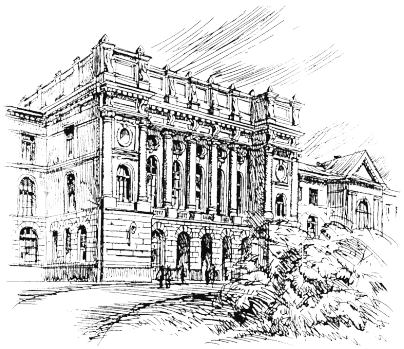
4(128)/2011



Научно-технические ведомости СПбГПУ

ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

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

СЕРИЯ "ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ"

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор – зам. председателя;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор – зам. председателя;
Болдырев Ю.Я., д-р техн. наук, профессор;
Пышкина Г.А., технический секретарь;
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

Агиевич С.Н., Пономарев А.А., Смирнов А. А. *Модель радиосигнала OFDM на основе функций сплайн-Понтрягина–Виленкина–Крестенсона для скрытного коммуникационного взаимодействия* 7

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Нечаев Ю.Б., Епифанцев А.А., Сидоров М.Ю. *Способ построения маршрутов в узкополосной радиосети* 11

Бабков В.Ю., Степутин А.Н. *Повышение точности позиционирования в сетях мобильной связи* 14

Проблемы передачи и обработки информации

Ростов Н.В. *Многокритериальная оптимизация цифровых последовательных регуляторов высокого порядка методами прямого и косвенного зондирования* 21

Системный анализ и управление

Аксёнов К.А., Антонова А.С. *Применение имитационного моделирования и технологии интеллектуальных агентов для решения задачи управления проектами* 27

Кедрин В.С., Кузьмин О.В. *Применение программной архитектуры Model-view-controller для построения системы визуального проектирования и моделирования алгоритмов* 36

Козлов В.Н., Нгуен Д.Х., Фирсов А.Н. *Математическое моделирование и оптимизация гидравлических сетей при установившихся режимах транспортировки слабосжимаемой жидкости* 42

Анкудинов Г.И., Анкудинов И.Г. *Логико-комбинаторный подход к морфологическому синтезу в управлении и проектировании* 46

Аксёнов К.А., Ван Кай, Антонова А.С., Аксёнова О.П., Липодаева А.А. *Разработка и применение системы поддержки принятия решений в управлении строительным холдингом* 53

Дибихин К.Ю., Вагапова Н.В. *Системное управление организационными и технологическими структурами (на примере агропромышленного комплекса)* 61

Проталинский О.М., Хоменко Т.В. *Концептуальное представление предметных задач поискового конструирования физического принципа действия чувствительных элементов* 68

Вычислительные машины и программное обеспечение

Мамутова О.В., Филиппов А.С. *Разработка модели иерархической оперативной памяти вычислительной системы* 75

Ицыксон В.М., Зозуля А.В. *Формализм для описания частичных спецификаций компонентов программного окружения* 81

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Белявский Г.И., Никоненко Н.Д. *Задача о рандомизированной остановке при среднеквадратичном хеджировании* 91

Зубков А.Ф., Чех К.Ю., Семенов И.А. *Моделирование динамики рыночных цен* 95

Хворова Л.А. *Модель теплового режима почвы в пространственно-дифференцированных технологиях точного земледелия* 101

Поршнев С.В., Гребенкин М.К. *Исследование сетевого трафика магистрального Интернет-канала* 107

Коныгин С.Б. *Границы применимости метода вероятностного клеточного автомата при моделировании физико-химических систем на атомно-молекулярном уровне* 113

Лазарев Е.М., Аксёнов К.А. *Пространственный анализ объектов управления территорией* 116

Приборы, информационно-измерительные системы

Степанов Е.А., Юхнев А.Д. *Приемник транскраниальной ультразвуковой доплеровской системы с расширенным диапазоном регистрируемых скоростных показателей церебрального кровотока* ... 121

Семенов К.К. *Объединение математического аппарата нечетких переменных и автоматического дифференцирования для оценки наследственной погрешности* 129

Управление в социальных и экономических системах

Руденко Н.А., Комаров М.П. *Оптимизация налогового администрирования с помощью процессного подхода к управлению* 135

Конференция «Технологии Microsoft в теории и практике программирования»

Кузенкова А.С., Дерипаска А.О., Таран К.С., Подкопаев А.В., Литвинов Ю.В., Брыксин Т.А. *Средства быстрой разработки предметно-ориентированных решений в metacase-средстве QREAL* 142

Лукашин А.А., Лукашин А.А., Тютин Б.В., Котляров В.П. *Архитектура сервиса для решения ресурсоемких задач в распределенной вычислительной среде* 146

Веселов А.О., Иванов А.С., Тютин Б.В., Котляров В.П. *Автоматическая настройка тестового окружения телекоммуникационных проектов* 149

Королев Д.Н. *Интеграция расписания учебных курсов факультета с порталом SharePoint* 152

Сведения об авторах 157

Аннотации 161

Contents

Infotelecommunication technologies

Agievich S.N., Ponomarev A.A., Smirnov A.A. *Radio signal model ofdm generated in Spline-Pontryagin–Vilenkin–Christenson functions bases for reserved infocommunication interaction providing* 7

Telecommunication system and computer networks

Nechaev Yu.B., Epifancev A.A., Sidorov M.Yu. *The way of routing in a narrow-band radio networks* ... 11

Babkov V.Y., Steputin A.N. *Increasing the positioning accuracy in mobile networks* 14

Problems of transfer and information processing

Rostov N.V. *Multiobjective optimization of high order digital cascade controllers using direct and indirect sounding* 21

The system analysis and management

Aksyonov K.A., Antonova A.S. *The application of simulation and intelligent agents technology to decision the task of scheduling projects* 27

Kedrin V.S., Kuzmin O.V. *The employment of a software architecture model-view controller for establishment visual designing and modelling of algorithms* 36

Kozlov V.N., Nguyen D.Kh., Firsov A.N. *Mathematical modelling and optimization of the hydraulic network in steady-state conditions of weakly compressible fluid* 42

Ankudinov G.I., Ankudinov I.G. *Logical-combinatorial approach to morphological synthesis in management and design is considered* 46

Aksyonov K.A., Wang Kai, Antonova A.S., Aksyonova O.P., Lipodaeva A.A. *The development and application of decision support system for control of the building shell company* 53

Dibikhin K.Y., Vagapova N.V. *System management of organizational and technological structures (for example agriculture complex)* 61

Protalinsky O.M., Khomenko T.V. *Conceptual representation of subject problems of search designing of the physical principle of action of sensitive elements of the control system* 68

Computer and the software

Mamoutova O.V., Filippov A.S. *Model development of hierarchical memory in computer system* 75

Itsykson V.M., Zozulya A.V. *The formalism for description of the partial specifications of program environment components* 81

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

Belyavsky G.I., Niconenko N.D. *Problem of randomized stop of variance-optimal hedging* 91

Zubkov A.F., Chekh K.Yu., Semenov I.A. *Modelling of dynamics of market prices* 95

Khvorova L.A. *Model of the thermal regime of soils in the spase-differentitation technology of precision agriculture* 101

Porshnev S.V., Grebenkin M.K. *Statistic properties of the traffic samples from backbone links as well as their dependence on the aggregation on time* 107

Konygin S.B. *Limits of applicability of probability cellular automaton method in physicochemical systems modeling at the atomic level* 113

Lazarev E.M., Aksyonov K.A. *The spatial analysis of facilities management area* 116

Devise, information-measuring system

Stepanov E.A., Ukhnev A.D. *Transcrane ultrasonic dopler system receiver with the expanded range of registered cerebral blood-groove speed indicators* 121

Semenov K.K. *Combination of mathematical framework for fuzzy variables and automatic differentiation for nested error estimation* 129

Management in social and economic system

Rudenko N.A., Komarov M.P. *Optimization of tax administration using the process approach to management* 135

Conference «Technologies Microsoft in the theory and programming practice»

Kuzenkova A.S., Deripaska A.O., Taran K.S., Podkopaev A.V., Litvinov Y.V., Bryksin T.A. *Tools for rapid development of domain-specific solutions in QREAL metacase system* 142

Lukashin A.A., Lukashin A.A., Tyutin B.V., Kotlyarov V.P. *Cloud service architecture for scientific and engineering computing in distributed environment* 146

Veselov A.O., Ivanov A.S., Tyutin B.V., Kotlyarov V.P. *Automation of test environment configuring for telecom projects* 149

Korolev D.N. *Integration of faculty`s schedule with SharePoint portal* 152

About the authors 157

Abstracts 161

УДК 621.391.1

С.Н. Агиевич, А.А. Пономарев, А.А. Смирнов

МОДЕЛЬ РАДИОСИГНАЛА OFDM НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ СПЛАЙН-ПОНТРЯГИНА–ВИЛЕНКИНА–КРЕСТЕНСОНА ДЛЯ СКРЫТНОГО КОММУНИКАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В различных системах коммуникационного взаимодействия (КмВ) уделяется особое внимание вопросам обеспечения конфиденциальности абонентов. Как правило, в коммерческих системах в целях обеспечения конфиденциальности применяются меры, ограничивающие доступ нелегитимных пользователей на уровне кодирования сообщений. Закрытие систем связи с использованием сложных кодов ведет к их потенциальному вскрытию. Это связано с ярко выраженными идентификационными признаками. Кроме того, такой подход увеличивает техническую сложность аппаратуры.

Между тем, анализ существующих подходов показал, что требуемую степень конфиденциальности можно обеспечить не только на уровне кодов, но и на уровне формирования сигналов. Например, за счет использования оригинальных базисов, таких, как базис вейвлет-функций, функций Уолша, Виленкина–Крестенсона и др. Цель работы – исследование временных и спектральных характеристик радиосигналов, сформированных по технологии мультиплексирования с ортогональным разделением частот, отличающихся описанием в базисах сплайн-Понтрягина–Виленкина–Крестенсона функций (СПВКФ) и позволяющих обеспечить скрытное коммуникационное взаимодействие.

Основы формирования базисных функций сплайн-Понтрягина–Виленкина–Крестенсона

Поскольку базис дискретно-экспоненциальных функций (ДЭФ) – частный случай базиса Виленкина–Крестенсона функций (ВКФ) [1], то можно, используя их, перейти к новому виду представления сигналов. Дополнительное рассмотрение базисов ВКФ показало, что при использовании в качестве параметра модуля с разными значениями можно выйти на семейство еще большего разнообразия базисов, и тем самым изначально увеличить их структурную скрытность по отношению к ДЭФ за счет увеличения возможных комбинаций.

Учитывая, что декомпозицией чисел с различным модулем занимался Понтрягин [2], такой класс функций можно определить как Понтрягина–Виленкина–Крестенсона функции (ПВКФ). Увеличение возможных комбинаций ПВКФ по отношению к ВКФ характеризует рис. 1, показывающий, что для исходных значений длин базисных функций равных 100 такое увеличение составит более чем в 30 раз. Причем с увеличением длины базиса указанный рост принимает экспоненциальный характер. Поясним сущность такого перехода: среди целых чисел длин базиса существуют такие, которые подлежат факторизации, расширяя тем самым возможности комбинаций представления функций. Так, число 12 можно представить семью вариантами возможных комбинаций сомножителей (см. рис. 1).

Обобщение методов сплайн-гармонического анализа (СГА) на функции ПВКФ открыло дополнительные возможности для обработки сигналов. Поскольку новые базисные СПВКФ получены из ПВКФ и сплайнов, то, следовательно, обладают их свойствами, к которым следует отнести непре-

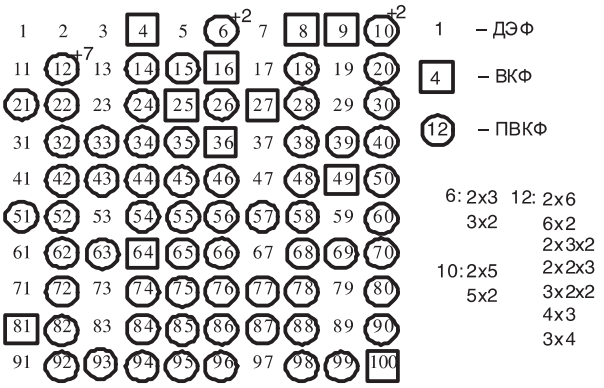


Рис. 1. Возможные варианты длин базисных функций ПВКФ

рывную природу (сплайны) и наличие большого количества базисов. Указанные свойства открывают возможность разработки новых средств КмВ с повышенной структурной скрытностью.

Основу теоретических положений СГА с использованием СПВКФ составляют следующие их свойства.

Пусть имеется пространство гладких функций – периодических сплайнов дефекта 1 [3]. Тогда любой сигнал $S^p(t)$ из этого пространства может быть построен из B-сплайнов $M^p(t)$ порядка p и заданной степени гладкости $p-1$:

$$S^p(t)=\frac{1}{N}\sum_k q_k M^p(t-t_k), \qquad (1)$$

где N – количество отсчетов сигнала; q_k – некоторые коэффициенты; $M^1(t)$ – одноперiодический единичный импульс единичной энергии.

Введем пространство ${}_{\text{PVC}}G_n^p$ периодических сплайнов (PVC – признак ПВКФ; p – порядок сплайна дефекта 1; n – номер базисной функции) и распишем видоизмененное выражение:

$$\begin{aligned}
{}_{\text{PVC}}S^p(t)&=\frac{1}{N}\sum\nolimits_k q_k M^p(t\underset{\mu_l}{\Theta}t_k)=\\
&=\frac{1}{N}\sum_k M^p(t\underset{\mu_l}{\Theta}t_k)\sum_n\overline{\text{PVC}}(n,k)\,{}_{\text{PVC}}F_n(q)=\\
&=\sum_n {}_{\text{PVC}}F_n(q)\frac{1}{N}\sum_k\overline{\text{PVC}}(n,k)M^p(t\Theta t_k)=\\
&=\sum_n {}_{\text{PVC}}\xi_n\,{}_{\text{PVC}}m_n^p(t)=\sum_n {}_{\text{PVC}}c_n\,{}_{\text{PVC}}U_n^p(t),
\end{aligned} \qquad (2)$$

где $\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_l$ – модули представления чисел (μ_1 – старший, μ_l – младший разряды); l – количество разрядов представления числа; $\underset{\mu_l}{\Theta}$ – сдвиг по модулю μ_l; $t_k=(p/2+k)/N$;

$$\text{PVC}(n,k)=\exp\Big(j2\pi\sum_{i=1}^{l}\frac{n_i k_i}{\mu_l}\Big);$$

$${}_{\text{PVC}}F_n(q)=\frac{1}{N}\sum_k \text{PVC}(n,k)q_k;\quad {}_{\text{PVC}}\xi_n=\frac{{}_{\text{PVC}}F_n(z)}{{}_{\text{PVC}}u_n^p};$$

$${}_{\text{PVC}}u_n^p={}_{\text{PVC}}F_n(M^p)=\frac{1}{N}\sum_k\overline{\text{PVC}}(n,k)M^p(t_k);$$

$${}_{\text{PVC}}m_n^p(t)=\frac{1}{N}\sum_k\overline{\text{PVC}}(n,k)M^p(t\underset{\mu_l}{\Theta}t_k);$$

$${}_{\text{PVC}}c_n={}_{\text{PVC}}F_n(z);\quad {}_{\text{PVC}}U_n^p(t)=\frac{{}_{\text{PVC}}m_n^p(t)}{{}_{\text{PVC}}u_n^p}.$$

Из выражения (2) видно, что появились новые функции: ${}_{\text{PVC}}m_n^p(t)$ и ${}_{\text{PVC}}U_n^p(t)$.

Рассмотрим свойства СПВКФ.

Свойство 1. ${}_{\text{PVC}}m_n^p(t\underset{\mu_l}{\oplus}l\,/N)=\overline{\text{PVC}}(n,l)\times$ $\times\,{}_{\text{PVC}}m_n^p(t)$.

Свойство 2. ${}_{\text{PVC}}m_n^p(t)$ – N-периодические по отношению к N.

Свойство 3. Справедливы выражения

$$\int_0^1 {}_{\text{PVC}}\overline{m_n^p(t)}\,{}_{\text{PVC}}m_r^b(t)dt=\delta_r^i\,{}_{\text{PVC}}u_n^{p+b};$$

$$\frac{1}{N}\sum_k {}_{\text{PVC}}\overline{m_n^p(t_k)}\,m_r^b(t_k)=\delta_r^i\,{}_{\text{PVC}}u_n^p u_r^b.$$

Свойство 4. Сплайны ${}_{\text{PVC}}m_n^p\left(t\underset{\mu_l}{\oplus}\frac{p}{2N}\right)\Big/{}_{\text{PVC}}u_n^p$ интерполируют $\overline{\text{PVC}}(n,t)$: ${}_{\text{PVC}}m_n^p(l/N)=$ $=\overline{\text{PVC}}(n,l/N)$.

Свойство 5. Свертка ${}_{\text{PVC}}m_n^p\;{}_{\text{PVC}}m_r^b(t)=$ $={}_{\text{PVC}}m_n^{p+b}\delta_n^r$.

Свойства показывают, что выражение (1) есть разложение сигнала ${}_{\text{PVC}}S^p(t)$ по базисным функциям ${}_{\text{PVC}}m_n^p(t)$ или ${}_{\text{PVC}}U_n^p(t)$.

Теорема 1. Сплайны ${}_{\text{PVC}}m_n^p(t)\Big/\sqrt{{}_{\text{PVC}}u_n^{2p}}$ образуют ортонормированный базис пространства ${}_{\text{PVC}}G_n^p$.

Следствие 1. При $\mu_1=\mu_2=\ldots=\mu_{l-1}=\mu_l$, $N=\mu_l$ справедливо равенство ${}_{\text{PVC}}S^p(t)={}_{\text{Pal}}S^p(t)=$ $=\sum_n {}_{\text{Pal}}c_n\,{}_{\text{Pal}}U_n^p(t)$.

Следствие 2. При $\mu=N$, $l=1$, $W=\exp(j\pi/N)$ справедливо равенство ${}_{\text{PVC}}S^p(t)=$ $={}_{\text{Pal}}S^p(t)=S^p(t)=\sum_n c_n U_n^p(t)$.

Следствие 3. При $\mu=N$, $l=1$, $p\to\infty$ имеем: $\lim\limits_{\substack{p\to\infty\\ \mu=N}}{}_{\text{PVC}}S^p(t)=\sum_n c_n\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi nt}$.

Следствие 4. Из выражения (2) при $\mu=N$, $l=1$, $p=1$ следует: $S^1(t)=\sum_n c_n U_n^1(t)$, что можно рассматривать как классическое дискретное разложение сигнала $S^p(t)$ (дискретный анализ Фурье) в базисе ступенчатых функций $U_n^1(t)$, которые в точках t_k совпадают с ДЭФ.

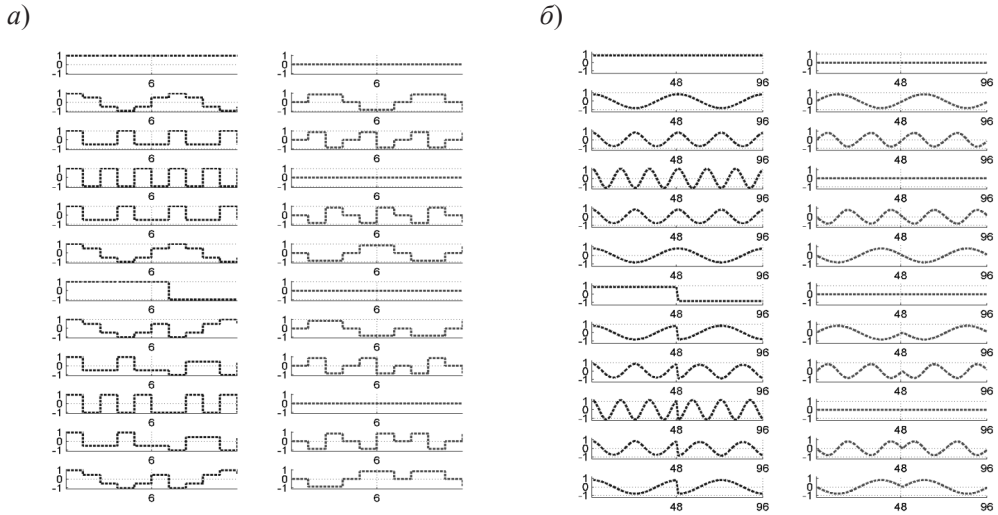


Рис. 2. Реальная и мнимая части: *а* – ПВКФ, $N = 12$; *б* – СПВКФ, $N = 96$ ($\mu_1 = 2$, $\mu_2 = 6$)

В качестве примера приведена система базисных функций ${}_{\text{PVC}}U_n^p(t)$ (рис. 2 *б*), полученных из ПВКФ (рис. 2 *а*).

Базисные СПВКФ, характеризуемые параметром p, остаются гладкими на всем интервале μ_l, что позволяет излучать в эфир радиосигналы, сформированные на их основе. Следствия теоремы 1 определяют инструмент синтеза и обработки сигналов в базисах СПВКФ.

Модель радиосигнала, сформированного по технологии мультиплексирования с ортогональным разделением частот в базисах СПВКФ

В последнее время в системах радиосвязи широкое распространение получили так называемые *радиосигналы*, *сформированные по технологии мультиплексирования с ортогональным разделением частот* (OFDM) [4].

Сигнал OFDM представляет собой суперпозицию гармонических колебаний различной частоты. Аналитически он описывается как

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re}[\sqrt{2/T}\, A_n \, e^{j\varphi_n} \, e^{j2\pi f_n t}], \qquad (3)$$

где A_n и φ_n – амплитуда и фаза n-го комплексного символа канального алфавита, предназначенные для манипуляции n-й поднесущей; f_n – n-я поднесущая частота из N возможных.

Формально переход к OFDM сигналу в базисе СПВКФ может осуществляться путем замены экспоненты

$${}_{\text{PVC}}S^p(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re}\left[\sqrt{\frac{2}{T}} A_n \, {}_{\text{PVC}}U_n^p(t, \varphi_n)\right], \qquad (4)$$

где $n = 1...R$ – номер базисной функции (физический смысл – частота в базисе ДЭФ); R – размерность сигнала (количество амплитуд, используемых для формирования сигнала); A – амплитуда сигнала; ${}_{\text{PVC}}U_n^p(t) = {}_{\text{PVC}}m_n^p(t) \big/ {}_{\text{PVC}}u_n^p$;

$${}_{\text{PVC}}m_n^p(t) = \frac{1}{N} \sum_k \overline{\text{PVC}}(n,k) M^p(t \underset{\mu_l}{\Theta} t_k);$$

$${}_{\text{PVC}}u_n^p = {}_{\text{PVC}}F_n(M^p) = \frac{1}{N} \sum_k \overline{\text{PVC}}(n,k) M^p(t_k);$$

$\text{PVC}(n,k) = \exp(j2\pi \sum_{i=1}^{l} n_i k_i / \mu_i)$; PVC – признак базисной функции ПВКФ; $0 \le t \le T$; $T \le \tau \le T_{\mu_i}$; $\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_l$ – модули представления чисел (μ_1 – старший, μ_l – младший разряды); l – количество разрядов представления числа; T – длительность символа сигнала; T_μ – длительность информационной посылки базиса; φ – фаза.

