULTIDIMENSIONAL INFORMATION OBJECTS. GIS. INFORMATION PROCESSING SYSTEMS.

Naumov I.S. MATHEMATICAL MODEL OF THE ESTIMATION OF INFLUENCE OF SYSTEM OF MAINTENANCE WITH RESOURCES ON RESULTS OF LIQUIDATION OF EMERGENCY.

The model with which is estimated average total possible damage from an emergency at absence of maintenance of resources in process of its liquidation is described in article.

RESOURCE. EMERGENCY. CONTROL SYSTEM. RECOVERY. RISK. LOCALIZATION. DAMAGE. RESISTANCE. CONTROLLABILITY.

Dorosinsky L.G., Litvinenko S.P. ANGULAR COORDINATES OF SEVERAL SIGNAL SOURCES JOINT MEASUREMENT.

The algorithm of measuring the angular coordinates of several signal sources with the resolution above the Rayleigh has been presented. The analysis results are proposed.

SYNTHESIS. EVALUATION. ANTENNA ARRAY. ANGULAR COORDINATES. EFFICIENCY.

Bibarsov M.R., Gabriel'yan D.D., Novikov A.N. OPTIMUM REGENERATION OF THE SPECTRUM BROADBAND SIGNALS IN THE CONDITIONS OF NOISES WITH USE OF ADAPTIVE ANTENNA ARRAYS.

The optimal method of space processing of broadband signals in the conditions of interferences is considered. In the capacity of criterion of efficiency the minimum of a root-mean-square deviation in a frequency band of the spectrum of a signal regenerated after processing is selected. Analytical expressions for optimal frequency dependence of weight coefficients of processing are resulted, results of numerical modelling are presented.

OPTIMAL FREQUENCY DEPENDENCE. A BROADBAND SIGNAL. WEIGHT COEFFICIENT. A SIGNAL SPECTRUM. AN ADAPTIVE ANTENNA ARRAY.

Akimov V.P., Glybovsky S.B., Dubrovich V.K. LAMINATED WIRE MESH-BASED REFLECTIVE SURFACE FOR PHASE ERRORS CORRECTION DUE TO ANTENNA REFLECTOR'S UNEVENNESS.

The improving method for electromagnetic properties of uneven metal reflectors is proposed employing a secondary laminated wire-meshed surface. The wave optical analysis approach is developed using the average boundary condition method for both plane and parabolic reflector shapes and presented together with numerical calculation results.

SURFACE ROUGHNESS CORRECTION. CORRECTING REFLECTOR. REFLECTOR ANTENNA. MESH SCREEN. AVERAGED BOUNDARY CONDITIONS.

Nagorniy V.S., Mashkov I.A. DYNAMIC CHARACTERISTICS ELECTROPNEUMATIC CONVERTERS WITH TURBULIZATION JET OF ION STREAM.

In article was obtained transient response and transfer function of electropneumatic converter with turbulization jet of unipolar ions streams.

JET. TURBULIZATION. ELECTROPNEUMATIC CONVERTERS. TRANSFER FUNCTION. TRANSIT CHARACTERISTICS.

Il'yushin Yu.V. PROJECTING OF CONTROL SYSTEMS OF THE TEMPERATURE FIELD OF TUNNEL KILNS CONVEYOR-TYPE.

The paper considers the problems of stabilization of the temperature field in tunnel kilns conveyor-type. Described the possibility of calculating the temperature field based on Green's function. Designed software and hardware for stabilization of the temperature field in tunnel kilns.

MANAGEMENT. MATHEMATICAL SIMULATION. TEMPERATURE FIELD. THE CONTROL ACTION. SECTIONAL HEATER. GREEN'S FUNCTION.



Lyashenko A.L. DEFINITION OF STABILITY RANGE OF DISTRIBUTED PARAMETER SYSTEMS BY THE EXPANDED FREQUENCY-RESPONSE METHOD.

In paper analysis and synthesis problems of distributed parameter systems are observed. The technique of construction of stability range of distributed parameter systems and the distributed Pi-regulator is stated.

CONTROL. DISTRIBUTED PARAMETER SYSTEMS. DISTRIBUTED REGULATORS. STABILITY RANGE.

Bortyakov D.E., Mescheryakov S.V. HIERARCHICAL DATA ISSUES in DESIGNING SPECIAL LIFTING DEVICES and MACHINES.

Problems in designing an object-hierarchical structure for modeling special lifting devices and machines are considered. Basic methods to resolve the recursiveness issue on handling a hierarchy in relational systems are stated.

LIFTING MACHINES. MODELING. HIERARCHICAL STRUCTURE. RECURSION. RELATIONAL SYSTEMS.

Titenko E.A. THE COMPUTING PRODUCTION SYSTEM AND RECONFIGURABLE MULTI-UNIT FOR ITS IMPLEMENTATION.

The paper presents the theory and hardware implementation of the branching of computational processes. On the basis of machine-generator designed structure of reconfigurable multi-unit having distributed switching subsystem for different types of parallelism.

RULE CALCULATIONS. ENUMERATIVE SYSTEM. RECONFIGURATION. PARALLEL EDUCATION.