При $l = 1$ $\mu = N$ и гладкость функции (порядок сплайна дефекта 1) $(p-1) \to \infty$, т. е. в качестве модулируемого используется сигнал, сформированный на основе $\cos(t)$. В результате приходим к классическому аналитическому выражению радиосигнала в терминах ДЭФ (3).

В качестве показателя скрытности обоснована способность системы противостоять обнаружению и измерению параметров ее сигнала.

В интересах противодействия несанкционированным средствам радиоприема можно изменять порядок выбора базиса СПВКФ. Количество базисов велико, поэтому обеспечивается структурная скрытность радиосигналов, построенных на их основе.

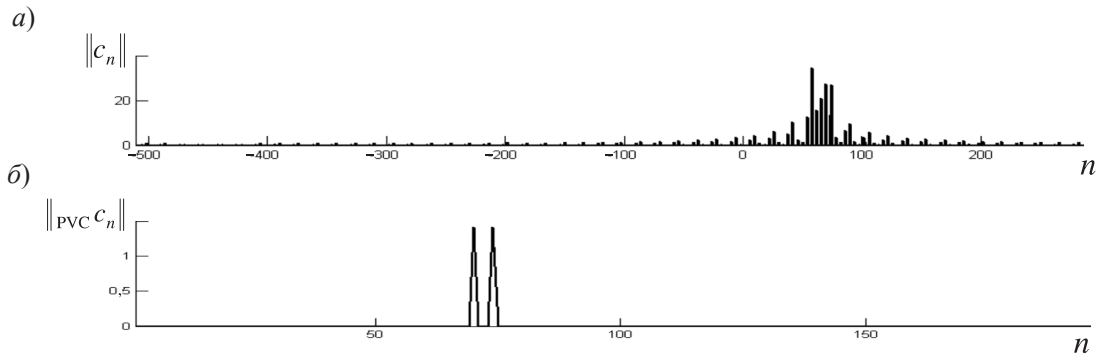


Рис. 3. Модули спектров тестовых сигналов ($\mu_1 = 4$, $\mu_2 = 64$, $p = 4$, $N = 256$, $n = 70, 74$):
а – в базисе ДЭФ; *б* – в базисе СПВКФ

Так, спектры сигналов, отличающихся только длиной n, в базисе ДЭФ будут полностью перекрываться (рис. 3 *а*), поскольку имеют одну и ту же несущую частоту и совпадающие полосы частот. В то же время в базисе СПВКФ спектры указанных сигналов полностью разделимы (рис. 3 *б*).

Таким образом, если в процессе работы радиолинии изменять параметры базиса формируемых сигналов, они становятся структурно недоступными для несанкционированных средств радиоприема.

Для базисов СПВКФ параметром, определяющим структурную скрытность, является вариативное значение $\mu(t)$. Количество базисов СПВКФ, лежащих в основе модели (4), на порядки больше чем СВКФ и ДЭФ (рис. 4).

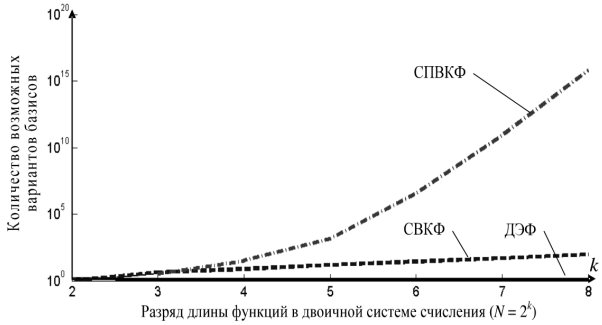


Рис. 4. Зависимость количества возможных вариантов базисов от разряда длины функций в двоичной системе счисления

Из рис. 4 видно, что для ДЭФ для любой длины функции $N = 2^k$ существует только один базис. Количество базисов ВКФ растет прямо пропорционально длине функции. А рост количества базисов СПВКФ принимает экспоненциальный характер, их количество определяется путем перебора делителей длины функции.

Особенность формируемых сигналов заключается в том, что их обработка доступна как методами гармонического анализа, так и методами СГА. Это позволяет использовать такие сигналы в существующих средствах КмВ.

Снижение пик-фактора сигналов с OFDM для более эффективного использования их в спутниковых каналах связи рассмотрено в [5].

Разработанная модель радиосигнала OFDM в СПВКФ сочетает преимущества дискретной и непрерывной форм представления, определяемых двойственной природой сплайнов. Потенциальное разнообразие базисов СПВКФ позволяет формировать множества ортогональных функций, что открывает возможность организации КмВ с высоким уровнем конфиденциальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Трахтман, А.М.** Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах [Текст] / А.М. Трахтман, В.А. Трахтман. –М.: Сов. радио, 1975.

2. **Понтрягин, Л.С.** Непрерывные группы [Текст] / Л.С. Понтрягин. –М.: Наука, 1973.

3. **Завьялов, Ю.С.** Методы сплайн-функций [Текст] / Ю.С. Завьялов, Б.И. Квасов, В.Л. Мирошниченко. –М.:Наука, 1980.

4. **Proakis, John G.** Digital communication [Текст] / John G. Proakis. – NY.: McGraw Hill, 2008.

5. **Макаров, С.Б.** Снижение пик-фактора сигналов с OFDM с помощью блочного кодирования [Текст]/ С.Б. Макаров, А.В. Рашич // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2008. –№ 3.

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

УДК 621.396.42

Ю.Б. Нечаев, А.А. Епифанцев, М.Ю. Сидоров

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТОВ В УЗКОПОЛОСНОЙ РАДИОСЕТИ

Перспективная узкополосная радиосеть представляет собой систему, обладающую функциями самоорганизации и самовосстановления, и состоит из идентичных узлов, каждый из которых сочетает в себе функции маршрутизатора и оконечного устройства. При таком варианте построения сети надежность обеспечивается благодаря высокой избыточности, выраженной в дублировании доступных путей прохождения данных. В случае, когда один из узлов отказывает, сетевой трафик может быть перенаправлен к любому другому узлу.

Реализация таких функциональных особенностей исключает возможность использования статической маршрутизации со статичными маршрутными таблицами, которые создаются вручную администратором сети и также вручную корректируются в случае произошедших изменений в топологии, т. к. подобный алгоритм приемлем либо в небольших сетях с простой топологией, либо в сетях с установившейся топологией [1]. В перспективной радиосети ДКМВ, МВ диапазона передача информации происходит с использованием ретрансляторов и различных маршрутов, что, в свою очередь, требует использования динамической маршрутизации в автоматическом режиме.

Узкополосный доступ из-за ограниченной пропускной способности затрудняет решение рассматриваемой задачи и накладывает жесткие ограничения на объем служебной информации, что не позволяет применять протоколы маршрутизации, используемые в беспроводных широкополосных сетях с ячеистой топологией [2]. Поэтому одним из основных критериев при построении протокола маршрутизации будет небольшой объем служебной информации и минимальная нагрузка на каналы связи.

Функциональные возможности перспективной узкополосной радиосети значительно расширены относительно других узкополосных радиосетей и приближаются к возможностям широкополосных систем связи. Основными возможностями перспективной системы связи являются:

самоорганизация и реконфигурация;

индивидуальный вызов;

групповой вызов;

широковещательный вызов;

режим прямой связи;

режим связи с использованием ретрансляции в автоматическом режиме;

одновременная передача речи и данных с коммутацией каналов;

одновременная передача речи и данных с коммутацией пакетов;

одновременное обслуживание нескольких абонентов;

приоритетный доступ;

приоритет информации.

Цель работы – разработка протокола маршрутизации, позволяющего адаптировать сеть к меняющейся интенсивности входного потока заявок и обеспечивающего предоставление пользователю описанного выше набора услуг в условиях сложной быстро меняющейся помеховой обстановки при наличии замираний сигналов.

Последние исследования маршрутизации в сетях радиосвязи [3, 4] показывают, что адаптировать сеть к меняющейся нагрузке и обеспечить устойчивый обмен информацией при высокой динамике топологии сети позволяет использование гибридных протоколов маршрутизации. Такие протоколы представляют собой сочетание упреждающей (проактивной) и реагирующей (реактивной) стратегий маршрутизации:

реактивный режим осуществляет построение маршрутных таблиц в узлах сети непосредственно перед передачей информации (по запросу);

проактивный режим регулярно обновляет ин-

формацию в маршрутных таблицах узлов всей сети.

Обмен информацией в беспроводной сети осуществляется кадрами с использованием выделенных частот для передачи пользовательской и служебной информации. Такая особенность предъявляет дополнительные требования к аппаратной платформе, реализация описанных функций становится возможной при использовании в станциях многоканальных приемников.

Предложенный протокол использует маршрутные таблицы, хранящиеся в каждом из узлов сети. В проактивном режиме каждая абонентская станция сети информирует других абонентов, находящихся в пределах радиовидимости, о собственных возможностях по обеспечению радиодоступа. Интервалы для передачи таблиц маршрутизации (работы проактивной части маршрутизации) выделяются в начале служебного интервала на пользовательской частоте, закрепляются за каждой станцией сети и назначаются ей из радиоданных (существует однозначное соответствие между номером станции и ID кадра). Остальная часть служебного временного интервала используется для передачи запросов к базовой станции на выделение ресурса. Использование проактивной части протокола маршрутизации позволяет получить информацию о соседях первого порядка станции, передающей таблицу связности (по 3 бита на абонента), 0 – станция не в зоне прямой видимости (не является соседом первого порядка), 1–7 – станция находится в зоне прямой видимости, величина значения показывает качество канала связи (табл. 1).

Реактивная составляющая протокола маршрутизации использует служебную частоту для построения маршрутов к абонентам, о которых не содержится актуальной информации в таблице маршрутизации станции-отправителя. Реактивная часть используется только в случаях, когда абонент имеет очередь на передачу информации и его таблица маршрутизации не содержит информации об актуальном маршруте к получателю. Пакеты запроса и ответа на запрос построения маршрута представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

На пользовательской частоте для передачи запроса на построение маршрута реализуется метод CSMA/CD (конкурентный доступ к среде с определением коллизий). Станция слушает эфир, и если канал свободен, ожидает случайное время отсрочки, затем, если канал свободен, станция начинает передачу информации [5].

Рассмотрим сеть, изображенную на рисунке.

Маршрут представляется совокупностью соединений, а качество маршрута считается равным

Таблица 1

Информационная часть пакета проактивной части протокола маршрутизации

Идентификатор пакета	A_1	A_2	…	A_N
	011	000	…	001

Таблица 2

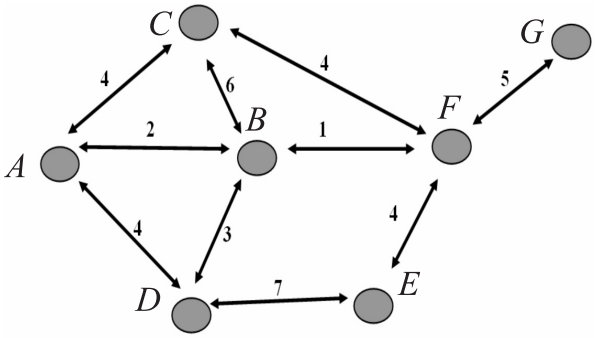
Информационная часть пакета запроса на построение маршрута реактивной части протокола маршрутизации

Идентификатор пакета	Время жизни пакета	Адрес отправителя	Адрес непосредственного получателя	Адрес получателя

Таблица 3

Информационная часть пакета ответа на запрос построения маршрута реактивной части протокола маршрутизации

Идентификатор пакета	Адрес отправителя	Адрес непосредственного получателя	Адрес получателя	Качество маршрута	Число ретрансляций



Топология рассматриваемой узкополосной сети

качеству соединения на маршруте с наименьшим показателем качества. При условии использования в сети однотипных устройств разница в качестве соединений между станциями зависит от состояния канала. Данный способ определения качества маршрута обусловлен наличием эффекта «бутылочного горлышка», когда из-за участка маршрута с наименьшей пропускной способностью скорость информационного обмена на маршруте падает до его уровня.

На основе информации, полученной от проактивной составляющей протокола маршрутизации, маршруты между соседними абонентами строятся автоматически. При вызове абонента с использованием одной ретрансляции применяется направленный запрос на установление соединения (при наличии в таблице маршрутизации актуального маршрута к получателю).

Реактивная составляющая протокола маршрутизации использует служебные частоты с заданным законом движения для построения маршрутов к абонентам, о которых не содержится актуальной информации в таблице маршрутизации станции-отправителя (табл. 4).

При построении ДКМВ сети с 10-битной адресацией (что позволяет обслуживать до 1024 абонентов) размеры пакетов служебной информации протокола не превышают 36 бит. Пакетный режим передачи данных реализуется со скоростью 2400 бит/с при использовании 16-символьного кода Рида–Соломона (в одном символе содержится 4 бита) из которых восемь символов информационные. Такой способ кодирования позволяет исправить три из восьми информационных символов. Передача пользовательской информации в сети ведется пакетами размером по 96 байт [7]. Соответственно, для построения маршрута максимальной длины (с двумя ретрансляциями) при отсутствии коллизий во время множественного

Таблица 4

Пример таблицы маршрутизации узла A для узкополосной сети, состоящей из семи узлов [6]

		Получатель					
		B	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*
Адрес следующего ретранслятора	*B*	2[1] 0[2] 12[3]	2 1 20	2 1 120	2 2 173	1 1 112	1 2 213
	C	4 1 47	4 0 7	3 2 315	4 2 321	4 1 298	4 2 255
	D	3 1 145	3 2 267	4 0 1	4 1 3	4 2 14	4 3 78
	E	-	-	-	-	-	-
	F	-	-	-	-	-	-
	G	-	-	-	-	-	-

[1] Качество маршрута.

[2] Число ретрансляторов на маршруте.

[3] Время последнего обновления маршрута, с (в случае, если по указанному маршруту не передавалось пользовательской информации, а информация о существовании маршрута получена в результате работы протокола маршрутизации, значение поля «качество маршрута» устанавливается в ∞).

доступа к разделяемой среде требуется передача 216 бит служебной информации протокола маршрутизации, что составляет 1/35 часть от передачи 10 пакетов информации пользователя при реактивном режиме работы протокола маршрутизации.

Использование при построении узкополосной радиосети предложенного протокола маршрутизации позволяет своевременно реагировать на изменение топологии сети, поддерживая актуальные маршруты между узлами сети. Возможно использование следующих режимов работы протокола при построении маршрута:

гибридный;

проактивный;

реактивный.

Особенности работы алгоритма протокола маршрутизации, и использование механизмов уменьшения объема собственной служебной информации за счет поэтапного перехода с гибридного режима на создающий меньшую нагрузку реактивный, помогают избежать излишней нагрузки на сеть, при этом предоставляя возможность принятия решения о выборе наилучшего маршрута исходя из оценки качества маршрута, числа ретрансляций, времени последнего обновления маршрута.

Наличие указанных режимов работы протокола позволяет адаптировать процедуру маршрутизации к меняющейся интенсивности входного потока заявок, динамике узлов сети, адаптировать сеть к внешним воздействиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Николаев, В.И.** Системы, сети и устройства радиосвязи [Текст] / В.И. Николаев, Ю.Б. Нечаев, В.В. Прилепский [и др.]. –Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004.– С. 321–329.

2. **Нечаев, Ю.Б.** Особенности построения узкополосной радиосети с ячеистой топологией [Текст] / Ю.Б. Нечаев, С.И. Григорьев, М.Ю. Сидоров, А.А. Епифанцев // Теория и техника радиосвязи. –2009. –№3. –С. 25–29.

3. **Вишневский, В.** Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s [Текст] / В. Вишневский, Д. Лаконцев, А. Сафонов [и др.] // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2008. –№6. –С. 64–69.

4. **Вишневский, В.М.** Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G [Текст] / В.М. Вишневский, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. –М.:Техносфера, 2009. –С. 206–212.

5. **Олифер, В.Г.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов [Текст]/ В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. –СПб.: Питер, 2006. –С. 394–395.

6. Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio systems, Appendix D [Текст] / HF Radio Networking, MIL-STD-188-141B, 1999. –P. 578.

7. **Бояршинов, М.А.** Реализация пакетной передачи данный в КВ радиостанциях с адаптацией к условиям связи [Текст] / М.А. Бояршинов, К.С. Третьяков // Матер. IX Междунар. науч.-техн. конф.: Физика и технические приложения волновых процессов. –Челябинск, 2010. –С. 229–230.

УДК 621.394./.396

В.Ю. Бабков, А.Н. Степутин

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Для оказания пользователям сотовых сетей мобильной связи таких услуг, как помощь при авариях, срочная медицинская помощь, решение специальных задач в плане розыскных мероприятий и др., требуется высокая точность определения географических координат абонентских станций и их однозначная привязка к цифровой карте местности.

Существующие методы, использующиеся в сетях мобильной связи, не обеспечивают требуемую точность позиционирования АС, необходима разработка и внедрение новых подходов без применения спутниковых систем позиционирования.

В данной статье рассматривается решение этой задачи на основе совместно функционирующих сетей мобильной связи и специальной пе-

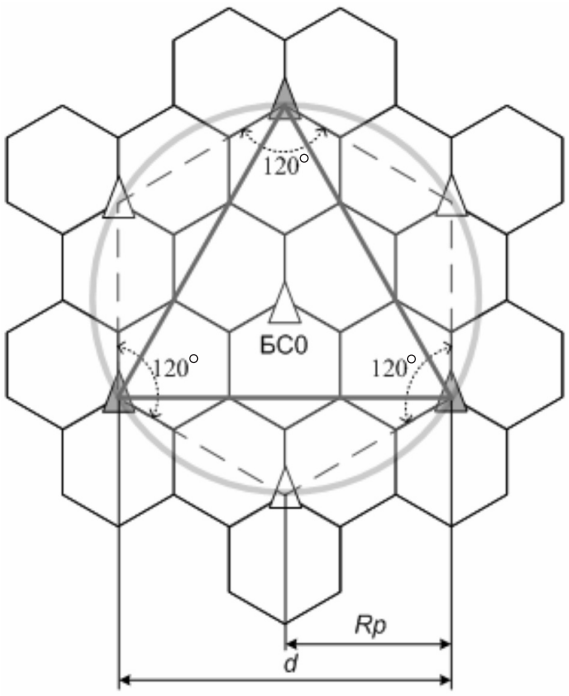


Рис. 1. Пеленгационные кластеры сети
△ – БС, ▲ – БС + ИП

ленгационной сети, измерительные пункты (ИП) которой располагаются в позиционных районах базовых станций (БС) сети мобильной связи и имеют в своем составе аналогичное базовое оборудование, адаптивные антенные устройства в виде фазированных антенных решеток (ФАР) с электронным управлением.

Задача позиционирования в функционирующих совместно сетях решается в два этапа. На первом этапе решение производится методами, реализованными в действующей сети мобильной связи, на втором этапе это решение уточняется средствами пеленгационной сети [1].

Рассмотрим возможную методику построения пеленгационной сети, наложенной на действующую сеть мобильной связи. При построении пеленгационной сети будем использовать пеленгационные кластеры, параметры которых (число ИП и их размещение по структуре сети мобильной связи) должны обеспечивать требуемые параметры позиционирования АС и минимальное число ИП в составе стационарной пеленгационной сети.

При построении пеленгационных кластеров будем полагать, что исходный фрагмент сети мобильной связи является однородным, т. е. размеры всех сот и секторов одинаковы, а морфоструктура местности однотипна.

Представим, что фрагмент сети мобильной связи соответствует базовому частотному кластеру 7/21, где 7 – число базовых станций (БС), а 21 – количество секторов в кластере [2]. Построим на этом фрагменте сети мобильной связи пеленгационный кластер (ПК) в виде структуры, в которой ИП размещены в позиционных районах БС на одинаковом расстоянии от исходной точки привязки, в качестве которой выступает БС0. Структура пеленгационного кластера зависит от секторированности ФАР в составе ИП.

Пусть в пеленгационной сети используются трехсекторные ФАР с углом сканирования 120°. Разместим ИП в позиционных районах первого кольца окружения (рис. 1).

Для обеспечения необходимой точности пеленгации необходимо иметь не менее трех пеленгационных засечек АС. Тогда зона пеленгации (ЗП) пеленгационного кластера представляет собой шестиугольник, который можно аппроксимировать окружностью с радиусом

$$R_p = 3R_i \cdot A_{\text{КО}}, \qquad (1)$$

где R_i – радиус соты; $A_{\text{КО}}$ – параметр, который показывает расположение ИП относительно БС0, значение которого определяется по формуле:

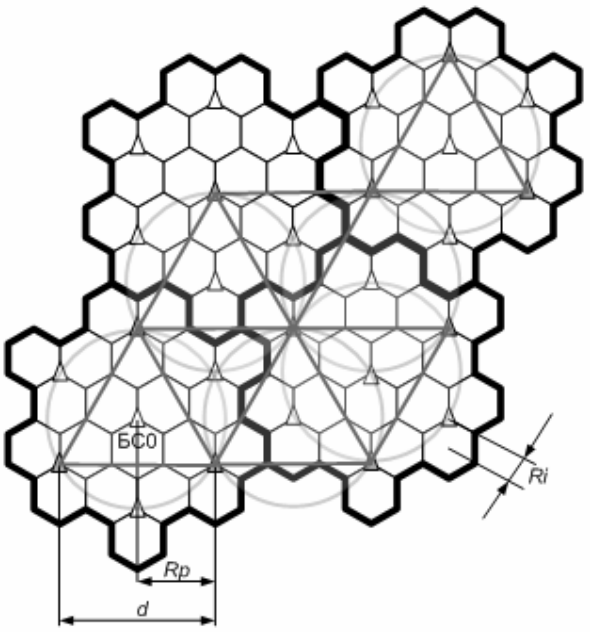


Рис. 2. Примеры построения пеленгационной сети на основе пеленгационных кластеров

Таблица 1

Основные параметры пеленгационного кластера с трехсекторными ФАР

$A_{КО}$	R_p	d	M	k
1	$3R_i$	$5{,}265R_i$	9	1/3
2	$6R_i$	$10{,}53R_i$	36	1/12
3	$9R_i$	$15{,}795R_i$	81	1/27
4	$12R_i$	$21{,}06R_i$	144	1/48

$$A_{КО} = \frac{d}{6R_i \cdot \cos 30^\circ}. \quad (2)$$

В нашем случае $A_{КО} = 1$. Расстояние между ИП определяется по формуле

$$d_{КО_120^\circ} = 6R_i \cdot \cos 30^\circ \cdot A_{КО}. \quad (3)$$

Пеленгационная сеть развертывается путем совмещения пеленгационных кластеров со структурой сети мобильной связи. Пример построения пеленгационной сети показан на рис. 2.

Основные параметры пеленгационного кластера при различных значениях $A_{КО}$ трехсекторного сценария сведены в табл. 1, где R_i – радиус соты; R_p – радиус зоны пеленгации; M – число секторов сети мобильной связи, входящих в зону пеленгации; d – расстояние между ИП; k – отношение числа ИП к числу БС.

Рассмотрим погрешность и вероятность позиционирования. *Погрешность позиционирования* АС обычно оценивается относительно истинного положения АС на местности и характеризуется величиной среднеквадратической ошибки (СКО) пеленга [3]:

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\theta_t - \theta_i)^2}{n}}, \quad (4)$$

где θ_t – действительное значение азимута на передатчик; θ_i – текущее значение азимута на передатчик, измеренное пеленгатором; n – число разовых измерений.

СКО пеленга (σ_α) и ширина диаграммы направленности пеленгационной антенны (θ_α) взаимосвязаны и зависят от метода пеленгования и отношения сигнал/шум (q) на входе пеленгационного приемника.

При оптимальных методах пеленгования и обработки сигналов в пеленгационном приемнике можно определить значение СКО по формуле [4]:

$$\sigma_\alpha = \frac{\theta_a}{\sqrt{\pi \cdot q}}, \quad (5)$$

$$q = \frac{2E}{N_0}. \quad (6)$$

где E – энергия сигнала за время измерения; N_0 – спектральная плотность мощности белого шума.

Вероятность позиционирования характеризует вероятность нахождения АС в зоне, определенной допустимой погрешностью позиционирования и зависит от местоположения АС в зоне пеленгации. Это можно пояснить, используя различные варианты размещения АС внутри зоны пеленгации пеленгационного кластера. Варианты размещения АС внутри зоны пеленгации пеленгационного кластера при $A_{КО} = 1$ показаны на рис. 3.

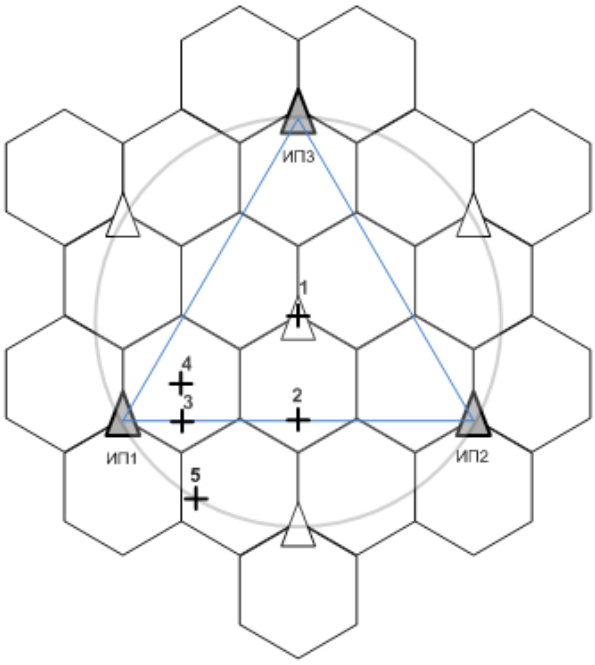


Рис. 3. Варианты размещения АС внутри зоны пеленгации

Произведем соответствующие расчеты и найдем значения погрешности и вероятности позиционирования в зависимости от среднеквадратической ошибки (СКО) пеленга и расположения АС в зоне пеленгации. Результаты расчетов приведены в табл. 2, где σ_α – СКО пеленга; $\hat{r}_{0,95}$ – значение погрешности позиционирования АС с вероятностью 95 %, нормированное к радиусу соты R_i; $A_{КО}$ – порядок кольца окружения.

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, показал следующее.

• Наименьшая погрешность позиционирования соответствует расположению АС в центре пеленгационного кластера (позиция 1). Это связано с тем, что АС находится на одинаковом удалении от ИП, и площадь, в которой находится запеленгованная АС, представляет собой ромб, что позволяет минимизировать выбросы ошибок пеленгации.

• Наибольшая погрешность позиционирования соответствует позиции 4, когда АС находится внутри пеленгационного кластера на линии, представляющей собой биссектрису между сторонами пеленгационного кластера, на расстоянии от ИП = $\frac{R_p}{3}$. Это связано с плохим геометрическим фактором, т. к. АС находится вблизи одного из ИП, а по отношению к остальным ИП находится на большом удалении, в связи с чем пеленги от удаленных ИП дают большую погрешность.

При известных характеристиках абонентского оборудования сети мобильной связи и ИП (GSM-1800) произведем оценку электромагнитной доступности АС [2]. В качестве пеленгационных антенн ИП используем адаптивные ФАР с коэффициентом усиления 24 дБи. Передатчик АС на момент пеленгования выводится на максимальную мощность $P_{из}$ = 30дБм.

Таблица 2

Значения погрешностей позиционирования (нормированных к радиусу соты) в зависимости от СКО пеленга, значения $A_{КО}$ и расположения АС в зоне пеленгации

Позиция	σ_α, град	Погрешность позиционирования, $\hat{r}_{0,95}$			
		$A_{КО}$ = 1	$A_{КО}$ = 2	$A_{КО}$ = 3	$A_{КО}$ = 4
1	1	0,06	0,12	0,18	0,25
	2	0,12	0,25	0,37	0,49
	4	0,25	0,49	0,74	0,98
	6	0,37	0,74	1,11	1,47
2	1	0,09	0,18	0,27	0,36
	2	0,18	0,36	0,54	0,72
	4	0,36	0,72	1,07	1,43
	6	0,54	1,07	1,61	2,15
3	1	0,1	0,2	0,3	0,39
	2	0,2	0,39	0,59	0,79
	4	0,39	0,79	1,18	1,57
	6	0,59	1,18	1,77	2,36
4	1	0,13	0,26	0,39	0,26
	2	0,26	0,52	0,78	1,04
	4	0,52	1,04	1,56	2,08
	6	0,78	1,56	2,34	3,12
5	1	0,11	0,21	0,32	0,42
	2	0,21	0,42	0,63	0,84
	4	0,42	0,84	1,26	1,68
	6	0,63	1,26	1,9	2,53

Результаты расчета электромагнитной доступности (d) АС средствами пеленгационной сети показывают, что в центре города d = 4,5 км, в пригороде – 6 км, а в сельской местности – 35 км. Используя результат, приведенный в табл. 2, можно сделать вывод о том, что в условиях центра мегаполиса при радиусе соты R_i = 216 м ИП могут находиться максимум на четвертом КО, в пригороде (при R_i = 577 м) – на втором КО, а в условиях сельской местности (при R_i = 6736 м) – в позиционных районах размещения БС.

Рассчитанные значения погрешностей позиционирования в зависимости от СКО пеленга и расстояния между ИП для различных топологий местности приведены в табл. 3, где $r_{0,9}$ и $r_{0,7}$ – ошибка пеленгации с вероятностью 90 и 70 % соответственно; d – расстояние между ИП; R_i – радиус соты; $A_{КО}$ – порядок кольца окружения; σ_α – СКО пеленга.

Таким образом, можно сделать вывод, что значение параметра $A_{КО}$ зависит от нескольких факторов, основными из которых являются:

электромагнитная доступность АС сети мобильной связи средствами пеленгационной сети;

тип местности;

требуемая точность позиционирования АС.

Алгоритм позиционирования АС предполагает позиционирование за счет средств мобильной сети и, далее, за счет средств наложенной пеленгационной сети. При этом часть площади зоны, принадлежащей другому сектору, отбрасывается и, тем самым, возрастает вероятность позиционирования АС.

Таблица 3

Погрешность позиционирования в зависимости от СКО пеленга, расстояния между ИП и топологии местности

Тип местности	d, км	R_i, м	$A_{КО}$	Погрешность позиционирования, м							
				$\sigma_\alpha = 1°$		$\sigma_\alpha = 2°$		$\sigma_\alpha = 4°$		$\sigma_\alpha = 6°$	
				$r_{0,9}$	$r_{0,7}$	$r_{0,9}$	$r_{0,7}$	$r_{0,9}$	$r_{0,7}$	$r_{0,9}$	$r_{0,7}$
Крупный город	1	192	1	17	15	35	30	70	60	105	90
		96	2								
		64	3								
		48	4								
	2	385	1	34	30	70	60	140	120	210	180
		192	2								
		128	3								
		96	4								
	3	577	1	51	45	105	90	210	180	315	270
		289	2								
		192	3								
		144	4								
	4	770	1	68	60	140	120	280	240	420	360
		385	2								
		257	3								
		192	4								
Средний город	5	962	1	85	75	175	150	350	300	525	450
		481	2								
	6	1155	1	102	90	210	180	420	360	630	540
		577	2								
Сельская местность	35	6736	0	595	525	1225	1005	2450	2100	3675	3150

Таблица 4

Погрешность позиционирования в зависимости от СКО пеленга, расстояния между ИП и топологии местности

d, км	Погрешность позиционирования, м							
	$\sigma_\alpha = 1°$		$\sigma_\alpha = 2°$		$\sigma_\alpha = 4°$		$\sigma_\alpha = 6°$	
	$r_{0,9}$	$r_{0,7}$	$r_{0,9}$	$r_{0,7}$	$r_{0,9}$	$r_{0,7}$	$r_{0,9}$	$r_{0,7}$
0,1	1,7	1,5	3,5	3	7	6	10,5	9
0,2	3,4	3	7	6	14	12	21	18
0,4	6,8	6	14	12	28	24	42	36
0,6	10,2	9	21	18	42	36	63	54
0,8	13,6	12	28	24	56	48	84	72

Произведенные расчеты показывают, что уточняющие свойства Cell-ID особо актуальны для случаев $A_{КО} = 3$ и 4, СКО пеленга 4, 6 градусов и более, при расположении АС от края соты на расстоянии $0…0{,}6R_i$, причем уточняющие свойства Cell-ID тем больше, чем ближе АС находится к границе соты.

Повышение точности позиционирования за счет использования данных о Cell-ID проявляется в большей степени при удалении АС от центра пеленгационного треугольника и становится максимальным для случая наихудшей геометрии, когда АС находится внутри пеленгационного кластера на линии, представляющей собой биссектрису между сторонами пеленгационного кластера, на расстоянии от ИП = $\frac{R_p}{3}$.

Знание сектора, в котором находится АС, позволяет фильтровать сильно искаженные пеленги, что, в свою очередь, уменьшает вероятность ошибочного позиционирования АС.

Таким образом, если всю территорию внутри зоны пеленгации разбить на секторы, соответствующие секторам сети мобильной связи, внутри которых ошибка пеленгации практически одинакова, то это позволит пеленгационной сети осуществлять позиционирование АС с заранее известной погрешностью.

Для повышения точности позиционирования при больших значениях $A_{КО}$ в отдельных случаях возможно использовать мобильные измерительные пункты дополнительно к стационарным пеленгаторам сети.

Мобильный измерительный пункт (МИП) – это мобильный пеленгатор, предназначенный для уменьшения погрешности позиционирования АС, либо для расширения зоны действия стационарных ИП в тех случаях, когда по каким-либо причинам их установка не является целесообразной. Принцип функционирования МИП и его взаимодействие с сетью мобильной связи рассмотрены в [5].

Результаты расчетов погрешности позиционирования для случаев применения МИП приведены в табл. 4. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что применение МИП в среднем на порядок уменьшает погрешность позиционирования АС по отношению к той погрешности позиционирования, которую обеспечивают стационарные ИП.

Таким образом, предложенный метод позволяет повысить вероятность позиционирования АС с заданной точностью. Использование данных о местоположении АС средствами сети мобильной связи и мобильных измерительных пунктов способствует уменьшению погрешности позиционирования в среднем на порядок по отношению к той погрешности позиционирования, которую обеспечивают стационарные ИП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Степутин, А.Н.** Принципы построения и функционирования наложенной пеленгационной сети [Текст] / А.Н. Степутин // Естественные и технические науки. – 2011. – №2.

2. **Бабков, В.Ю.** Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование: Учебн. пособие для

вузов [Текст] / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк, П.А. Михайлов. –2-е изд., испр. –М.: Горячая линия–Телеком, 2007. –224 с.

3. **Дотолев, В.Г.** Итоги международного эксперимента в ВЧ диапазоне [Текст] / В.Г. Дотолев, А.У. Жильцов, А.Н. Курганов [и др.] // Тр. НИИР. –2003. –С. 30–40.

4. **Levanon, Nadav.** Radar Principles [Текст]/ Levanon, Nadav. –Wiley Interscience, 1988.

5. **Степутин, А.Н.** Патент на П.М. № 93545 РФ G01S 5/02. Система определения местоположения мобильных объектов [Текст] / А.Н. Степутин. –№ 2009148483/22.

УДК 681.3 (075.8)

Н.В. Ростов

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА МЕТОДАМИ ПРЯМОГО И КОСВЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В микропроцессорных САУ наряду с типовыми ПИ-, ПД- и ПИД-регуляторами широкое применение находят последовательные регуляторы (ПР) высокого порядка (рис. 1), в передаточной функции которых $D(z) = G(z) / H(z)$ полиномы $G(z) = \sum_{i=1}^{m} g_i z^{i-1}$ и $H(z) = z^{m-1} + \sum_{i=1}^{m-1} h_i z^{i-1}$ имеют степень $(m - 1)$, где m – порядок модели объекта управления (ОУ). Процедуры синтеза таких регуляторов алгебраическим методом размещения полюсов рассмотрены в [1, 2]. Но на практике синтезированные параметры $\{g_i, h_i\}$ часто не обеспечивают желаемых показателей качества замкнутой системы из-за их зависимости не только от полюсов, но и от нулей, а также от нелинейностей, присущих реальным САУ.

В [4] предложены технологии оптимизации ПР итерационными методами по скалярным интегральным критериям, оцениваемым по нелинейной дискретно-непрерывной модели САУ с учетом ограничения выхода регулятора $|u[n]| \le U_{\max}$. Так как число параметров регулятора $(2m - 1)$ достаточно велико и их значения варьируются в широких пределах, было рекомендовано проводить оптимизацию в пространстве полюсов замкнутой САУ, совмещая ее с алгебраическим синтезом. Однако однокритериальная оптимизация сопряжена с субъективностью задания весовых коэффициентов интегрального критерия, поэтому получаемые настройки регулятора могут оказываться не лучшими с технической точки зрения. Более корректным является многокритериальный (МК) подход к оптимизации, позволяющий осуществлять Парето-настройку параметров регулятора с учетом предельно достижимых динамических возможностей САУ.

Ниже предлагается методика МК-оптимизации цифровых ПР высокого порядка методами зондирования с применением генетического алгоритма. При этом основное внимание уделяется повышению эффективности процесса оптимизации за счет совмещенного алгебраического синтеза и анализа устойчивости замкнутой САУ в генерируемых узлах сетки с целью исключения циклов моделирования в узлах с неустойчивой и нежелательной динамикой.

Постановка задачи векторной оптимизации

Конкретные постановки задач МК-оптимизации определяются выбором частных критериев. Например, векторный критерий может быть совокупностью интегральных квадратичных оце-

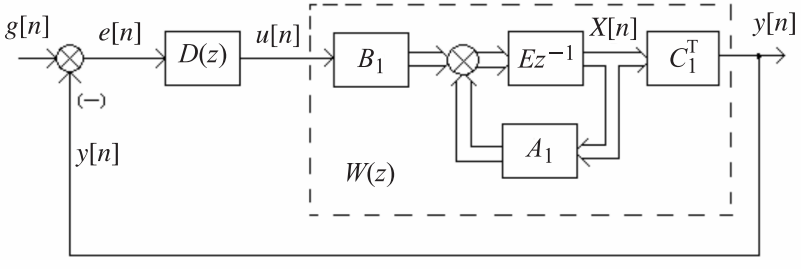


Рис. 1. САУ с цифровым ПР

нок, вычисляемых при любом характере переходного процесса в САУ:

$$F(\theta) = [(1/N)\sum_{n=0}^{N} e^2[n],\ \ (1/N)\sum_{n=0}^{N} u^2[n]]\,, \quad (1)$$

где $\theta = (g_1, ..., g_m, h_1, ..., h_{m-1})^{\mathrm{T}}$ – вектор оптимизируемых параметров регулятора; $e[n] = g[n] - y[n]$ – ошибка системы; $u[n]$ – управляющее воздействие. Первый частный критерий характеризует динамику процесса в целом, а второй – оценивает энергозатраты на управление.

Можно также использовать прямые показатели качества САУ, такие, как время переходного процесса $t_{\text{П}}$ и перерегулирование σ:

$$F(\theta) = [t_{\text{П}}(\theta),\ \ \sigma(\theta)]^{\mathrm{T}}, \quad (2)$$

но они не всегда могут быть определены по результатам моделирования.

В общем случае можно комбинировать в векторном критерии интегральные оценки с прямыми показателями качества:

$$F(\theta) = (\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N} e^2[n]\ ,\ \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N} u^2[n],\ t_{\text{П}},\ \sigma)^{\mathrm{T}}. \quad (3)$$

На практике МК-оптимизацию рекомендуется проводить, используя *два векторных критерия* разных типов. Критерий вида (1) из квадратичных оценок целесообразно использовать в качестве рабочего при зондировании для генерирования узлов в окрестности искомой Парето-границы. По критерию вида (2), составленному из прямых показателей, также оцениваемых в процессе зондировании, следует осуществлять отбор альтернативных вариантов Парето-решений. Выбор окончательного варианта Парето-решения необходимо производить по обоим критериям с учетом требований технического задания и предпочтений лица, принимающего решение (проектировщика).

Эффективность проведения МК-оптимизации во многом зависит от используемых методов поиска Парето-решений. Наиболее часто применяют методы свертки векторного критерия [3, 6], либо зондирование на сетке значений в пространстве параметров регулятора. Однако прямое зондирование неэффективно по затратам машинного времени и не гарантирует устойчивости САУ в узлах. Совмещенное с синтезом зондирование в пространстве полюсов может осуществляться в области устойчивости САУ. При косвенном зондировании по условию устойчивости цифровой САУ узлы-полюса следует формировать на комплексной плоскости внутри круга единичного радиуса. При этом должны варьироваться и вещественные, и мнимые части полюсов.

Зондирование можно проводить на многомерных регулярных или случайных сетках, выделяя узлы, образующие Парето-границу в пространстве частных критериев, и определяя соответствующие Парето-множества полюсов и значений параметров регулятора. Оценивание частных критериев при зондировании следует осуществлять по результатам анализа динамики цифровой САУ по ее дискретно-непрерывной модели, учитывающей ограничение выхода регулятора и другие нелинейности, присущие реальным системам, иначе МК-оптимизация может терять практический смысл.

Зондирование с применением генетического алгоритма и анализом устойчивости

Прямое зондирование на сетке в $(2m - 1)$-мерной области значений параметров регулятора, заданной их ограничениями

$$\{g_{i\min} \le g_i \le g_{i\max},\ i = \overline{1,m}\};$$

$$\{h_{i\min} \le h_i \le h_{i\max},\ i = \overline{1,m-1}\}$$

сопряжено с большими затратами машинного времени на моделирование. Например, если шаг сетки каждого из параметров составляет 10 % диапазона его изменения, то общее количество узлов сетки будет равно 10^{2m-1}. Следовательно, для пяти параметров (при $m = 3$) потребуется сто тысяч циклов моделирования. Значительно более эффективно зондирование (рис. 2) с использованием генетического алгоритма (ГА), направленное на построение Парето-границы [7].

Рис. 2. Схема процесса МК-оптимизации с прямым зондированием

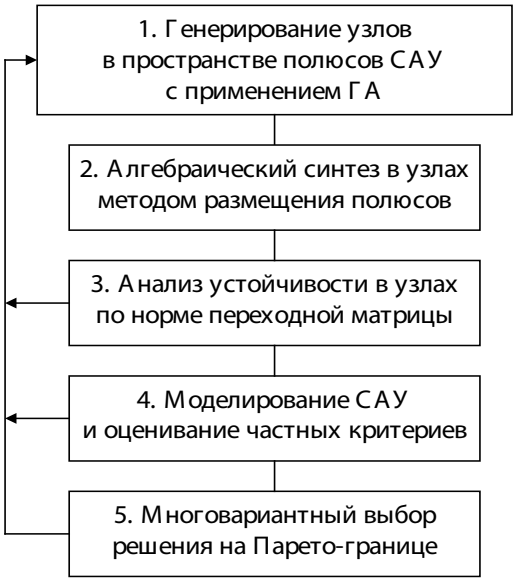


Рис. 3. Схема процесса МК-оптимизации с косвенным зондированием

При косвенном зондировании (рис. 3) узлами сетки являются вещественные и мнимые части полюсов, общее количество которых также равно $(2m - 1)$. Однако если совмещенный алгебраический синтез проводить по специальным методикам, описанным в [4], то пространство размещаемых полюсов можно сократить до m.

С алгоритмической точки зрения наиболее эффективным критерием анализа устойчивости результатов синтеза в узлах зондирования является критерий нормы переходной матрицы замкнутой системы [1, 5]. Для цифровой (дискретной) САУ устойчивость обеспечивается, если

$$\varepsilon_{\min} \le \left\| A_{\text{зам}}^{N_{\text{end}}} \right\| \le \varepsilon_{\max} < 1, \qquad (4)$$

где $A_{\text{зам}}$ – матрица замкнутой САУ; $N_{\text{end}} = T_{\text{end}} / T_0$ – число тактов (периодов дискретности T_0) переходного процесса; $\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}$ – параметры, задающие запасы устойчивости.

Вычисление переходной матрицы в критерии (4) целесообразно производить по рекуррентному алгоритму быстрого возведения в степень:

$$A^{2^k} = A^{2^{k-1}} \cdot A^{2^{k-1}},$$

где $k = 1, \ldots, N$; $N = \text{round}(\ln(T_{\text{end}}/T_0))$; $N_{\text{end}} = 2^N$.

При асимптотической устойчивости норма переходной матрицы стремится к нулю, а на границе устойчивости ее значения колеблются в диапазоне от 1 до 2. Невыполнение неравенств (4) будет происходить в случаях переходного процесса в САУ со слишком малым или чрезмерно большим запасом устойчивости.

Многовариантный выбор настройки параметров регулятора осуществляется из узлов, которым соответствует Парето-граница в пространстве частных критериев. Выбираемое решение должно в наибольшей степени удовлетворять требованиям технического задания и предпочтениям проектировщика. При отсутствии таких решений осуществляется возврат к первому этапу для расширения области зондирования и повторения процедур на последующих этапах.

Генетический алгоритм является стохастической эволюционной процедурой, поэтому генерируемые узлы в окрестности Парето-границы неоднозначны, а затраты машинного времени на ее выделение обычно оказываются довольно значительными. Анализ устойчивости, совмещенный с процедурой ГА, позволяет существенно сократить общее число циклов моделирования САУ.