Atroshchenko V.A., Dyachenko R.A., Sharovатов A.S., Litvinov Yu.N. DEVELOPING OF ALGORITHM OF DETERMINING CRITICAL PARAMETER OF THE RESOURCE OF TECHNICAL SYSTEMS.

In clause problems of multiparameter systems' state forecasting. Algorithm of determination of parameters with minimum prediction time, where bounds violation will occur, is given.

MONITORING. FORECASTING. MULTIPARAMETER SYSTEM. APPROXYMATION. INTERPOLATION.

Afanasyeva E.V. NONLINEAR PROBABILISTIC CHAIN-BASED MODELLING OF THE DISTRIBUTION OF ECONOMIC RESOURCES CONSUMPTION (BY THE EXAMPLE OF WESTERN EUROPEAN COUNTRIES).

This paper presents the results of the application of two types of nonlinear probabilistic chains to the modelling of the processes of resources consumption distribution across the countries of Western Europe.

RESOURCES DISTRIBUTION. SOCIOECONOMIC RESOURCES. PROBABILISTIC CHAINS. MODELLING. MUTUAL EFFECTS.

Verzilin D.N., Maximova T.G. TIME ATTRIBUTES RECONSTRUCTION FOR PROCESSES OF STATES CHANGING IN SOCIAL MEDIUM.

Density estimation technique for reconstruction of state duration distributions was worked out for the case of time data being registered for elements of social medium that were in a given state at some fixed moment of observation.

The procedures for distributions reconstruction through the sample data of durations from state occurrence to observation moment were presented. The accuracy of the reconstruction was analyzed.

STATES OF SOCIAL-MEDIUM ELEMENTS. DWELLING TIME DISTRIBUTION. DENSITY ESTIMATION.

Bortyakov D.E., Mescheryakov S.V. RECURSIVE-FREE DATA MODEL of OBJECTS HIERARCHY in TRANSPORT and MANUFACTURING SYSTEMS.

New method of handling data hierarchy in object-relational systems is proposed. Recursive-free relationship is the principal advantage of new hierarchical structure that allows effective modeling of transport and manufacturing objects having deep nesting level.

OBJECT-RELATIONAL STRUCTURE. HIERARCHY. RECURSION. MODELING. MANUFACTURING SYSTEMS.

Petrichenko G.S., Kritskaya L.M, Srur M.Yu. TECHNIQUE OF SEARCH AND ELIMINATION OF MALFUNCTIONS IN ELECTRONIC BLOCKS OF COMPUTER AIDS.

In article the technique of search and elimination of malfunctions in electronic blocks of computer aids is resulted. For technique drawing up the functional approach with use of information criterion was used.

THE ELECTRONIC BLOCK. CHOICE. OPTIMIZATION. THE PRIORITY. FUNCTIONAL APPROACH. SEARCH OF MALFUNCTIONS.

Danilova N.V., Shteinberg B.Ya., Fomenko L.N. THE PARALLEL ALGORITHM OF THE FAIR PRICE CALCULATING FOR THE EUROPEAN OPTION.

The optimization problem connected with the fair price calculating for the European Call option is considered. The parallel algorithm uses the cut of the tree and the independent processing of the subtrees.

PARALLEL ALGORITHM. BINARY TREE. FAIR PRICE. OPTION. GIRSANOV THEOREM.

Pripadchev A.D. ANALYSIS OF FLYING STOCK IN AIR ENTERPRISE.

The methods based on the construction of the mathematical models of passenger transportations process in civil aviation for determination of needful flying stock structure are represented in the article.

FLIGHT PERFORMANCES. AIRCRAFT ECONOMIC EFFECTIVENESS. COMMERCIAL LOAD. FLIGHT SPEED.

Onegov V.L., Karimova L.K. ALGORITHMS AND SOFTWARE PACKAGE TO COMPUTING 3D MODELS OF EARTH'S THERMAL FIELD.

Suggest a methodology and algorithms to computing 3D models of Earth's thermal field. Describe software package implementing this algorithms. Shown results of its operability and tests it in thermal field's models.

MODEL. FILTER. THERMAL FIELD. SPACE IMAGE. THERMAL IMAGE SENSING.

Zakharov A.A., Tkachuk M.I. ALGORITHM FOR AUTOMATIC RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL SCENES FROM VIDEO SEQUENCES.

The article describes the development of automatic algorithm for reconstruction of three-dimensional scenes from the video sequence. The algorithm is based on finding the point correspondences between frames. Presents the experimental research of the algorithm.

THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION. VIDEO SEQUENCES.

Kudryashov E.A., Sushnikov V.A. The ESTIMATION of the VARIATION of SENSITIVITY TENSORESISTIVE CHANNELS of GAUGES FORCE.

In clause variations of sensitivity tensorresistive channels of gauges of force depending on base and an installation site resistive-strain sensor on an elastic element with non-uniform distribution of deformation are considered. Results of modeling for two variants of an elastic element of type a double console beam are resulted.