Вычисление матрицы замкнутой системы

При анализе устойчивости по критерию (4) необходимо многократно вычислять в узлах зондирования матрицу замкнутой цифровой САУ, которая в случае ОУ m-го порядка и регулятора $(m–1)$-го порядка имеет следующий вид:

$$A_{\text{зам}} = \begin{bmatrix} A_1 - B_1 D_2 C_1^{\text{T}} & B_1 C_2^{\text{T}} \\ -B_2 C_1^{\text{T}} & A_2 \end{bmatrix},$$

где A_1 – $m \times m$-матрица; B_1 – m-вектор-столбец; C_1^{T} – m-вектор-строка дискретной канонической векторно-матричной модели ОУ в форме управляемости (см. рис. 1); A_2 – $(m-1) \times (m-1)$-матрица; B_2 – $(m-1)$-вектор-столбец; C_2^{T} – $(m-1)$-вектор-строка; D_2 – скалярный параметр канонической векторно-матричной модели последовательного регулятора, соответствующей его дискретной передаточной функции $D(z)$.

В частности, для ОУ третьего порядка и регулятора с передаточной функцией второго порядка

$$D(z) = \frac{g_3 z^2 + g_2 z + g_1}{z^2 + h_2 z + h_1}$$

имеем:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 \end{pmatrix};$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \; C_1^{\text{T}} = (b_1 \quad b_2 \quad b_3);$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -h_1 & -h_2 \end{pmatrix};\ B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$C_2^{\mathrm{T}} = (g_1 - g_3 h_1 \quad g_2 - g_3 h_2);\ D_2 = g_3.$$

При этом матрица замкнутой САУ принимает следующий вид:

$$A_{\text{зам}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -g_3 b_1 - a_1 & -g_3 b_2 - a_2 & -g_3 b_3 - a_3 & g_1 - g_3 h_1 & g_2 - g_3 h_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -b_1 & -b_2 & -b_3 & -h_1 & -h_2 \end{pmatrix},$$

где (a_i , b_i) – коэффициенты полиномов знаменателя и числителя дискретной передаточной функции объекта управления $W(z)$.

Примеры векторной оптимизации

Осуществим оптимизацию по критериям (1) и (2) цифровой следящей системы с ОУ третьего порядка

$$W(s) = \frac{K}{(T^2 s^2 + 2\xi T s + 1)s},$$

где $K = 50$; $T = 0,05$ с; $\xi = 0,707$. Период дискретности T_0 = 0,005 с, а ограничение выхода регулятора $U_{\max}$ = 10. Зададим также время моделирования T_{end} = 0,3 с и значения параметров $\varepsilon_{\min} = 0,01$; $\varepsilon_{\max} = 0,99$, определяющих желаемые запасы устойчивости.

Пример 1. Прямое зондирование 5-мерного пространства параметров проведем в ограниченной области, включающей в себя точку с начальными значениями параметров, найденными методом размещения полюсов, при которых переходный процесс в САУ имеет довольно большое перерегулирование:

$$\theta_{\min} = [15 \quad -37 \quad 19 \quad 0,35 \quad -1,5];$$
$$\theta_{\max} = [18 \quad -34 \quad 22 \quad 0,60 \quad -0,9].$$

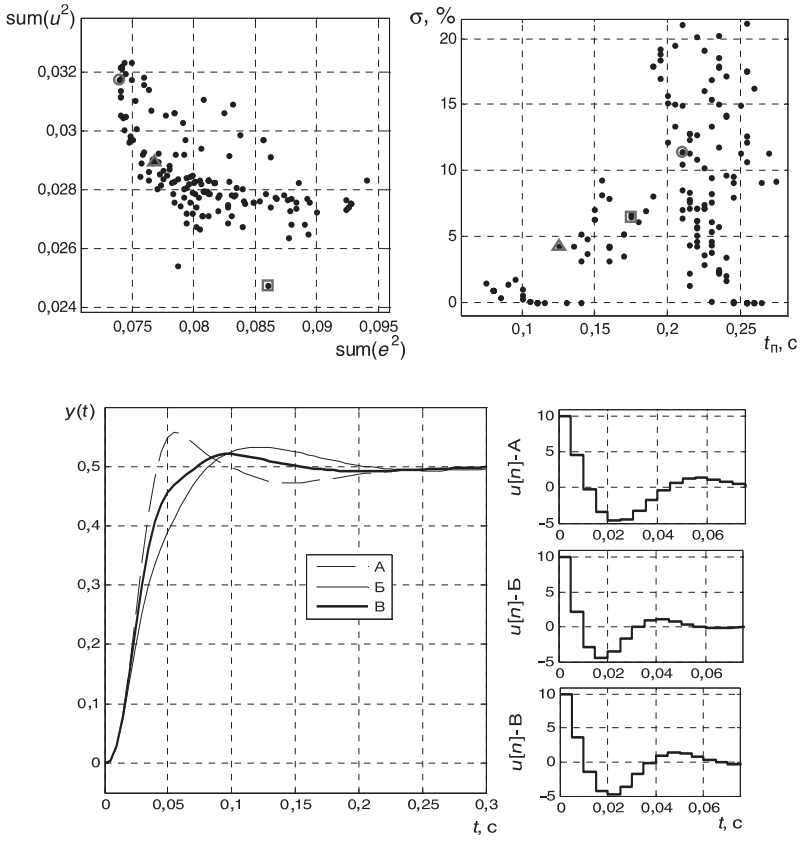


Рис. 4. Парето-оптимальные процессы, полученные при прямом зондировании

В процессе зондирования из 466 узлов, сгенерированных генетическим алгоритмом, было проведено только 171 циклов моделирования САУ с оценками критериев, представленными на рис. 4. Тремя разными маркерами отмечены Парето-оптимальные по критерию (1) варианты решений, которым соответствуют кривые переходных характеристик и управляющих воздействий, обозначенные буквами А, Б и В. Для этих вариантов параметры регулятора имеют следующие значения:

	$g1$	$g2$	$g3$	$h1$	$h2$
А:	16,3662	–36,5683	20,4316	0,5448	–1,2400;
Б:	16,7801	–36,5694	20,0579	0,4821	–1,0425;
В:	16,7362	–36,5923	20,0925	0,5446	–1,1892.

Заметим, что по критерию (2) выбранные варианты не являются Парето-оптимальными.

Пример 2. Косвенное зондирование проведем внутри круга единичного радиуса в пространстве пяти полюсов

$$\{\mathrm{Re}\,\gamma_1, \mathrm{Re}\,\gamma_2 + j\,\mathrm{Im}\,\gamma_3, \mathrm{Re}\,\gamma_2 - j\,\mathrm{Im}\,\gamma_3, \mathrm{Re}\,\gamma_4 + j\,\mathrm{Im}\,\gamma_5, \mathrm{Re}\,\gamma_4 - j\,\mathrm{Im}\,\gamma_5\}$$

в ограниченной области их вещественных и мнимых частей:

$$\theta_{\min} = [\,0{,}75 \quad 0{,}75 \quad 0 \quad 0{,}75 \quad 0];$$

$$\theta_{\max} = [0{,}95 \quad 0{,}95 \quad 0{,}2 \quad 0{,}95 \quad 0{,}2].$$

В процессе зондирования с совмещенным синтезом из 466 сгенерированных генетическим алгоритмом узлов было проведено 359 циклов моделирования САУ с оценками критериев, представленными на рис. 5. Тремя разными маркерами отмечены Парето-оптимальные по критерию (2) варианты решений, которым соответствуют кривые переходных характеристик и управляющих воздействий, обозначенные буквами А, Б и В. Для этих вариантов параметры регулятора имеют следующие значения:

	$g1$	$g2$	$g3$	$h1$	$h2$
А:	2,7374	–5,8819	3,1741	0,5668	–1,4708;
Б:	2,9444	–6,3424	3,4308	0,5624	–1,4626;
В:	4,3456	–9,3597	5,0616	0,5216	–1,3920.

Заметим, что по критерию (1) выбранные варианты также являются Парето-оптимальными.

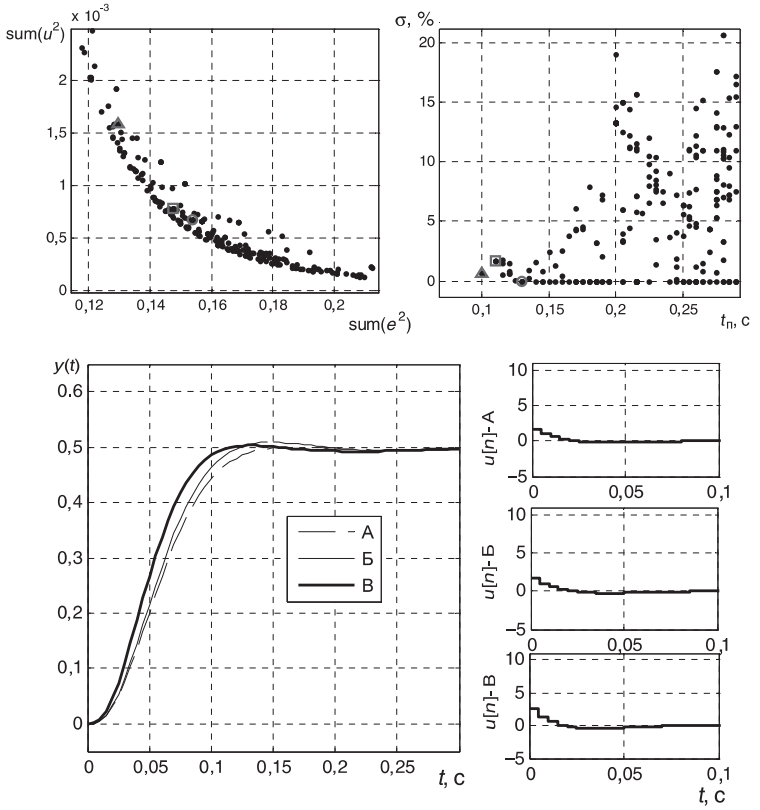


Рис. 5. Парето-оптимальные процессы, полученные при косвенном зондировании

Таким образом, показано, что МК-оптимизацию цифровых ПР высокого порядка можно эффективно проводить с использованием ГА, осуществляя прямое зондирование или косвенное зондирование в пространстве полюсов с совмещенным алгебраическим синтезом в узлах. В обоих случаях рекомендовано анализировать устойчивость в узлах зондирования по критерию нормы переходной матрицы и исключать моделирование САУ в узлах с заведомо нежелательной динамикой. При этом затраты машинного времени на проведение зондирования значительно сокращаются.

Для исключения статических ошибок в САУ с последовательными регуляторами их МК-оптимизацию следует проводить с обеспечением астатизма, используя соответствующую методику алгебраического синтеза, изложенную в [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

1. **Куо, Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления [Текст] / Б. Куо; пер. с англ. –М.: Машиностроение, 1986. –448 с.

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

4. **Ростов, Н.В.** Синтез и компьютерная оптимизация цифровых последовательных регуляторов высокого порядка [Текст] / Н.В. Ростов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 4. –С. 53–58.

5. **Ростов, Н.В.** Технологии многокритериальной оптимизации цифровых модальных регуляторов [Текст] / Н.В. Ростов // Сб. науч. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. Системный анализ в проектировании и управлении, Ч. 2. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –С. 187–190.

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

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

УДК 004.896

К.А. Аксенов, А.С. Антонова

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ

Предприятия, выполняющие единичные заказы, а также предприятия, занимающиеся мелкосерийным и серийным производством, сталкиваются с задачей управления проектами (портфелем проектов) [1]. Под управлением проектом будем понимать деятельность, направленную на реализацию проектов с максимально возможной эффективностью при заданных ограничениях по времени, денежным средствам, трудовым и материальным ресурсам, а также качеству конечных результатов проекта. Лицо, принимающее решения (ЛПР), выполняет следующие функции управления проектами: 1) планирование проектов с построением графика работ и распределением ресурсов по отдельным работам с учетом ограничений; 2) определение отклонений от выполнения плана проекта и координация ресурсов с целью повышения эффективности реализации проектов. Рассмотрим автоматизацию труда ЛПР с использованием имитационного моделирования (ИМ), реактивно-интеллектуальных агентов (РИА) и технологии интеллектуальных агентов.

Постановка задачи

Рассмотрим проектную деятельность предприятия ЗАО «Телесистемы» (www.telesystems.info), реализующего портфель проектов с помощью следующих отделов: проектного (ПО), состоящего из шести человек, производственного (ПрО), состоящего из восьми человек, и материально-технического обеспечения (ОМТО), состоящего из одного человека. Формализуем процесс исполнения проектов с помощью модели мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР) [2], поддерживающей анализ динамических характеристик исследуемой системы. В качестве агентов МППР используем РИА, в основе которых лежат продукции вида «Если-То», позволяющие аккумулировать опыт экспертов в предметной области по диагностированию внешних ситуаций и выработке решений. Кроме того, РИА применяются для описания отдельных элементов модели МППР с целью обеспечения простоты программной реализации модели.

Разработка модели исполнения портфеля проектов выполнялась в системе динамического моделирования ситуаций (СДМС) BPsim.MAS [2], поддерживающей описание модели МППР на реактивно-интеллектуальных агентах, проведение экспериментов с моделью и формирование статистики по экспериментам.

Разрабатываемая модель предназначена для оценки за календарный период загрузки трудовых ресурсов предприятия (отделов), объема и стоимости привлекаемых субподрядных работ, планирования сроков начала работ по проектам с целью уменьшения объема привлекаемого субподряда и увеличения загрузки отделов.

Входной информацией для модели является анализируемый портфель проектов, при этом отдельные проекты портфеля представлены набором следующих параметров:

название проекта;

даты начала и окончания проекта;

перечень операций проектных и производственных работ проекта;

длительность проектных и производственных работ (с разбивкой на длительности отдельных операций работ);

трудозатраты на проектные и производственные работы в человеко-днях (далее – ч.-д.) (с разбивкой на трудозатраты по отдельным операциям работ).

На выходе модели необходимо оценить функ-

ционирование процессов исполнения портфеля проектов за требуемый календарный период по следующим параметрам:

текущая загруженность отделов предприятия в процентах;

текущее количество свободных людей отделов (текущий простой отделов);

общий простой отделов за период;

количество ч.-д. субпоряда на каждый проект с разбивкой на операции проекта;

суммарное количество ч.-д. субподряда на каждый проект и на портфель проектов;

стоимость ч.-д. субподряда по портфелю проектов.

Интервал моделирования – 1 г. 3 мес. (430 дней) для оценки субподрядных работ по портфелю проектов.

Выбор способа реализации распределения ресурсов в модели

Существует несколько вариантов реализации в модели распределения трудовых ресурсов (собственных и субподрядных) по проектам портфеля, отличающихся по достоверности получаемых результатов и простоте программной реализации в модели. Рассмотрим описание этих вариантов на примере портфеля проектов, состоящего из двух проектов: P_1 и P_2. Входная информация по проектам представлена на рис. 1 в виде диаграммы Ганта (верхний график): по проекту P_1 длительность два дня, трудозатраты 16 ч.-д. (в среднем восемь человек в день); по проекту P_2 длительность три дня, трудозатраты 6 ч.-д. (в среднем два человека в день). Рассмотрим для данного примера отдел исполнения проектов, состоящий из восьми человек. Тогда при условии наложения сроков выполнения проектов возникает превышение доступности трудовых ресурсов на предприятии (второй день по диаграмме Ганта). Опишем варианты распределения ресурсов с помощью графика свободных ресурсов (количества человек) предприятия с отражением объема привлекаемого в день субподряда (рис. 1, нижний график).

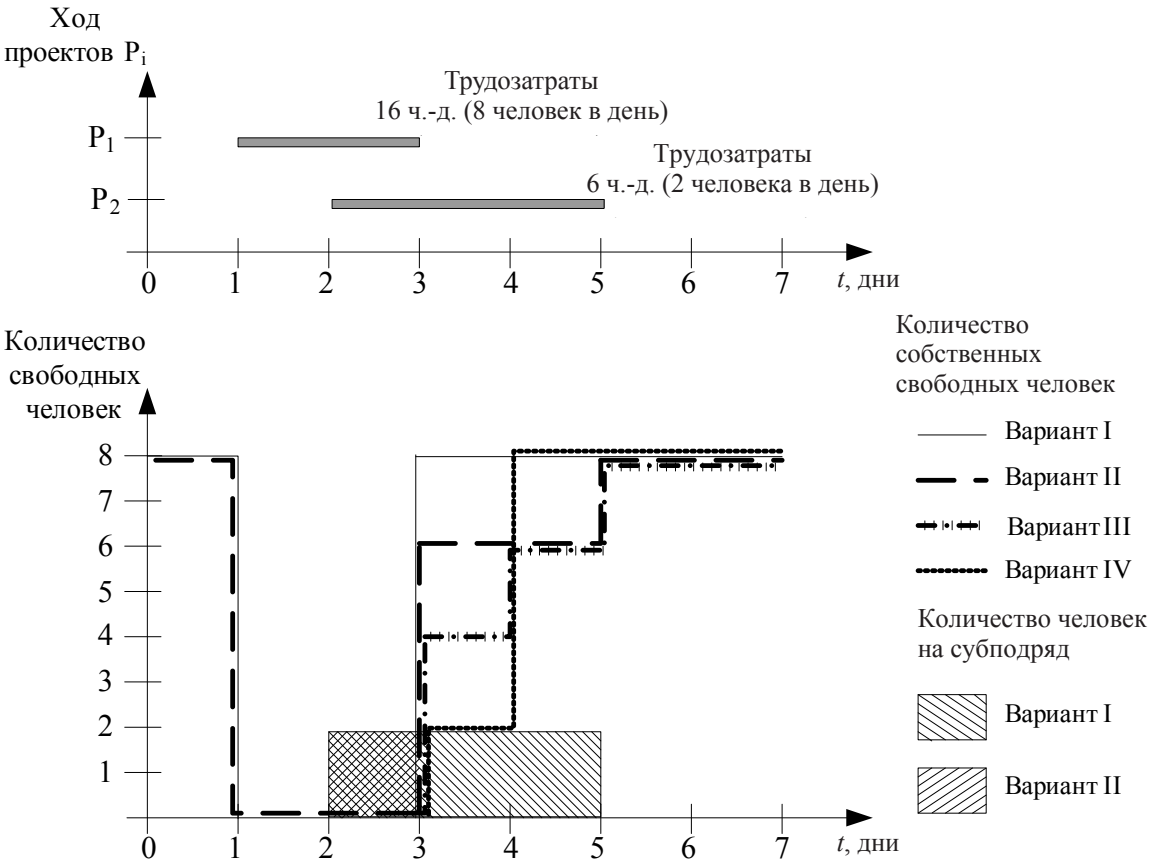


Рис. 1. Варианты распределения ресурсов по проектам

Вариант I: *перераспределение ресурсов при начале очередного проекта (этапа проекта) без компенсации возникающего субподряда.*

В данном варианте анализ количества свободных ресурсов и их распределение по работам происходит в начале каждой работы (проекта, этапа проекта, операции).

При использовании варианта I в примере на рис. 1 возникает самый большой объем субподряда – 6 ч.-д., т. е. весь проект P_2 отдается на субподряд, несмотря на то, что на третий день освобождаются собственные ресурсы. Данный вариант наиболее прост в реализации и наименее достоверен по получаемой загрузке и объему субподряда.

Вариант II: *перераспределение ресурсов каждый день без компенсации субподряда.*

В данном варианте анализ количества свободных ресурсов и их распределение по работам происходит каждый день. При использовании данного варианта субподряд возникает на второй день в размере 2 ч.-д. На третий день освобождаются собственные ресурсы, которые и используются для выполнения проекта P_2 (третий и четвертый дни), при этом субподряд в эти дни не возникает.

Вариант III: *перераспределение ресурсов каждый день с компенсацией субподряда.*

Компенсация возникающего при реализации варианта II субподряда заключается в перераспределении трудозатрат, отнесенных на субподряд, на собственные свободные ресурсы при наличии таковых в следующий день за днем возникновения субподряда. В рассматриваемом примере при использовании варианта III субподряд объемом 2 ч.-д. компенсируется на третий день с использованием собственных ресурсов, при этом на второй день субподряда не возникает.

Вариант IV: п*ерераспределение ресурсов каждый день с работой на опережение и компенсацией субподряда.*

Работа на опережение заключается в максимальном использовании каждый день имеющихся свободных ресурсов на выполнение начатых работ (проектов, этапов проекта, операций). В рассматриваемом примере субподряд компенсируется как в варианте III на третий день, и в этот же день за счет имеющихся ресурсов отдела досрочно завершается проект P_2. В результате на четвертый день все ресурсы отдела освобождаются и их можно использовать при планировании следующих работ.

Сравним рассмотренные варианты распределения ресурсов при планировании работ с помощью оценки выходных характеристик процесса исполнения портфеля проектов за период с первого по пятый день (табл. 1).

Как следует из таблицы, наиболее эффективными по общей загрузке ресурсов предприятия и объему субподряда оказываются варианты III и IV. Тем не менее, данные варианты по сравнению с вариантами I и II обладают существенно большей сложностью реализации в модели МППР, поскольку используемый в них механизм компенсации субподряда требует разработки методов прогнозирования изменения объема свободных ресурсов предприятия.

Использованию модели с распределением ресурсов на основе варианта IV эквивалентно использование модели с распределением ресурсов по варианту II в контуре обратной связи на основе технологии интеллектуальных агентов [1]. Данная технология легла в основу разработанного интеллектуального агента планирования (ИАП). На рис. 2 в графической нотации IDEF0 представлен контур поиска эффективного решения планирования сроков работ с использованием разработанной в BPSim.MAS модели с распределением ресурсов по варианту II и интеллектуального агента планирования.

Таблица 1

Оценка выходных характеристик исполнения портфеля проектов за 5 дней

Вариант	Загрузка ресурсов отдела, %	Объем субподряда, ч.-д.	День освобождения ресурсов отдела от работ по портфелю
I	50,00	6	3
II	62,50	2	5
III	68,75	0	5
IV	68,75	0	4

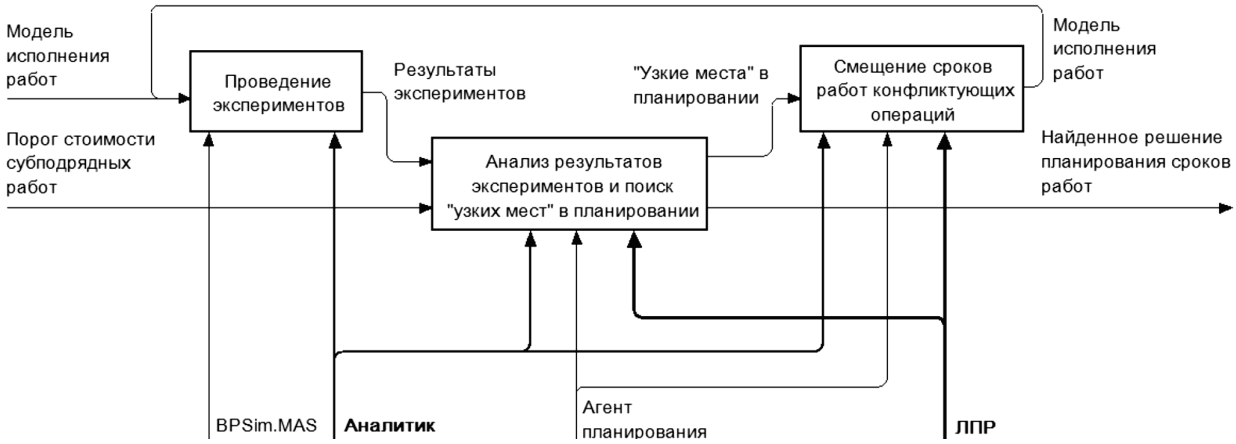


Рис. 2. Контур поиска эффективного решения планирования сроков работ

ИАП предназначен для выполнения следующих функций: 1) анализ результатов моделирования распределения ресурсов по варианту II – стоимости субподрядных работ по каждой операции всех проектов портфеля, загруженности собственных отделов; 2) поиск «узких мест» модели, связанных с операциями, требующими высоких, по оценке экспертов, затрат на субподряд (т. е. мест «перегрузок» собственных отделов); 3) смещение начала выполнения выявленных операций в модели на сроки, определяемые алгоритмом работы ИАП; 4) предоставление возможности корректировки полученных сроков ЛПР; 5) передача по обратной связи скорректированной модели на этап проведения экспериментов, по результатам которых аналитик и ЛПР оценивают эффективность принятых решений.

Исходя из сказанного выше, распределение ресурсов в разрабатываемой модели будем осуществлять по варианту II с использованием обратной связи на основе разработанного ИАП.

Алгоритм агента планирования по смещению сроков работ

Рассмотрим выходные характеристики разрабатываемой модели: набор операций проектов портфеля $\{Op_j\}, j \in 1..W$, набор стоимостей субподрядных работ для каждой из операций $\{S_j\}, j \in 1..W$, функции относительных загруженностей отделов ПО, ПрО и ОМТО соответственно:

$$U_{\text{ПО}}(t),\ U_{\text{ПрО}}(t),\ U_{\text{ОМТО}}(t) : \forall t \in T_{Mod}$$

$$U_{\text{ПО}}(t) \in [0;\ 100],\ U_{\text{ПрО}}(t) \in [0;\ 100],$$

$$U_{\text{ОМТО}}(t) \in [0;\ 100],$$

где T_{Mod} – время моделирования. Обозначим функцию относительной загруженности отдельного отдела, ответственного за выполнение рассматриваемой операции, как $Z(t) : \forall t \in T_{Mod}$ $Z(t) = U_{\text{ПО}}(t) \vee U_{\text{ПрО}}(t) \vee U_{\text{ОМТО}}(t)$.

Алгоритм интеллектуального агента планирования по смещению сроков работ на основе анализа рассматриваемых характеристик представлен на рис. 3.

В основе алгоритма ИАП лежат следующие понятия и зависимости:

$T_{BeginOpi}$, T_{EndOpi} – начало и окончание выполнения операции Op_i;

$L_{Opi} = [T_{BeginOpi}; T_{EndOpi}]$ – временной интервал выполнения операции Op_i;

$M = [a; b], M \in L_{Opi}$ – временной интервал, на протяжении которого средняя загруженность отдела, ответственного за выполнение операции Op_i, равна 100 %;

$x = b - a$ – длина временного интервала M;

$Z_0(t) = \tilde{Z}(t)\Big|_a^b = \sum_{t=a}^{b} Z(t) \Big/ x = 100$ % – средняя загруженность отдела, ответственного за выполнение операции Op_i, на протяжении временного интервала M;

$M^-(n) = [(a - (n+1)\cdot x); (a - n\cdot x)]$ – временной интервал M, смещенный на $(n+1)\cdot x$ дней влево по оси времени;

$Z_1(t) = \tilde{Z}(t)\Big|_{a-(n+1)\cdot x}^{a-n\cdot x} = \sum_{t=a-(n+1)\cdot x}^{a-n\cdot x} Z(t) \Big/ x$ – средняя загруженность отдела, ответственного за выполнение операции Op_i, на временном интервале $M^-(n)$;

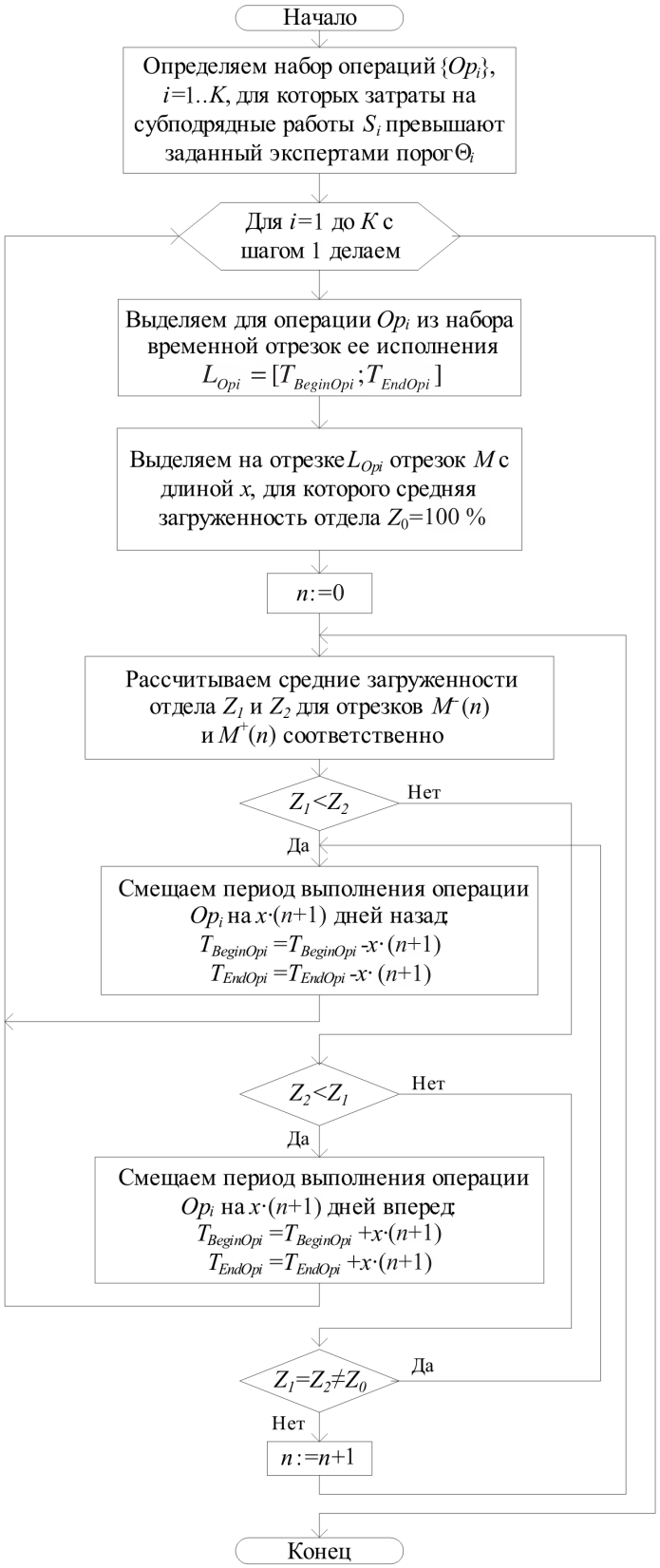


Рис. 3. Алгоритм агента планирования по смещению сроков работ

$M^+(n) = [(b + n \cdot x); (b + (n+1) \cdot x)]$ – временной интервал M, смещенный на $(n+1) \cdot x$ дней вправо по оси времени;

$Z_2(t) = \tilde{Z}(t)\Big|_{b+n\cdot x}^{b+(n+1)\cdot x} = \sum_{t=b+n\cdot x}^{b+(n+1)\cdot x} Z(t) \Big/ x$ – средняя загруженность отдела, ответственного за выполнение операции Op_i, на временном интервале $M^+(n)$;

n – итерационный шаг поиска временных интервалов $M^-(n)$ и $M^+(n)$, удовлетворяющих следующему условию: $Z_1(t) \neq Z_0(t) \wedge Z_2(t) \neq Z_0(t)$.

Разработка имитационной модели

В результате обследования предметной области (деятельности предприятия) описаны процессы исполнения работ по отдельному проекту с использованием графической нотации IDEF0. На основании изучения статистики собрана входная информация по пяти проектам, начало которых пришлось на период с марта по сентябрь 2010 г.

В ходе разработки ИМ описаны следующие узлы: 1) операции, отражающие протяженные во времени работы по исполнению портфеля проектов; 2) РИА, предназначенные для распределения ресурсов (собственных и субподрядных) по работам (операциям), а также обеспечивающие формирование статистики. Распределение ресурсов между несколькими параллельными операциями осуществляется в порядке, определяемом приоритетами выполнения операций. Значения приоритетов устанавливаются путем экспертной оценки ЛПР. Каждой операции модели поставлена в соответствие заявка z, набор атрибутов которой хранит информацию об операции: номер проекта z_n, день начала операции z_d, месяц начала операции z_m, длительность операции z_l, трудозатраты в ч.-д. на операцию z_w, средние трудозатраты на операцию в человеко-часах в день z_h, которые рассчитываются по формуле $z_h = z_w \cdot 8 / z_l$.

РИА в модели делятся на два вида: агентов выполнения и агентов распределения. Агенты выполнения при захвате заявки (начале выполнения операции) выполняют следующие функции: 1) анализ объема свободных ресурсов предприятия и принятие решения о привлечении субподряда; 2) уменьшение объема свободных ресурсов (захват ресурсов) и передача заявки операции (при отсутствии субподряда) или агенту распределения (при субподряде). Агент распределения выполняет следующие функции: 1) ежедневный анализ объема свободных ресурсов, необходимых для покрытия субподрядных работ; 2) захват заявки на срок, в течение которого либо операция заканчивается, либо высвобождаются ресурсы для покрытия субподряда; 3) в случае высвобождения достаточного объема ресурса прекращение субподрядных работ, уменьшение объема свободных ресурсов предприятия (захват ресурсов) и передача заявки операции. Узел-операция захватывает заявку до срока окончания выполнения работ по операции, при наступлении которого объем свободных ресурсов предприятия увеличивается (высвобождается) и заявка передается агенту, формирующему статистику выполнения операции.

Оценка адекватности имитационной модели

Под *адекватностью* ИМ будем понимать ее соответствие моделируемому объекту по наиболее существенным свойствам объекта. Оценку адекватности ИМ выполним с помощью оценки адекватности принципиальной структуры модели, т. е. принципов ее построения (*верификация* модели) [3]. Верификацию разработанной модели МППР осуществим путем проведения эксперимента, при котором на вход модели подается заданная информация (портфель проектов), приводящая к появлению на выходе реального объекта известных значений оцениваемых параметров (в данной задаче в качестве параметров выступают общий простой отделов и объем субподрядных работ).

Оценим адекватность модели с помощью моделирования пяти проектов, входная информация по которым была собрана в ходе обследования предметной области. Сопоставим проведение экспериментов с данной моделью с *вариантом А моделирования*. В результате моделирования варианта А были получены следующие данные: 1) общий простой отделов за полгода (с апреля по сентябрь 2010 г.) при проигрывании варианта I составил 69,67 % для ПО и 76,82 % для ПрО; 2) при суммарном субподряде на портфель проектов в количестве 4,25 ч.-д. необходимо затратить для обеспечения субподрядных работ сумму в размере 35 352 руб. с учетом стоимости одного ч.-д. по каждой операции всех проектов портфеля. Полученные результаты эксперимента с моделью согласуются с данными, выявленными в ходе исследования статистики работы предприятия за рассматриваемый период. Таким образом, можно сделать вывод об адекватности разработанной ИМ исходному объекту.

Проведение экспериментов с моделью и анализ результатов

Анализ результатов варианта А моделирования показал, что данное количество проектов обеспечивает загрузку ресурсов ЗАО «Телесистемы» в среднем на 30 %. Сопоставим проведение экспериментов с портфелем, состоящим из 10 проектов, с *вариантом В моделирования*. Вид имитационной модели по окончании проигрывания варианта В представлен на рис. 4 *а*.

Вследствие увеличения портфеля проектов при проигрывании варианта В моделирования возник субподряд на проекты 1, 3–5 и 9 (рис. 4 *а*). Общий простой отделов за полгода (с апреля по сентябрь 2010 г.) составил 56,91 % для ПО и 59,33 % для ПрО. По сравнению с вариантом А моделирования общий простой уменьшился на 22,4 % для ПО и на 29,5% для ПрО, что связано с появлением дополнительных пяти проектов портфеля, два из которых проектные, а три – производственные. В табл. 2 представлено распределение трудозатрат и стоимости субподрядных работ по проектам портфеля, общий объем и суммарная стоимость субподряда портфеля варианта В.

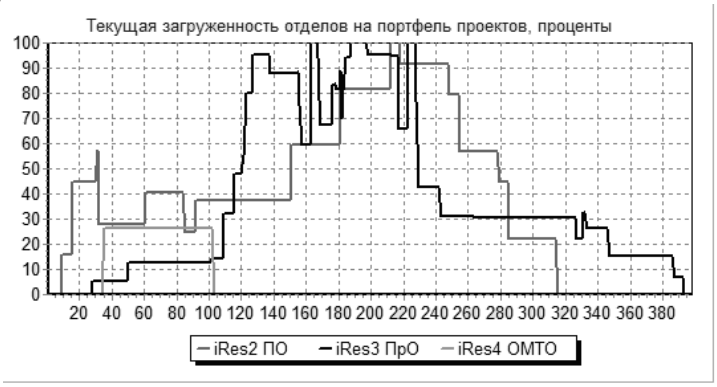
Применение интеллектуального агента планирования для анализа выходных характеристик варианта В моделирования позволило выделить следующие операции, требующие существенных затрат на проведение субподрядных работ: операции «Монтажные и наладочные работы (учет энергии)» проектов 3 и 9 (95 990 руб. на 12 ч.-д. для проекта 3 и 70 953 руб. на 9 ч.-д. для проекта 9), все операции проекта 4 (65 998 руб. на 16 ч.-д.). Агентом планирования на основании анализа выходных характеристик модели и использования алгоритма смещения сроков работ было предложено решение о задержке начала выполнения выделенных операций на две недели (смещении сроков операций на две недели вправо по оси времени), поскольку общая загруженность отделов за полгода (с апреля по сентябрь 2010 г. 43 % для ПО и 40 % для ПрО) позволяет своими силами выполнить данные проекты.

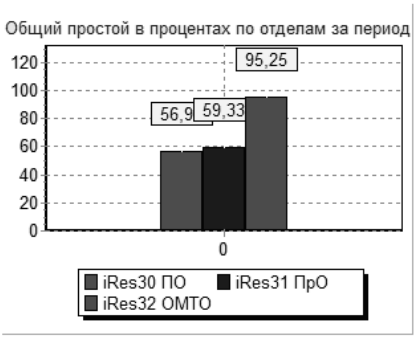
Таблица 2

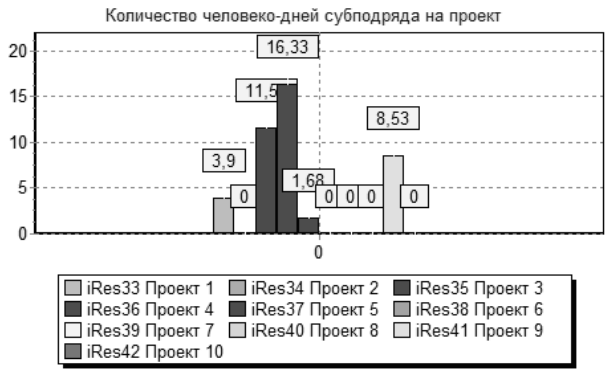
Оценка субподрядных работ при моделировании варианта В

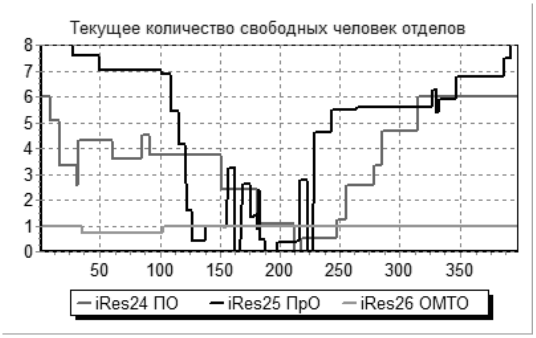
Операция	Проект				
	1	3	4	5	9
Разработка технического задания, ч.-д.				1,68	
Монтажные и наладочные работы (телемеханика), ч.-д.			2,45		
Монтажные и наладочные работы (учет энергии), ч.-д.		11,54			8,53
Монтажные и наладочные работы (средства связи), ч.-д.			13,88		
Обучение персонала Заказчика, ч.-д.	3,9				
Итого трудозатрат по проекту, ч.-д.	3,9	11,54	16,33	1,68	8,53
Стоимость трудозатрат по проекту, руб.	10 249	95 990	65 998	6 746	70 953
Итого трудозатрат по портфелю, ч.-д.	41,98				
Стоимость трудозатрат по портфелю, руб.	249 936				

а)

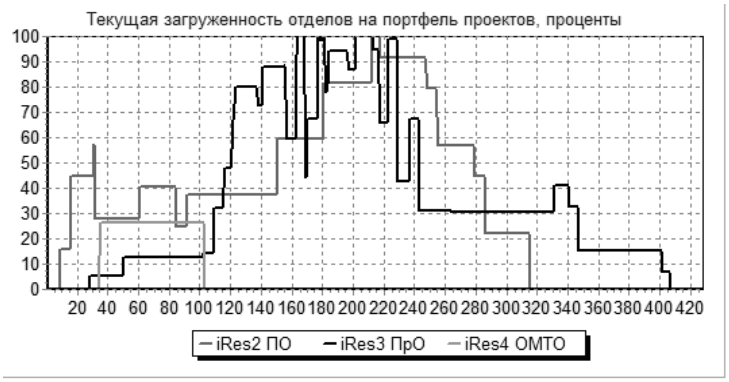


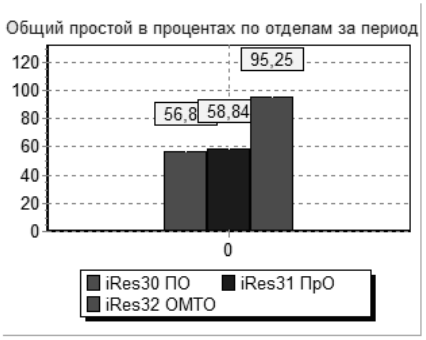


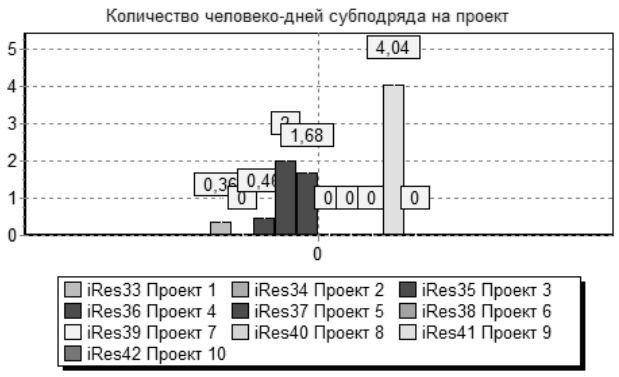




б)







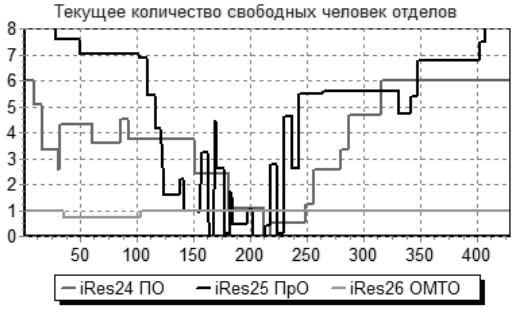


Рис. 4. Вид модели по окончании проигрывания:
а – варианта B; *б* – варианта C

Таблица 3

Оценка субподрядных работ при моделировании варианта С

Операция	Проект				
	1	3	4	5	9
Разработка ТЗ и ТРП по параллельному объекту, ч.-д.				1,68	
Монтажные и наладочные работы (учет энергии), ч.-д.					4,04
Монтажные и наладочные работы (средства связи), ч.-д.			2		
Разработка технической документации, ч.-д.		0,46			
Обучение персонала Заказчика, ч.-д.	0,36				
Итого трудозатрат по проекту, ч.-д.	0,36	0,46	2	1,68	4,04
Стоимость трудозатрат по проекту, руб.	946	3 826	8 330	6 746	33 605
Итого трудозатрат по портфелю, ч.-д.					8,54
Стоимость трудозатрат по портфелю, руб.					53 453

Сопоставим *вариант С моделирования* с проведением экспериментов со скорректированным портфелем варианта В, в котором операции, выделенные ИАП, моделируются с задержкой на две недели. Вид имитационной модели по окончании проигрывания варианта С моделирования представлен на рис. 4 *б*. Вследствие смещения сроков начала выполнения отдельных операций проектов портфеля происходит перераспределение количества субподрядных работ по проектам. В табл. 3 представлено распределение трудозатрат и стоимости субподрядных работ по проектам портфеля, общий объем и суммарная стоимость субподряда портфеля варианта С.

Общий простой отделов за полгода (с апреля по сентябрь 2010 г.) при проигрывании варианта С составил 56,85 % для ПО и 58,84 % для ПрО. По сравнению с вариантом В общий простой отделов уменьшился на 0,1 % для ПО и на 0,8 % для ПрО. Это связано с тем, что в варианте С уменьшился объем субподрядных работ, следовательно, загрузка отделов увеличилась, а суммарный простой уменьшился.

С помощью разработанной в СДМС BPsim.MAS модели исполнения работ по портфелю проектов для ЗАО «Телесистемы» был проведен анализ портфеля, состоящего из 10 проектов, за период с апреля по сентябрь 2010. Применение разработанного интеллектуального агента планирования позволило выработать рекомендации по смещению сроков работ выполнения отдельных операций проектов. В результате объем субподрядных работ портфеля проектов сократился с 42 до 9 ч.-д. в полгода (т. е. объем субподрядных работ уменьшился в 4,92 раза), затраты на субподрядные работы снизились в 4,68 раз (с 249 936 до 53 453 руб. в полгода). Экономический эффект составляет 390 000 руб. в год.

Использование разработанной модели и агента планирования при определении сроков выполнения работ и распределении ресурсов по портфелю проектов уменьшает время принятия решения и трудозатраты на проведение как стратегического, так и оперативного планирования на предприятии.