RESISTIVE-STRAIN SENSOR. VARIATION OF SENSITIVITY. DOUBLE CONSOLE BEAM.

Uvarov A.A., Alexandrov S.E. CHEMICAL VAPOR DEPOSITION OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE DIELECTRIC FILMS.

Design of experimental hot-wire chemical vapor deposition reactor, developed for investigation of polytetrafluoroethylene films deposition based on hot tungsten wire assisted decomposition of Hexafluoropropylene Oxide, is considered. Experimental data, proving the feasibility of polytetrafluoroethylene deposition, and basic deposition process dependencies are presented.

CVD. PTFE. HEXAFLUOROPROPYLENE OXIDE. ELLIPSOmetry. FTIR.

Protopopova V.S., Alexandrov S.E. CHEMICAL VAPOR DEPOSITION OF Ni FILMS FROM BIS-(ETHYLCYCLOPENTADIENYL) NICKEL.

Here we report preliminary results from an attempt to use bis-(ethylcyclopentadienyl) nickel [(EtCp)₂Ni] as a precursor for MOCVD of Ni thin films in the (EtCp)₂Ni-Ar and (EtCp)₂Ni-H₂-Ar reaction systems. Deposited films were analyzed by means of atomic force microscope (AFM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence spectroscopy (XFS). The effect of hydrogen on growth rate, composition, and morphology of the deposited Ni films were experimentally studied.

CVD. METALLORGANIC PRECURSOR. BIS-(ETHYLCYCLOPENTADIENYL) NICKEL. Ni FILMS.

Semenyuta I.S. PAIRED COMPARISON METHOD USING IN THE TIMETABLE SCHEDULE PROBLEM.

This work is devoted to the Electre method using in the optimum variant choice problem for the best automated timetable scheduling in high school with the ordered alternatives. The paper also represents the alternatives core forming algorithm.

MULTICRITERIALITY. PRIORITY. SELECTION CRITERION. ESTIMATION SCALE. ALTERNATIVES MULTITUDE. CONSENT INDEX. DISAGREEMENT INDEX. ALTERNATIVES CORE.



Karastelkina N.A. THE STRATEGIC ANALYSIS OF ACTIVITY OF THE ENTERPRISE ON THE BASIS OF COGNITIVE APPROACH.

The methodology of carrying out of the strategic analysis on the basis of cognitive approach is offered. The cognitive maps and cognitive models of interaction of the tourist enterprise with internal and external factors of the environment are presented.

THE TOURIST ENTERPRISE. COGNITIVE APPROACH. COGNITIVE MAP. COGNITIVE MODEL. PULSE INFLUENCE.

Ezhevskaya G.S. IMPROVEMENT OF THE MODEL AT MANAGEMENT OF MUNICIPAL DEPARTMENT.

The model of information system is developed for decision-making at management of municipal department. Researchers are conducted taking into account techniques of the system analysis.

MUNICIPAL DEPARTMENT. INFORMATION SYSTEM. THE MULTILEVEL CONTROL.

Podorozhkin D.Y., Kogay A.R., Safonov V.O. USING METHODS OF ASPECT-ORIENTED PROGRAMMING FOR SOFTWARE DEVELOPMENT.

A number of practical examples of using aspect-oriented programming for software development are specified. Managing cross-cutting concerns in Microsoft Biztalk Server applications is discussed. Using Aspect.NET for Design-by-Contract support is proposed.

ASPECT-ORIENTED PROGRAMMING. ASPECT.NET. CROSS-CUTTING CONCERNS. BIZTALK SERVER. LOGGING. DESIGN-BY-CONTRACT.

Kryshen M.A., Bogoyavlensky Yu.A. INTERACTIVE VISUALIZATION OF ENTERPRISE IT INFRASTRUCTURE GRAPH.

A method for visualization of enterprise IT infrastructure is presented. Domain-specific language is used to translate objects describing the IT infrastructure into a graph of interactive visual objects.

VISUALIZATION. GRAPH. USER INTERFACE. NETWORK MANAGEMENT. DOMAIN-SPECIFIC LANGUAGE.

Drobintsev P.D., Kim R.I., Kotlyarov V.P. TECHNOLOGY OF TESTING AUTOMATION BASED ON SYMBOLIC TRACES.

The paper presents an overview of approach to testing automation based on symbolic traces. Where each symbolic trace is presented as result of formal verification. Advantages and disadvantages of traditional testing and verification methods and suggested method are described.

VERIFICATION. TESTING AUTOMATION. SYMBOLIC TRACES.

Nikiforov I.V., Petrov A.V., Yusupov Yu.V., Kotlyarov V.P. USAGE OF FORMALIZATION APPROACHES FOR CREATION OF SYSTEM MODELS FROM UCM-SPECIFICATION

The paper presents an overview of formalization approaches that are used for generation of system formal models from Use Case Map-specification. Advantages and disadvantages of every method are described.

REQUIREMENTS. AUTOMATIC FORMALIZATION. UCM.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГУ

№ 3 (126) 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

Т.А. Борисова – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции 552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 28.06.2011. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,71. Уч.-изд. л. 23,71. 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.