Работа выполнена в рамках конкурса на проведение НИР программы развития УрФУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аксенов, К.А.** Анализ и синтез процессов преобразования ресурсов на основе имитационного моделирования и интеллектуальных агентов [Текст] / К.А. Аксенов, А.С. Антонова, И.А. Спицина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№1 (115). –С. 13–19.

2. **Аксенов, К.А.** Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов [Текст] / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова. –Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006.–311 с.

3. **Волкова, Н.В.** Теория систем и системный анализ в управлении организациями. Справочник: Учеб. пособие [Текст] / В.Н. Волкова, А.А. Емельянов. –М.: Финансы и статистика, 2006. –848 с.

УДК 004.41

В.С. Кедрин, О.В. Кузьмин

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОЙ АРХИТЕКТУРЫ MODEL-VIEW-CONTROLLER ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ

Средства программного визуального проектирования и моделирования алгоритмов занимают особое место среди базовых инструментов специалистов прикладных областей науки и техники в различных предметных отраслях. Эти средства позволяют создавать модель изучаемого процесса или явления и проводить экспериментальные вычисления, что особенно актуально при исследовании телекоммуникационных, электрических и механических сигналов. Технология визуального проектирования дает возможность исследователю формировать осмысленный образ, выраженный в виде определенной «графической» схемы алгоритма, и избавляет от рутинной работы за счет автоматизации процесса проектирования.

В настоящее время существует несколько пакетов визуального проектирования и моделирования алгоритмов, функционирующих на различных аппаратных платформах и операционных средах и отличающихся между собой функциональными возможностями, быстродействием и стоимостью. Среди них можно выделить наиболее представительные: Simulink (Matlab), LabVIEW, Hypersignal и ряд им подобных. Данные системы предлагают исследователю широкий выбор методов цифровой обработки сигналов, но не всегда позволяют провести исследование в полной мере и накладывают ограничения на проведение некоторых этапов компьютерного эксперимента. Поэтому специалисты часто принимают решение о разработке собственного программного обеспечения, наделенного средствами визуального проектирования. В области создания такого программного обеспечения существует основная проблема, которая заключается в определении концепции построения программной архитектуры для систем визуального проектирования и моделирования алгоритмов. Одним из популярных способов разработки программы в этом случае является использование шаблонов проектирования, однако их недостаточно обдуманное применение приводит к перегруженности архитектуры, и, как следствие, низкой эффективности созданного программного продукта.

В работах [1–4] рассматриваются различные подходы к построению программных архитектур и современные тенденции их развития. Однако в указанных работах не учитываются особенности применения программных архитектур для различных классов информационных систем. Настоящая статья посвящена рассмотрению особенностей проектирования программного обеспечения на базе одной из перспективных компонентных программных архитектур – Model-View-Controller (далее – MVC), а также расширению и модификации данной архитектуры для класса информационных систем визуального проектирования и моделирования алгоритмов цифровой обработки сигналов. Следует отметить, что программная архитектура закладывает направленный базис

для построения эффективной информационной среды, и ее улучшение путем дополнения новых принципов и вариантов реализации определяет возможность создания новых более сложных алгоритмических и математических моделей в вычислительной среде.

Архитектура MVC

В основу предлагаемой концепции проектирования положена архитектура MVC, предложенная и описанная в работе T. Reenskaug [5]. Впервые данная архитектура была использована в первой среде программирования с графическим интерфейсом пользователя – Smalltalk-80 [6].

В основе архитектуры MVC лежит разделение данных, пользовательского интерфейса и логики взаимодействия этих элементов. Это достигается за счет того, что проектирование архитектуры программы строится на трех компонентах:

модель;

контроллер;

представление.

Модель содержит сведения о данных и их структуре и изменяется под действием команд контроллера.

Контроллер реагирует на действия пользователя и оповещает модель об изменении ее состояния.

Представление предназначено для вывода данных для пользователя и реагирует на изменения модели.

Архитектура MVC задает не столько правила разделения программы в стадии проектирования на компоненты, сколько правила их взаимодействия. Благодаря этой особенности можно работать с моделью, а, следовательно, и с источником данных, взаимодействующих с ней, независимо от графического представления.

Применение архитектуры MVC позволяет создать модель, формирующую для представления только те данные, которые действительно необходимы для отображения. К примеру, если данные исследователя в памяти занимают несколько тысяч значений, то отображаются на экране в актуальном виде лишь несколько десятков значений. Поэтому представлению в актуальный момент времени модель должна сформировать для визуализации только необходимые значения, что значительно повысит скорость обработки очень больших наборов данных (10^5 и более значений) и уменьшит потребности в памяти для графической визуализации по сравнению с подходом, требующим считывания всех данных.

Архитектура MVC в современных средах программирования ориентирована на решение проблемы синхронизации данных для разных представлений. Так, связывая одну модель с двумя или более представлениями, можно представить взаимодействие данных различными способами. Благодаря этому изменения в данных будут отражаться во всех представлениях, связанных с моделью.

Дополнительное преимущество архитектуры MVC проявляется в том, что если проектировщик решает изменить способ хранения исходных данных, то в этом случае просто потребуется скорректировать модель; представления по-прежнему будут работать правильно [7].

Необходимо отметить, что в современных языках программирования компонентный уровень MVC имеет ряд изменений:

отсутствие четкого разделения между представлением и контроллером;

отсутствие требования обязательного выделения модели в качестве отдельной компоненты, т. к. в некоторых реализациях MVC она по умолчанию включена в стандартный механизм программных элементов.

Задача лица, проектирующего программу, принять решение: или выделять компоненты модели, или сразу описывать механизм обработки данных. Второе решение приводит к проблеме проектирования обработки данных для каждого представления. Поэтому использование механизма MVC без отдельного выделения компоненты–модели представляется нецелесообразным. В представляемой в дальнейшем концепции проектирования системы научных вычислений понятие модели занимает центральное место.

Особенности применения архитектуры MVC

Применение архитектуры MVC в явном виде хоть и несколько усложняет этап проектирования программной структуры, но дает значительный выигрыш в быстродействии программы и возможности синхронизации информации в разных представлениях из одного источника данных. При этом потенциал применения архитектуры MVC намного выше и проявляется на стыке с различными информационными технологиями. Так, соединение данной архитектуры с принципами объектно-ориентированного подхода, как, на-

пример, в кроссплатформенном инструментарии разработки программного обеспечения на языке программирования C++ Qt (Nokia) [7], позволяет сформировать актуальные направления применения архитектуры MVC.

Выделим отдельные новые направления применения архитектуры MVC для класса информационных систем визуального проектирования и моделирования алгоритмов для цифровой обработки сигналов.

Первое направление – оптимизация процесса хранения и представления данных.

Предположим, что в памяти компьютера содержится произвольный ряд числовых значений – вектор (одномерный массив) данных:

$$\mathbf{A} = [a_1, a_1, a_1, ..., a_n]. \quad (1)$$

Оптимальным считается такое хранение информации, когда произвольный вектор значений хранится в подсистеме данных только в одной области памяти. Однако в ходе проектирования вычислительного алгоритма зачастую требуется множественный образ исходного вектора, например, в виде матрицы

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} a_1 & a_1 & \cdots & a_1 \\ a_2 & a_2 & \cdots & a_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n & a_n & \cdots & a_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

или матрицы

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_l \\ a_2 & a_3 & \cdots & a_{l+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_n & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

размерами $l \times n$.

При традиционном подходе преобразование исходного вектора **A** в матрицы **B** или **C** потребовало бы увеличения области памяти в хранилище данных в l раз по сравнению с той областью памяти, которую занимал исходный вектор.

Использование архитектуры MVC позволяет не только представлять данные, но и формировать структуру организации данных. Так, если на уровне модели ввести алгоритм, позволяющий описывать организацию данных, то при визуальном проектировании вычислительной модели в представлении можно формировать множественный образ данных в определенных структурах без увеличения объема занимаемой ими памяти ЭВМ.

Организация одномерного массива данных в памяти ЭВМ для вектора **A** связано с понятиями указателя (адреса) памяти размещения данных p и сдвига s, показывающего смещение данных в структуре памяти относительно начала.

Идея заключается в том, чтобы модель формировала форму организации данных на базе системы точек D_i с координатами $(p_i; s_i)$, а представление на базе фигуры организации данных отображало необходимую структуру данных.

Формой организации данных вектора **A** будет представление в виде точки $D_1(p_{\mathbf{A}}; 0)$:

$$\mathrm{F}_{\mathbf{A}} = \{D_1\}, \quad (4)$$

где $p_{\mathbf{A}}$ – указатель памяти для вектора **A**.

Формами организации данных для матрицы **B** и **C** будут представления в виде системы из l точек:

$$\mathrm{F}_{\mathbf{B}} = \{D_1, D_1, ..., D_1\}, \quad (5)$$

$$\mathrm{F}_{\mathbf{C}} = \{D_1, D_2, ..., D_l\}, \quad (6)$$

где точки $D_1, D_2, ..., D_l$ имеют координаты:

$$\begin{cases} D_1(p_{\mathbf{A}}; 0), \\ D_2(p_{\mathbf{A}}; 1), \\ \cdots \\ D_2(p_{\mathbf{A}}; l-1). \end{cases}$$

Формы организации данных (4)–(6), создаваемые на уровне модели, являются основой для правильного их отображения в соответствующем представлении, например, в таблице в виде (1)–(3) соответственно. При этом чтобы модель имела связь с представлением на основании формы организации данных, необходимо иметь механизм на уровне контроллера, позволяющий вводить информацию о структуре данных в модель.

Второе направление – организация и представление вариативной схемы алгоритма, что является критерием гибкости и эффективности системы визуального проектирования.

Наиболее наглядный способ представления вычислительной методики (схемы алгоритма) в этом случае – ациклический ориентированный n-мерный граф G, состоящий из непустого подмножества множества узлов V и множества дуг E, упорядоченно соединяющих некоторую область узлов.

В качестве узлов графа V выступают данные и методы (способы обработки и преобразования данных), а в качестве дуг E – связи между данны-

ми и методами. Причем связи всегда имеют направление и классифицируют данные по отношению к методу как входные и выходные.

Таким образом, модель для реализации второго направления должна включать алгоритм формирования графа. Исходя из рассмотренного ранее первого направления, предназначенного для оптимизации хранения данных, предлагается использовать не обычный, а модифицированный граф:

$$G' := (D, E),$$

где точки D характеризуют структуру организации данных.

Рассмотрим, в чем заключается отличие между обычным ориентированным графом и модифицированным. На рис. 1 *а* представлен обычный ориентированный граф, показывающий связь между двумя векторами входа in_1 и in_2 и одним вектором выхода out_1 посредством метода M. При этом вектор входа in_2 получается путем поэлементного сдвига значений вектора входа in_1 вправо, по аналогии со столбцами матрицы **C** (3). Рис. 1 *б* отражает тот же самый граф, но уже в модифицированном виде посредством системы точек D, показывающих форму организации данных. Пунктиром выделены точки D, относящиеся к одним и тем же данным, хранящимся в памяти.

Рассмотренный модифицированный ориентированный граф является основой для вариативного формирования схемы алгоритма. Для реализации данной цели необходимо, чтобы представление и контроллер формировали рабочую область не только для представления, но и для изменения элементов графа. Это возможно, если реализовать представление схемы расчета с помощью технологии визуального проектирования, которое предлагает возможность манипулирования графическими объектами, вместо написания команд.

Технология визуального проектирования позволяет создать рабочую область, предназначенную для формирования граф-представления моделей схемы расчета на основе репозитария методов, содержащего различные классы методов (алгоритмов) анализа и синтеза. При таком подходе в отличие от классического способа моделирования, исследователю не нужно досконально изучать специализированный язык программирования и численные методы, а достаточно знаний о законах и зависимостях той предметной области, в которой он работает.

Таким образом, визуальное проектирование схемы алгоритма на базе вариативного модифицированного графа является основой наглядного и функционального интерфейса, обеспечивающего отображение и формирование логических взаимосвязей между входной и выходной информацией и снижающего сложность описания и составления вычислительной методики. При этом механизм формы организации данных на уровне модели позволяет оптимизировать процесс хранения и представления больших объемов данных

Создание информационной системы визуального проектирования и моделирования алгоритмов

Продемонстрируем описанные выше возможности архитектуры MVC на конкретном примере экспериментальной разработки программного

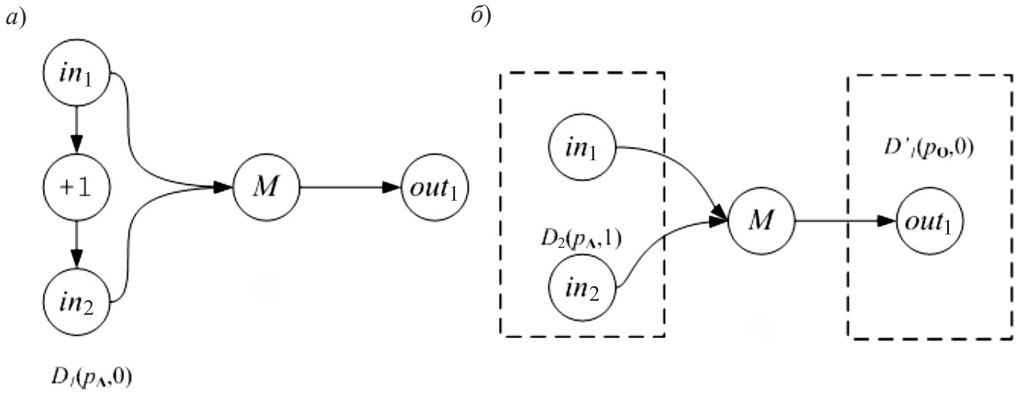


Рис. 1. Представления графов:
а – пример ориентированного графа; б – пример модифицированного ориентированного графа
in – входные данные; *out* – выходные данные; *M* – метод расчета; «+1» – метод единичного элементного сдвига вектора данных

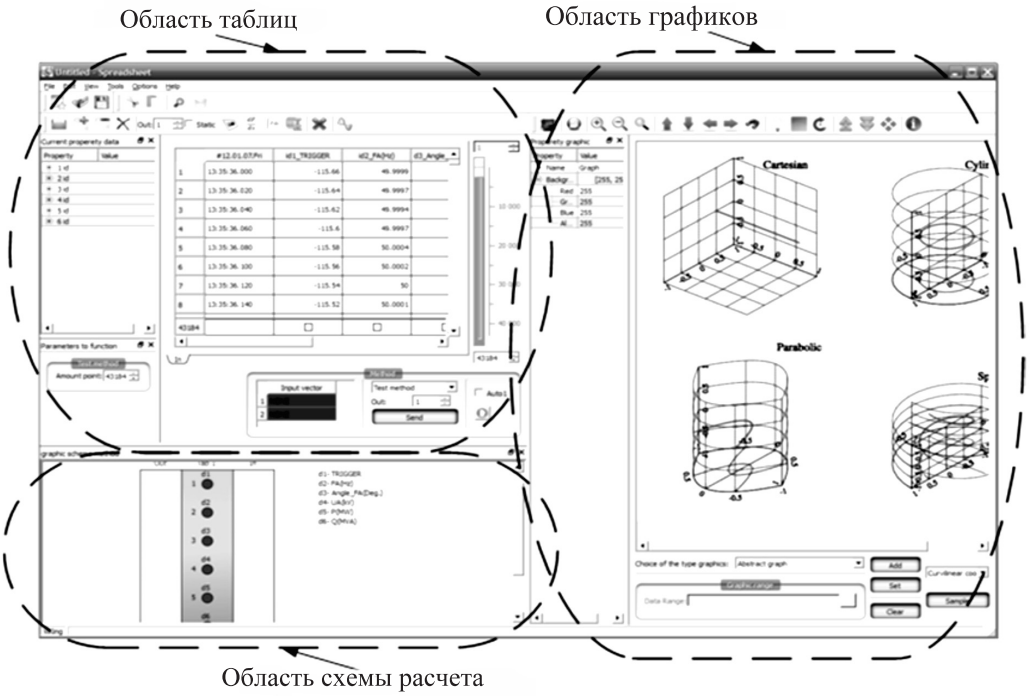


Рис. 2. Графический интерфейс системы визуального проектирования и моделирования алгоритмов

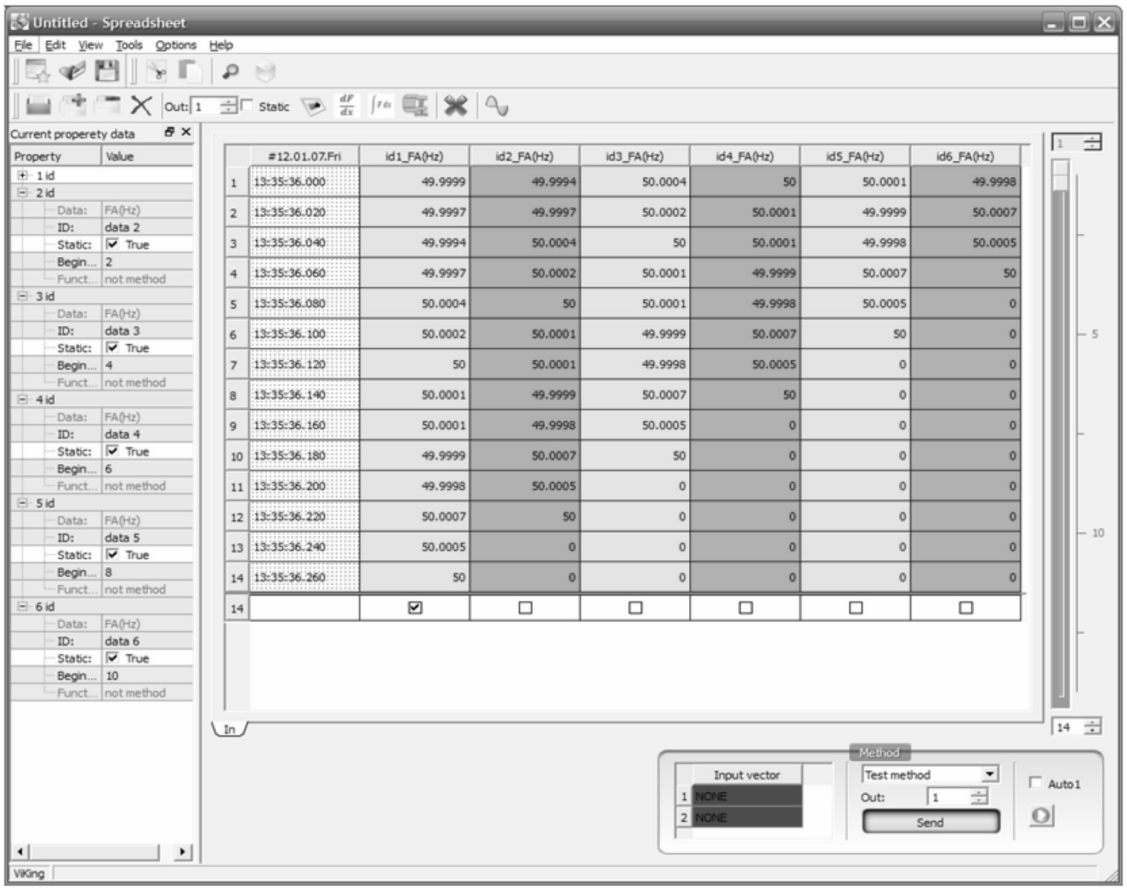


Рис. 3. Множественное представление вектора данных в таблице

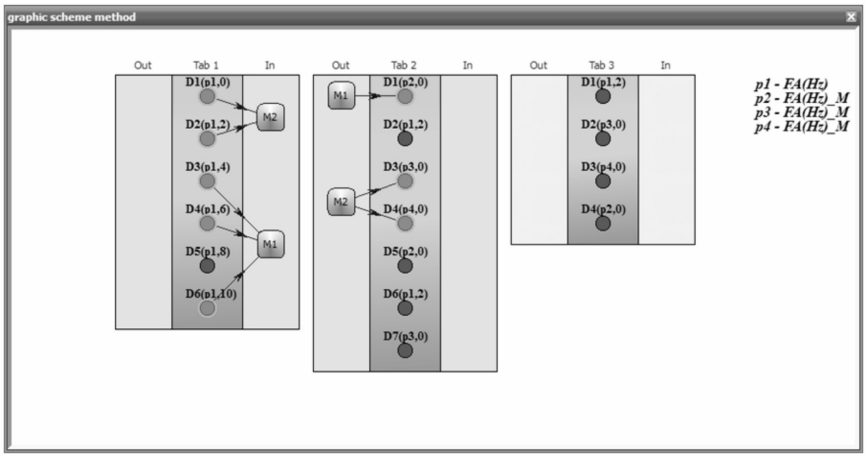


Рис. 4. Схема расчета методики

комплекса визуального проектирования и моделирования алгоритмов для анализа и прогнозирования сложных энергетических процессов. Данная программа реализуется авторами на базе библиотеки Qt и содержит ряд законченных решений применения архитектуры MVC, описанных ранее.

Графический интерфейс созданной программы реализует три области (рис. 2):

таблиц;

графиков;

схемы расчета.

Данные области содержат механизмы контроллера в виде функциональных кнопок и редакторов свойств, а также представления в виде таблицы, графика и модифицированного ориентированного графа расчета. Все области подключены к одной модели, управляющей процессами изменения и синхронизации данных в отдельных представлениях и реализующей оба направления применения архитектуры MVC для построения системы визуального проектирования, рассмотренные выше.

На рис. 3 показана реализация программной таблицы. В первой графе таблицы содержатся данные времени регистрации значений. Благодаря алгоритму, реализующему форму организации данных на уровне модели, в источнике данных не требуется увеличения памяти. При этом форма организации данных в виде системы точек $D_1, D_2, \ldots, D_l$ отражается в области схемы расчета, как представлено на рис. 4 в левом крайнем блоке Tab1. Как видно из схемы, в программе определены три таблицы (Tab1, Tab2, Tab3), содержащие в общей совокупности 15 серий данных для пользователя. При этом в источнике данных содержатся только четыре серии данных (p1, p2, p3, p4). Таким образом, при хранении данных в памяти на базе архитектуры MVC для рассматриваемого примера расчета расходуется в четыре раза меньше памяти, по сравнению с классическим подходом, требующим последовательного хранения всех данных.

Построение схемы расчета (рис. 4) основано на элементах когнитивной графики, что выражено в форме графических фигур и линий связи, помогающих понять структуру организации сложной методики расчета на базе модифицированного ориентированного графа.

Предложена методология проектирования программной среды на базе программной архитектуры Model-View-Controller, которая значительно расширяет возможность реализации отдельных компонентов систем визуального проектирования и моделирования алгоритмов и повышает эффективность их использования.

Проведенное проектирование экспериментальной разработки программного комплекса научных вычислений для анализа и прогнозирования сложных энергетических процессов показало следующее.

Реализованный механизм формы организации данных на уровне модели позволяет оптимизировать процесс хранения и представления больших объемов данных.

Предложенный модифицированный ориентированный граф дает возможность анализа структуры организации данных помимо их взаимосвязи и является основой визуального формирования вариативной методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mani Chandy, K.** Specifications and Architectures of Federated Event-Driven Systems [Текст]/ K. Mani Chandy, M. Olson // AAAI. Technical Report. –2009. –P. 21–26.

2. **Бахтизин, В.В.** Создание управляемой программной архитектуры [Текст]/ В.В. Бахтизин, С.Н. Неборский // Программные продукты и системы. –2006. –№ 3. –С. 42–56

3. **Борисов, А.В.** Современные архитектурные подходы к построению программного обеспечения [Электронный ресурс]/ А.В. Борисов, И.Е. Куриленко // Вычислительные сети. Теория и практика (Network j. Theory and practice). –2010. –№ 2 (17). –Режим доступа: http://network-journal.mpei.ac.ru/cgi-bin/main.pl?l=ru&n=17&pa=3&ar=3

4. **Newcomer, E**. Understanding SOA with Web Services [Текст]/ E. Newcomer, G. Lomow. –Addison-Wesley, 2004. –480 с.

5. **Reenskaug, T.** MVC. Xerox PARC 1978-79. Pages of Trygve M. H. Reenskaug [Электронный ресурс]/ T. Reenskaug // Режим доступа: http://heim.ifi.uio.no/~trygver/themes/mvc/mvc-index.html

6. **Burbeck, St.** Application programming in Smalltalk-80TM: How to use Model-View-Controller (MVC). The UIUC Smalltalk Archive. 1997. [Электронный ресурс]/ St. Burbeck // Режим доступа: http://st-www.cs.illinois.edu/users/smarch/st-docs/mvc.html

7. [Электронный ресурс]/ –Режим доступа: http://qt.nokia.com/

УДК 517.958:532.5

В.Н. Козлов, Д.Х. Нгуен, А.Н. Фирсов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ СЛАБОСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Важность задачи математического моделирования процесса транспортировки жидких сред по системам трубопроводов (гидравлических сетей) хорошо известна [3, 4]. Однако до настоящего времени большинство исследований таких систем основывается на полуэмпирических моделях. В настоящей работе делается попытка построения достаточно строгой математической модели транспортировки слабосжимаемой жидкости по системам трубопроводов, основанной на уравнениях Навье–Стокса, преобразованных соответствующим образом [1]. Анализ такой модели позволяет свести задачу оптимизации управления подобными сетями к задачам линейного программирования.

1. Опишем основные предположения, используемые при построении математической модели процесса транспортировки. Будем рассматривать гидравлическую сеть (ГС), схема которой показана на рисунке. Гидравлическую сеть представим

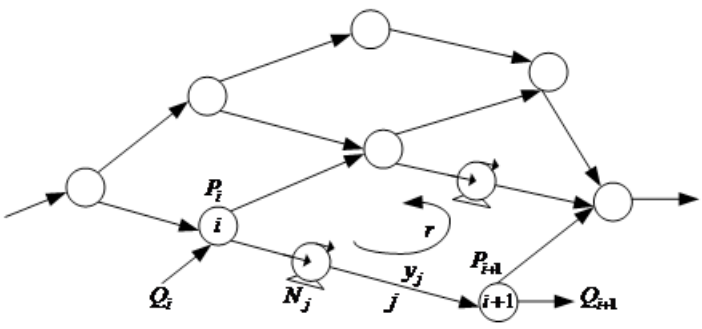


Схема гидравлической сети
N_j – насос создает действующий напор или активное давление; r – r-й контур

с помощью графа, состоящего из m узлов, n ветвей и c линейно-независимых контуров. Узлы нумеруются индексом i, а ветви сети – индексом j.

На каждом участке ГС задается произвольно выбранное направление потока жидкости, после чего сеть будет представлять собой ориентированный граф, который служит системой отсчета направлений для потоков. Если в результате вычисления распределения расходов жидкости в сети расход на участке получается положительным, то это означает, что его направление потока совпадает с выбранным направлением участка, а если получается отрицательным, то его направление будет противоположным. Структура (топология) ГС описывается так называемой *матрицей инциденций* $\overline{A} = (a_{ij})_{i,j=1}^{i=m,j=n}$ размера $(m \times n)$:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ если поток по ветви } j \text{ не имеет связи} \\ \quad \text{с узлом } i; \\ 1, \text{ если поток по } j\text{-й ветви, примыкающей} \\ \quad \text{к узлу } i, \\ \quad \text{направлен из узла } i; \\ -1, \text{ если поток направлен в } i\text{-й узел.} \end{cases} \quad (1)$$

Каждый столбец матрицы $\overline{A}$ имеет только два ненулевых элемента, равных 1 или –1, поэтому сумма всех ее строк представляет собой нулевую строку, что означает их линейную зависимость. Таким образом, ранг матрицы $\overline{A}$ равен $(m-1)$. В силу этого свойства вместо матрицы $\overline{A}$ для описания структуры гидравлической сети может использоваться неполная матрица инциденций A размера $((m-1) \times n)$.

Система линейно-независимых контуров ГС описывается с помощью матрицы $B = (b_{rj})_{i,j=1}^{r=c,j=n}$ размера $(c \times n)$, каждый обход контура системы контуров задается произвольно выбранным направлением. Матрица системы линейно-независимых контуров имеет вид:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ если } j\text{-я ветвь не принадлежит} \\ \quad r\text{-му контуру;} \\ 1, \text{ если } j\text{-я ветвь принадлежит } r\text{-му} \\ \quad \text{контуру, и принятое положительное} \\ \quad \text{направление потока по ней} \\ \quad \text{совпадает с выбранным направлением} \\ \quad \text{обхода контура;} \\ -1, \text{ если } j\text{-я ветвь принадлежит } r\text{-му} \\ \quad \text{контуру, и направление потока} \\ \quad \text{по ней не совпадает с направлением} \\ \quad \text{обхода контура.} \end{cases} \quad (2)$$

Узлы гидравлической сети являются источниками, потребителями или точками ветвления. Пусть Q_i – расход жидкости источников или потребителей и P_i – давление в i-м узле, причем:

$$Q_i = \begin{cases} > 0, \text{ для источников;} \\ < 0, \text{ для потребителей;} \\ = 0, \text{ для узлов ветвлений.} \end{cases} \quad (3)$$

Матрица A используется для формирования уравнений баланса конечных приращений расходов, а матрица B – для баланса конечных приращений (перепадов) давлений. Для разработки математической модели гидродинамики течения жидкости исходная ГС разделяется на элементарные линейные участки трубопроводов и записывается система уравнений динамики жидкости для каждого линейного участка. При этом пренебрегаем потерями в точках соединений между элементами ГС (между отдельными трубами или между трубой и насосом). Тогда можно рассматривать давления и расходы на выходе одного элемента в качестве входных давлений и расходов для следующих элементов. В точках соединения трех или более труб на входах и выходах элементов должен выполняться закон сохранения массы. На практике при исследовании гидродинамики потоков в системе трубопроводов, как правило, применяется одномерный способ описания процессов перекачки жидкости. При этом предполагается, что труба имеет форму круглого цилиндра и постоянную по длине толщину стенок. Стенки трубы считаются упругими, а течение в трубе предполагается осесимметричным. Сдвиговая вязкость жидкости считается постоянной, при этом объемная вязкость жидкости не учитывается. Кроме того, при перекачке жидкости по системе трубопроводов скорость движения жидкости можно считать малой в сравнении со скоростью звука в жидкости.

2. Система уравнений динамики слабосжимаемой жидкости $(\rho \approx \text{const})$ в j-й трубе в координатах «расходы–давления» имеет следующий вид [3]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial x_j}{\partial z} + \dfrac{S_j}{c^2}\dfrac{\partial p_j}{\partial t} = 0, \\ \dfrac{\partial p_j}{\partial z} + \dfrac{1}{S_j}\left(\dfrac{\partial x_j}{\partial t} + 2a_j x_j\right) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $p_j(z,t)$ – давление жидкости в j-й трубе; $x_j(z,t) = \rho S_j w_j$ – массовой расход в j-й трубе.

Величину $2a_j = \lambda_j |w_j| / 2d_j$ называют *коэффициентом затухания* *j*-й трубы; w_j – скорость жидкости в *j*-й трубе; S_j – площадь сечения *j*-й трубы; d_j – диаметр *j*-й трубы; λ_j – коэффициент потери давления на трение *j*-й трубы; *c* – скорость распространения звука в жидкости; *z* – координата по длине трубы.

Система уравнений (4) содержит элемент $2a_j x_j$ ($= \lambda_j |x_j| x_j / \rho S_j 2d_j$), который является нелинейным по отношению к расходу x_j, что существенно затрудняет решение. В практике используются способы линеаризации, представляющие нелинейные элементы в виде:

$$2a_j x_j = \frac{\lambda_j |w_j|}{2d_j} x_j = b_j x_j , \qquad (5)$$

где $b_j = (\lambda_j |w_j| / 2d_j)_{\text{ср}} = \text{const} > 0$. При ламинарном режиме течения жидкости в круглых трубах коэффициент потери давления на трение $\lambda_j = 64/\text{Re}$, где $\text{Re} = \rho |w_j| d_j / \mu$ – число Рейнольдса. Тогда:

$$2a_j = \frac{\lambda_j |w_j|}{2d_j} = \frac{64}{\underline{\rho |w_j| d_j}} \frac{|w_j|}{2d_j} = \frac{32\mu}{\rho d_j^2} = b_j = \text{const}, \qquad (6)$$
$$\mu$$

где μ – динамическая вязкость жидкости.

Большинство магистральных трубопроводов содержат длинные участки (в десятки или сотни километров), и в отдельных пунктах трассы имеются промежуточные насосные станции для создания дополнительных, или активных давлений жидкости в трубопроводах. Математическая модель, представляемая системой уравнений (4), соответствует линейному трубопроводу, и не учитывает наличие промежуточных насосных станций. Если исходить из системы уравнений (4), то влияния насосных станций должны быть учтены при составлении граничных условий. В работах [4, 5] предлагается методика, позволяющая учесть влияние промежуточных насосных станций в дифференциальных уравнениях. При этом сложная трубопроводная система со многими промежуточными насосными станциями рассматривалась как единая линейная трубопроводная система. В общем уравнении учитывалось влияние этих промежуточных станций. Рассмотрим движение жидкости в *j*-м трубопроводе при наличии насосной станции, создающей активное давление H_j в промежуточной точке z_j трубы. Тогда система уравнений (4) запишется в виде [4]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial x_j}{\partial z} + \dfrac{S_j}{c^2} \dfrac{\partial p_j}{\partial t} = 0, \\ \dfrac{\partial p_j}{\partial z} - H_j \delta(z - z_j) + \dfrac{1}{S_j} \left(\dfrac{\partial x_j}{\partial t} + 2a_j x_j \right) = 0, \end{cases} \qquad (7)$$

где $\delta(z - z_j)$ – дельта функция Дирака. В стационарном режиме течения жидкости расходы и давления не зависят от времени, т. е.

$$\frac{\partial p_j}{\partial t} = 0, \ \frac{\partial x_j}{\partial t} = 0 . \qquad (8)$$

Из первого уравнения (4) следует $\partial x_j / \partial z = 0$. Из уравнения (8) и после интегрирования второго уравнения (7) по *z* получим:

$$p_{i+1} - p_i - H_j + \frac{b_j x_j \Delta z}{S_j} = 0 , \qquad (9)$$

где $\Delta z = z_{i+1} - z_i = l_j$ – расстояние от узла (*i*+1)-го до *i*-го узлов; l_j – длина *j*-й трубы. Перепишем (9) в виде:

$$y_j + H_j = R_j x_j , \qquad (10)$$

где $y_j = p_i - p_{i+1}$ – перепад давления на концах *j*-й трубы; $R_j = b_j l_j / S_j = \lambda_j l_j |w_j| / 2d_j S_j$ – коэффициент гидравлического сопротивления *j*-й трубы, при ламинарном режиме течения $R_j = b_j l_j / S_j = 32\mu l_j / \rho S_j d_j^2$.

Уравнение (10) иллюстрирует закон гидравлического сопротивления, связывающий общую потерю $R_j x_j$ давления на трение, перепад давления y_j на концах трубы и действующий напор H_j. Перепишем уравнение (10) в матричном виде:

$$y + H = Rx , \qquad (11)$$

где $y + H = Rx$, $y = (y_1 \ \ y_2 \ \ \dots \ \ y_n)^T$ – вектор перепада давления на ветвях; $H = (H_1 \ \ H_2 \ \ \dots \ \ H_n)^T$ – вектор действующих напоров на ветвях. Для пассивных ветвей $H_j = 0$; $R = \text{diag}(R_1, R_2, \dots, R_n)$ – матрица $(n \times n)$ гидравлического сопротивления сети; $x = (x_1 \ \ x_2 \ \ \dots \ \ x_n)^T$ – вектор расхода на ветвях.

Из определения матрицы $\overline{A}$ следует, что вектор перепада давления *y* на ветвях определяется равенством:

$$y = \overline{A}^T \overline{P} , \qquad (12)$$

где $\overline{P} = (P_1 \ \ P_2 \ \ \dots \ \ P_m)^T$ – вектор давления в узлах.

Так как перепад давления на одной трубе равен $y_j = p_i - p_{i+1}$, то сумма перепадов давлений в любом замкнутом контуре гидравлической сети равна нулю, т. е.

$$\sum_{j\in K_r} y_j = 0, \qquad (13)$$

где K_r – множество ветвей, принадлежащих *r*-му контуру. В матричном виде соотношение (13) имеет вид:

$$By = 0. \qquad (14)$$

Соотношение (14) представляет собой, по существу, второй закон Кирхгофа для давлений в узлах сети [2]. В каждом узле сети должны быть выполнены условия неразрывности для несжимаемой жидкости: количество жидкости, втекающее в узел *i*, равно количеству жидкости, вытекающей из этого узла, т. е.

$$\sum_{j\in D_i} x_j = Q_i, \qquad (15)$$

где D_i – множество ветвей *j*, имеющих один конец в *i*-м узле. В матричном виде соотношение (15) имеет вид:

$$Ax = Q, \qquad (16)$$

где $Q = (Q_1 \quad Q_2 \quad \dots \quad Q_m)^T$ – вектор расхода в узлах.

Соотношение (16) представляет собой первый закон Кирхгофа для расходов на ветвях сети. Кроме того, по всем узлам должен быть выполнен закон сохранения массы жидкости, т. е. должно быть выполнено соотношение:

$$\sum_{i=\overline{1,m}} Q_i = 0. \qquad (17)$$

Из уравнений (11), (12), (14), (16) и (17) следует система уравнений, описывающая стационарное состояние распределения массовых расходов и давлений в гидравлической сети, т. е. уравнения справедливы для установившихся состояний:

$$\begin{gathered} Ax = Q,\ By = 0,\ y + H = Rx, \\ y = \overline{A}^T \overline{P},\ \sum_{i=\overline{1,m}} Q_i = 0. \end{gathered} \qquad (18)$$

Первое и второе уравнения системы (18) представляют собой первый и второй законы Кирхгофа для расходов в ветвях и давлений в узлах соответственно. Закон гидравлического сопротивления в общем случае является нелинейной функцией расходов, поэтому система (18) является нелинейной алгебраической системой.

3. Использование модели (18) позволяет сформулировать задачу приближенного вычисления распределения расходов и давления в гидравлической сети, если заданы вектор Q, вектор действующего напора H и давления в опорном узле (например, P_m) и закон гидравлического сопротивления. В случае системы с сосредоточенными параметрами, величины R_j, действующие напоры H_j и узловые расходы Q_i считаются постоянными. В общем случае гидравлическая сеть является ограниченной системой, при управлении которой требуется учесть наличие регулирующих устройств (регуляторов расхода, давления, дросселирующих устройств), изменения характеристик транспортируемой среды и прочие факторы. Тогда $R_j(x_j)$, $H_j(x_j)$, $Q_i(P_i)$ являются функциями неизвестных расходов x_j и давлений P_i в узлах, что усложняет поставленную задачу.

На основе рассмотренной модели можно сформулировать задачи оптимального управления гидравлической сетью, обеспечивающего функциональность сети с минимальными затратами. Эти задачи можно сформулировать следующим образом.

Задача 1. Вычислить вектор управлений (вектор давлений *H*, создаваемых насосами), чтобы обеспечить заданные расходы Q потребителей в узлах с минимальными затратами (энергиями) в насосных станциях при ограничении давления в узлах, для минимизации целевой функции затрат:

$$F_1(H) = c^T |H| = c_1 |H_1| + c_2 |H_2| + \dots + c_n |H_n|, \qquad (19)$$

при ограничениях $\overline{P}_{\min} \le \overline{P} \le \overline{P}_{\max}$, где $c_j, j = \overline{1,n}$ – удельные стоимости энергии, вырабатываемой насосом H_j; $\overline{P}, \overline{P}_{\min}, \overline{P}_{\max} \in \Re^m$.

Задача 2. Вычислить вектор управления H для перехода от одного стационарного состояния к новому стационарному состоянию ГС с минимальным отклонением давления в узлах от заданных, с помощью минимизации целевой функции:

$$\begin{aligned} F_2(P) = d^T \left|\overline{P} - \overline{P}^*\right| = d_1 \left|P_1 - P_1^*\right| + \\ + d_2 \left|P_2 - P_2^*\right| + \dots + d_m \left|P_m - P_m^*\right|, \end{aligned} \qquad (20)$$

где $d_i, i = \overline{1,m}$ – удельные затраты на создание дополнительного давления в *i*-м узле.

Целевая функция имеет вид:

$$F_2'(P) = \left\|\overline{P} - \overline{P}^*\right\|^2 = \sum_{i=1}^{m} (P_i - P_i^*)^2, \qquad (21)$$

при ограничениях $\overline{P}_{\min} \le \overline{P} \le \overline{P}_{\max}$, где $\|z\| = \left(\sum_{i=1}^{m} z_i^2\right)^{1/2}$ – евклидова норма.

Если кроме минимизации отклонений давлений в узлах минимизируется суммарная затрата энергии в насосных станциях, то целевая функция имеет вид:

$$F_2^{"}(P) = c^T \left|H\right| + d^T \left|\overline{P} - \overline{P}^*\right| = c_1 \left|H_1\right| + \\ + \ldots + c_n \left|H_n\right| + d_1 \left|P_1 - P_1^*\right| + \ldots + d_m \left|P_m - P_m^*\right|. \quad (22)$$

Задача 3. Вычислить вектор управления $\overline{P}$ для максимизации возможной подачи жидкости заданному подмножеству потребителей при соблюдении минимально допустимых ограничений снизу расходов для остальных потребителей, т. е. максимизировать целевую функцию затрат:

$$F_3(Q) = \sum_{i \in I^*} (Q_i), \quad (23)$$

где I^* – подмножество номера узлов-потребителей.

При ламинарном режиме течения жидкости в круглых трубах, когда матрица R в уравнении (11) постоянна, сформулированные задачи оптимизации являются задачами кусочно-линейного программирования, и могут быть сведены к задаче линейного программирования.

Таким образом, на основе рассмотренной математической модели динамики жидкости удается сформулировать задачи оптимального управления гидравлической сетью при установившихся режимах, которые можно решить с помощью математического аппарата линейного программирования. Решение этой задачи будет представлено в следующей статье авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нгуен, Д.Х.** Решение задачи об управлении нестационарной транспортировкой вязкой жидкости по системе трубопроводов [Текст] / Д.Х. Нгуен, В.Н. Козлов, А.Н. Фирсов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2011.

2. **Меренков, А.П.** Теория гидравлических цепей [Текст] / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. –М.: Наука, 1985. –277с.

3. **Басниев, К.С.** Нефтегазовая гидродинамика [Текст] / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Г.Д. Розенберг. –М.: Ижевск. –2005. –544с.

4. **Гусейнзаде, М.А.** Неустановившееся движение нефти и газа в магистральных трубопроводах [Текст]/ М.А. Гусейнзаде, В.А. Юфин. –М.: Недра, 1983. –232с.

5. **Гусейнзаде, М.А.** Методы расчета неустановившегося движения нефтепродуктов и нефти в магистральных трубопроводах с промежуточными насосными станциями [Текст] / М.А. Гусейнзаде, В.А. Юфин. –М.: Недра, 1973.

6. **Козлов, В.Н.** Системный анализ, оптимизация и принятие решений [Текст] / В.Н. Козлов. –М., 2010. –173с.

7. **Козлов, В.Н.** Управления энергетическими системами [Текст] / В.Н. Козлов. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. –492с.

8. **Козлов, В.Н.** Управления энергетическими системами. Электромеханические процессы [Текст] / В.Н. Козлов. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2000. –166с.

УДК 681.5.013

Г.И. Анкудинов, И.Г. Анкудинов

ЛОГИКО-КОМБИНАТОРНЫЙ ПОДХОД К МОРФОЛОГИЧЕСКОМУ СИНТЕЗУ В УПРАВЛЕНИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ

Морфологический подход первоначально использовался для поиска новых проектных решений [1–4], однако в последнее время его применение распространяется и на задачи управления [5]. Классический морфологический синтез основан на понятии «морфологического ящика» (морфологической таблицы), имеющего *n* гнезд, каждое из которых содержит элементы для реализации одного из *n* признаков, характеризующих синтезируемый объект. Формирование состава признаков и вариантов их реализации основано на знаниях о предметной области синтеза, что является характерной особенностью морфологического подхода. Морфологическая таблица порождает множество вариантов, которое можно представить декартовым произведением $\dot{M} = \prod_{i=1}^{n} \dot{X}_i$, где $\dot{X}_i$ – множество элементов, реализующих *i*-й признак, причем множества $\dot{X}_i$, $i \in 1:n$ попарно не пересекаются, т. е. $\dot{X}_i \cap \dot{X}_k = \varnothing$ для $i \neq k$. Последователи классического морфологического подхода используют полный перебор или эвристические приемы для извлечения из морфологи-

ческой таблицы наилучшего варианта [1–5].

Между тем, в работе [6] предложен метод последовательного анализа и отсеивания вариантов для решения задач дискретной оптимизации, в которых множество вариантов также описывается декартовым произведением непересекающихся множеств:

$$\{\min_{\dot{x}\in\dot{M}} f_0(\dot{x}),\ \dot{M}=\prod\nolimits_{i=1}^{n}\dot{X}_i,\ f_j(\dot{x})\le c_j, j\in 1:m\},$$

где $\dot{x}=(\dot{x}_1,\ldots,\dot{x}_n)$, $\dot{x}_i\in\dot{X}_i$, $i\in 1:n$. Пусть целевая функция и функции ограничений являются сепарабельными: $f_0(\dot{x})=\sum_{i=1}^{n} f_{0i}(\dot{x}_i)$ и $f_j(\dot{x})=\sum_{i=1}^{n} f_{ji}(\dot{x}_i)$, $j\in 1:m$. Введем обозначение $a_{ji}=\min_{x_i\in X_i} f_{ji}(\dot{x}_i)$, $j\in 0:m$. Значения переменной $\dot{x}_i\in\dot{X}_i$, принадлежащие $\Delta\dot{X}_{ji}=\{\dot{x}_i \mid f_{ji}(\dot{x}_i)>c_j-\sum_{k\ne i}a_{jk}\}$, являются бесперспективными относительно j-го ограничения, поэтому можно заменить $\dot{X}_i$ на $\dot{X}_i\setminus\Delta\dot{X}_{ji}$. Возможно «сжатие» сомножителей декартова произведения также относительно некоторого значения $c_0\in[a_0,b_0]$ целевой функции, где $a_0=\sum_{i=1}^{n}a_{0i}$, $b_0=\sum_{i=1}^{n}\max_{\dot{x}_i\in\dot{X}_i} f_{0i}(\dot{x}_i)$. Метод последовательного анализа и отсеивания вариантов разрешает при определенных условиях уменьшить объем пространства решений до величины, позволяющей выполнить полный перебор.

К «универсальным» задачам морфологического синтеза в широком смысле можно отнести задачи дискретной оптимизации, в которых множество правильных решений (МПР) формируется на основе знаний о предметной области задачи и имеет более общую структуру, чем декартово произведение. Например, методы линейного псевдобулева (целочисленного) программирования для решения задач структурного синтеза [7] используют все возможности логики псевдобулевых ограничений для представления МПР. В работах [8–10] предложен логико-комбинаторный подход (ЛКП) к анализу исходных данных и решению «универсальных» задач морфологического синтеза. В соответствии с ЛКП для исходного представления МПР используется скобочная нормальная форма (СНФ) алгебры логики, т. е. скобочная форма, в которой отрицание может применяться только к отдельным переменным. МПР имеет вид конъюнкции высказываний, определяющих правила конструирования вариантов. Например, в соответствии с ЛКП представлению МПР в виде произведения непересекающихся множеств $\dot{X}_i$, $i\in 1:n$ соответствует частный случай так называемой *особенной* (сингулярной – англ. singular – особенный) скобочной формы (ОСФ) логики высказываний $F=\bigwedge_{i=1}^{n}\bigvee_{\dot{x}_j\in\dot{X}_i} x_j$, где x_j – логическая переменная, символизирующая включение элемента $\dot{x}_j\in\dot{X}_i$ в решение задачи. Однако в общем случае многофункциональность и импликативные связи элементов, из которых формируется множество вариантов, создают ситуацию, когда ОСФ не может быть построена непосредственно по результатам морфологического анализа.

Если исходные данные получены в результате топологического анализа [11], ЛКП позволяет построить ОСФ для синтеза потоковых схем технических устройств («морфотопологический подход») [12]. В рамках ЛКП предложены символьные методы преобразования исходной СНФ общего вида в ОСФ. В работах [8–10, 12] ОСФ определяется как СНФ, в которой любая пара подформул, являющихся логическими сомножителями, не содержит общих переменных. ОСФ представляет варианты решений составом положительных литералов (неинвертированных логических переменных). Фундаментальное свойство ОСФ с точки зрения построения численных методов решения оптимизационных задач морфологического синтеза, в т. ч. с нелинейными целевыми функциями [12], заключается в том, что ОСФ общего вида соответствует И-ИЛИ-дерево признаков решений и, соответственно, представление МПР (пространства поиска) в виде вариантов иерархической композиции декартовых произведений непересекающихся множеств.

В рамках ЛКП разработаны методы решения дискретных оптимизационных задач, основанные на обобщении численного метода последовательного анализа и отсеивания вариантов на случай представления МПР в виде ОСФ произвольного вида. Программная реализация ЛКП в работах [8–10, 12] основана на использовании ОСФ, полученных с помощью разложения Шеннона. Однако ОСФ, полученные с помощью этого разложения, не могут быть в общем случае использованы для решения оптимизационных задач с максимизируемыми аддитивными показателями. В настоящей статье уточняется понятие ОСФ и приведены усовершенствованные методы построения таких

форм, основанные на использовании «формальных производных».

Особенные скобочные формы первого вида

Определение 1. Развертыванием СНФ назовем результат преобразования СНФ в бесскобочную форму в виде логической суммы конъюнкций литералов, полученных только на основе дистрибутивности конъюнкции относительно дизъюнкции.

Поскольку в процессе развертывания СНФ закон идемпотентности не используется, в общем случае переменная x может появиться со знаком инверсии или без этого знака несколько раз в некоторой конъюнкции литералов. Кроме того, развертывание может порождать конъюнкции литералов, содержащие одновременно некоторую переменную и ее отрицание, т. е. противоречивые конъюнкции литералов, равносильные логическому нулю. Для различения и независимого рассмотрения литералов переменной x будем использовать обозначения x' – для положительных литералов и $\overline{x}'$ – для отрицательных.

Определение 2. Степенью СНФ относительно литерала x' (относительно литерала $\overline{x}'$) назовем максимальное число вхождений этого литерала в элементарные конъюнкции, полученные в результате развертывания СНФ. *Степенью СНФ относительно переменной x* назовем максимальную сумму повторений литерала x' или $\overline{x}'$ в некоторой элементарной конъюнкции, полученной в результате развертывания СНФ.

Определение 3. Особенной, или *сингулярной*, *скобочной формой первого вида*, или ОСФ-1, назовем монотонную скобочную нормальную формулу логики высказываний, в которой любая пара подформул, являющихся логическими сомножителями, не содержит общих переменных.

Каждая конъюнкция, полученная в результате развертывания ОСФ-1, представляет синтаксически правильное решение составом положительных литералов. Пусть $\dot{X} = \{\dot{x}_i \,|\, i \in 1:m\}$ – множество конструктивных элементов, из которых строятся решения, и, соответственно, $X = \{x_i \,|\, i \in 1:m\}$ – множество представляющих их логических переменных. Семантика скобочной формы Φ – это множество правильных решений $\dot{M}$, причем каждое решение из $\dot{M}$ может быть представлено двоичным набором $\vec{x} = (x_1, \ldots, x_m)$, на котором логическая функция Φ принимает значение равное единице. Каждое решение $\eta \in \dot{M}$ будем представлять цепочкой $\eta = \{\dot{x}_i \,|\, F(\vec{x}) = 1$, i-й разряд $\vec{x} = 1\}$. Множество $\dot{M}$ частично упорядочено по отношению включения.

Определение 4. Правильное решение $\eta_H \in M$ назовем *неизбыточным*, если не существует $\dot{\eta} \subset \dot{\eta}_H$, где $\dot{\eta} \in \dot{M}$. Правильное решение $\dot{\eta} \supset \dot{\eta}_H$, где $\dot{\eta}_H \in \dot{M}_H$ назовем *избыточным*.

Таким образом, множество $\dot{M}_H \subset \dot{M}$ неизбыточных решений – это множество всех минимальных элементов $\dot{M}$.

Определение 5. Особенная скобочная форма *порождает*, или *определяет*, МПР составом положительных литералов конъюнкций, полученных в результате ее развертывания.

Для того чтобы выделить переменную $x \in \{x_1, \ldots, x_m\}$ среди множества переменных формулы S, будем использовать обозначение S_x.

Определение 6. Будем называть *неособенной,* или *несингулярной* переменную x в формуле S_x, если эта формула может быть представлена в виде $S_x = \bigwedge_{i=1}^{i=n} S_{i|x}$, где $S_{i|x}$ – i-я подформула S_x, содержащая x. Формулу S_x в этом случае будем называть *неособенной* по x.

Пример 1. Рассмотрим задачу морфологического синтеза, в которой варианты характеризуются двумя признаками (функциями). Первый признак реализуется основными элементами из множества $\{\dot{a}, \dot{b}, \dot{c}\}$, второй – из множества $\{\dot{d}, \dot{e}, \dot{g}\}$. Кроме того, для реализации признаков $\dot{a}$, $\dot{b}$ и $\dot{d}$ требуется вспомогательный элемент $\dot{h}$, а для реализации $\dot{c}$, $\dot{e}$ и $\dot{g}$ – вспомогательный элемент $\dot{v}$, что можно формализовать в виде соответствующих импликаций: $a \to h$, $b \to h$, $d \to h$, $c \to v$, $e \to v$, $g \to v$. Ниже, в примере 7 показано, что при построении ОСФ импликативные связи, выражающие обязательные сочетания элементов, могут быть выражены конъюнкцией соответствующих логических переменных. Поэтому варианты решений в рассматриваемом примере можно описать в виде монотонной неособенной СНФ $((a \vee b)h \vee cv)(dh \vee (e \vee g)v)$, в которой сингулярность нарушена по h и v.

Исходная неособенная нормальная форма F может быть преобразована в ОСФ-1, если к неособенным подформулам S формы F применить разложение Шеннона [8–10, 12]: $S_x = xS_{x=1} \vee \overline{x}S_{x=0}$. Чтобы подчеркнуть, что нас интересует форма представления S, напишем

$$sh(S)_x = xS_{x=1} \vee \overline{x}S_{x=0}, \qquad (1)$$

где $sh(S)_x$ – результат преобразования исходной

формы S к особенному виду относительно x; $S_{x=1}$ и $S_{x=0}$ – остаточные функции, т. е. результат замены в S_x переменной x на логические значения единица и нуль соответственно. Для получения $sh(F)$ применяем преобразование (1) последовательно по всем несингулярным переменным x, начиная с внешних неособенных подформул F, т. е. подформул, имеющих наименьшую глубину вложенности, а затем для всех полученных неособенных промежуточных форм. Поскольку нас интересует МПР порождаемых ОСФ-1 $sh(F)$ в соответствии с определением (5), введем оператор *mon* преобразования немонотонной ОСФ $sh(F)$ в монотонную ОСФ-1. Преобразование *mon* осуществляется заменой в исходной формуле всех отрицательных литералов на логическую единицу с последующими упрощениями на основе соотношения $1 \cdot S = S$, где S – любая формула. Таким образом, результат преобразования немонотонной формы $sh(F)$, содержащей вхождения отрицательных литералов $\overline{x}_1, \ldots, \overline{x}_n$, в монотонную форму имеет вид:

$$mon(sh(F)) = sh(F)_{\overline{x}_1=1,\ \ldots,\ \overline{x}_n=1}. \qquad (2)$$

Преобразование *mon* расширяет множество истинности $sh(F)$ за счет замены отрицательных литералов на логическую единицу и, следовательно, справедливо логическое следование $sh(F) \Rightarrow mon(sh(F))$.

Основное свойство ОСФ-1 $sh(F)$ заключается в том, что для поиска оптимального решения по одному минимизируемому показателю выбор компонента, дающего локальный минимум в каждой дизъюнктивной подформуле, обеспечивает нахождение глобального минимума.

Утверждение 1. Скобочная форма $mon(sh(F))$ может порождать дополнительно избыточные варианты, содержащие избыточные переменные из множества несингулярных переменных исходной формы F.

Доказательство. Пусть СНФ имеет вид $F = (xA \vee B)(xC \vee D)$, где A, B, C и D – подформулы, содержащие другие переменные. С помощью (1) приведем ее к виду $x(A \vee B)(C \vee D) \vee \overline{x}BD$. Монотонное преобразование полученной формулы $x(A \vee B)(C \vee D) \vee BD$ порождает наряду с вариантами, описываемыми подформулой BD, избыточные варианты, описываемые подформулой xBD.

Примеры 2 и 3, приведенные ниже, показывают, что порождение избыточных вариантов решений затрудняет построение численных методов структурно-параметрического синтеза в задачах с максимизируемыми аддитивными показателями. Избыточные варианты имеют вид конъюнкции xS, где S − некоторая подформула, и связаны отношением *одностороннего следования* $xS \Rightarrow S$ с вариантами, представляемыми подформулой S. Источником избыточных вариантов может быть как исходная форма представления МПР, так и способ преобразования исходного представления в ОСФ.

Пример 2. Применив разложения (1) к неособенной форме из примера 1 последовательно по h и v, получим немонотонную ОСФ $(v(a \vee b \vee c)(d \vee e \vee g) \vee \overline{v}(a \vee b)d)h \vee \vee \overline{h}vc(e \vee g)$. Заменой инвертированных переменных на логическую единицу получим ОСФ-1 для рассматриваемого примера: $(v(a \vee b \vee c)(d \vee e \vee g) \vee (a \vee b)d)h \vee vc(e \vee g)$. Эта форма, наряду с вариантами *adh*, *bdh*, *vce* и *vcg*, порождает также варианты *vadh*, *vbdh*, *vceh* и *vcgh*, содержащие избыточные элементы.

Пример 3. Использование ОСФ-1 для максимизируемых аддитивных показателей может привести к неверным результатам из-за наличия морфологических вариантов с избыточными элементами. ОСФ-1, полученную в примере 2, можно рассматривать как иерархию декартовых произведений: $\{\{\{v\} \times \{a,b,c\} \times \{d,e,g\}, \{a,b\} \times \{d\}\} \times \times \{d\}\} \times \{h\}, \{v\} \times \{c\} \times \{e,g\}\}$. Пусть для каждого элемента $\dot{x} \in \{\dot{a},\dot{b},\dot{c},\dot{d},\dot{e},\dot{g},\dot{h},\dot{v}\}$ задано значение аддитивного максимизируемого показателя $p(\dot{x})$:

элемент	...	$\dot{a}$	$\dot{b}$	$\dot{c}$	$\dot{d}$	$\dot{e}$	$\dot{g}$	$\dot{h}$	$\dot{v}$
показатель	...	5	3	2	10	9	8	7	6

Вычисление решения для рассматриваемого примера можно представить формулой, в которой отмечены элементы, имеющие максимальное значение показателя:

$$\max(\max(p(\dot{v}^*) + \max(p(\dot{a}^*), p(\dot{b}), p(\dot{c})) + \max(p(\dot{d}^*), p(\dot{e}), p(\dot{g})),$$
$$\max(p(\dot{a}), p(\dot{b})) + p(\dot{d})) + p(\dot{h}^*),\ p(\dot{v}) + p(\dot{c}) + \max(p(\dot{e}), p(\dot{g}))\ ) = 28.$$

Максимум дает решение $\dot{v}\dot{a}\dot{d}\dot{h}$, содержащее избыточный элемент $\dot{v}$. Оптимальным решением на самом деле является $\dot{v}\dot{a}\dot{e}\dot{h}$ (см. пример 4).

Особенные скобочные формы второго вида

Определение 7. Особенной скобочной формой второго вида, или ОСФ-2, назовем ОСФ-1, не порождающую избыточные варианты решений.

Для построения ОСФ-2 требуется такое разложение исходной формы относительно несингулярных переменных, которое не являлось бы источником появления избыточных вариантов. Для получения сингулярного представления МПР относительно переменной *x* предлагается использовать формальные производные S'_x и $S'_{\bar{x}}$, определяемые следующим образом.

Определение 8. Формальной производной S'_x от булевой формы S_x по x назовем выражение, являющееся логической суммой сомножителей для всех вхождений литерала *x* в S_x. Аналогично определяется формальная производная $S'_{\bar{x}}$ для отрицательных литералов.

Термин «формальная производная» выбран по той причине, что вид S'_x или $S'_{\bar{x}}$ зависит от формы S_x представления булевой функции. Для получения формальных производных S'_x или $S'_{\bar{x}}$ мы используем правила, аналогичные правилам символьного дифференцирования суммы и произведения арифметических выражений. Для упрощения алгоритма преобразования СНФ в ОСФ-2 предполагаем, что анализ и преобразование СНФ начинается с наиболее глубоко вложенных неособенных подформул вида $\bigwedge_{i=1}^{i=n} S_i$, составляющие S_i которых имеют первую степень относительно несингулярной переменной.

Формула разложения S_x по формальным производным относительно *x* принимает следующий вид:

$$S_x = xS'_x \vee \bar{x}S'_{\bar{x}} \vee S_{\bar{x}'=0,x'=0}, \qquad (3)$$

где $S_{\bar{x}'=0,x'=0}$ – остаточная форма, полученная заменой нулевым значением положительных и отрицательных литералов *x* в исходной форме S_x, которая представляет часть исходной скобочной формы S_x, не содержащей вхождений литералов *x* и $\bar{x}$. В разделе 4 рассматривается использование разложения (4) для преобразование в ОСНФ-2 монотонных СНФ, а в разделе 5 – немонотонных СНФ.

ОСФ-2 для монотонных скобочных форм. Можно показать, что для монотонных функций имеет место соотношение

$$S_x = xS'_x \vee S_{x=0}, \qquad (4)$$

справедливое для случая, когда степень S_x относительно *x* равна единице. Рассмотрим построение ОСФ-2 для монотонной функции *F* на основе выявления неособенных подформул *F* вида $\bigwedge_{i=1}^{i=n} S_{i|x}$, где $S_{i|x}$ – i-я подформула вида, несингулярная относительно x. Для рассматриваемого случая предлагается следующее разложение, сингулярное относительно x:

$$\bigwedge_{i=1}^{i=n} S_{i|x} = \begin{cases} x\bigwedge_{i\notin I} S_{i|x=1} \vee \bigwedge_{i=1}^{i=n} S_{i|x=0}, \text{ если существует } I=\{i \mid S'_{i|x}=1\}\neq\varnothing; \\ xS'_{j|x}\bigwedge_{i\neq j} S_{i|x=1} \vee S_{j|x=0}\bigwedge_{i\neq j} S_{i|x} \text{ в противном случае.} \end{cases} \qquad (5)$$

При использовании (5) предполагается, что для формулы $\bigwedge_{i=1}^{i=n} S_i$ выполняется *условие ограниченного перекрестного следования*: переменная *x* является единственной неособенной переменной, для которой имеются подформулы S_i, для которых $S'_{i|x}=1$. Исходная нормальная неособенная булева форма *F* может быть преобразована в ОСФ-2 $fder(F)$, где $fder$ − оператор преобразования, если выполнить разложение (5), начиная с самых глубоко вложенных исходных неособенных подформул исходной формы *F* и всех полученных неособенных промежуточных форм.

Пример 4. Для монотонной неособенной формы из примера 1 выполняется условие ограниченного перекрестного следования. Поэтому для $F=((a\vee b)h\vee cv)(dh\vee(e\vee g)v)$ можно получить ОСФ-2 на основе использования разложения (5): $fder(F)=hd(a\vee b\vee cv)\vee v((a\vee b)h\vee c)(e\vee g)$.

Для числовых данных из примера 2 получим оптимальное решение $\dot{v}\dot{a}\dot{h}\dot{e}$:

$$\max(p(\dot{h})+p(\dot{d})+\max(p(\dot{a}),p(\dot{b}),p(\dot{c})+p(\dot{v})),$$
$$p(\dot{v})+\max(\max(p(\dot{a}),p(\dot{b}))+p(\dot{h}),\ p(\dot{c}))+$$
$$+\max(p(\dot{e}),\ p(\dot{g}))=26.$$

Пример 5. Рассмотрим типичную задачу морфологического синтеза, в которой варианты характеризуются тремя признаками (функциями). Первый признак реализуется морфологическими элементами множества $\{\dot{a},\dot{b},\dot{c}\}$, второй − элементами множества $\{\dot{a},\dot{d},\dot{e}\}$ и третий − элементами множества $\{\dot{d},\dot{g},\dot{h},\dot{v}\}$. Варианты решений можно описать в виде монотонной неособенной

СНФ $F = (a \vee b \vee c)(a \vee d \vee e)(d \vee g \vee h \vee v)$, в которой сингулярность нарушена по a и d. Таким образом, источником монотонной несингулярности в рассматриваемом примере является многофункциональность морфологических элементов. Для рассматриваемого примера выполняется условие ограниченного перекрестного следования и может быть получена ОСФ-2 $fder(F) = d(a \vee b \vee c) \vee (g \vee h \vee v)(a \vee e(b \vee c))$.

Условие ограниченного перекрестного следования не выполняется, например, для выражения $(x \vee y)(ax \vee by \vee c)$. Как правило, в практических задачах морфологического синтеза требование ограниченного перекрестного следования выполняется. Однако если имеется перекрестное следование по двум и более переменным, для построения ОСФ-2 предлагается подход, который можно продемонстрировать на следующем примере.

Пример 6. Имеется формула

$$F = (x \vee y \vee z)S(x, y, z; D_{xy}, D_{xz}, D_{yz}, D_x, D_y, D_z, C),$$

где $S = D_{xy}xy \vee D_{xz}xz \vee D_{yz}yz \vee D_x x \vee D_y y \vee D_z z \vee \vee C$ – это разложение в ряд, аналогичный ряду Тейлора для функций действительных переменных, причем $D_{xy}, D_{xz}, D_{yz}, D_x, D_y, D_z$ – это соответствующие формальные производные от S: $D_x = S'_x$, $D_{xy} = (D_x)'_y$ и т. д. В формуле F сингулярность нарушена по x, y и z. Тогда ОСФ-2 для рассматриваемого примера

$$\begin{aligned} fder(F) &= xS(1, y, z; D_{xy}, D_{xz}, 0, D_x, 0, 0, c) \vee \\ &\vee (y \vee z)S(0, y, z; 0, 0, D_{yz}, 0, D_y, D_z, C)) = \\ &= xS(1, y, z; D_{xy}, D_{xz}, 0, D_x, 0, 0, C) \vee \\ &\vee yS(0, 1, z; 0, 0, D_{yz}, 0, D_y, 0, C) \vee \\ &\vee zS(0, 0, 1; 0, 0, 0, 0, 0, D_z, C) \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} fder(F) &= (x \vee y \vee z) \times \\ &\times (D_{xy}xy \vee D_{xz}xz \vee D_{yz}yz \vee D_x x \vee D_y y \vee D_z z \vee C) = \\ &= x(D_{xy}y \vee D_{xz}z \vee D_x \vee C) \vee (y \vee z) \times \\ &\times (D_{yz}yz \vee D_x x \vee D_y y \vee D_z z \vee C) = \\ &= x(D_{xy}y \vee D_{xz}z \vee D_x \vee C) \vee y(D_{yz}z \vee D_y \vee C) \vee \\ &\vee z(D_z \vee C). \end{aligned}$$

ОСФ-2 для исходных немонотонных скобочных форм. Исходные немонотонные скобочные формы имеют место тогда, когда требуется учитывать импликативные связи морфологических элементов, а также запреты на некоторые их сочетания. Для преобразования немонотонных СНФ в ОСФ-2 рассматриваются вложенные немонотонные подформулы вида $\bigwedge_{i=1}^{i=n} S_{i|\bar{x}',x'}$, где все $S_{i|\bar{x}',x'}$ имеют первую степень относительно x' и $\bar{x}'$. Если в $\bigwedge_{i=1}^{i=n} S_{i|\bar{x}',x'}$ имеются два сомножителя $A_{\bar{x}',x'} = S_{j|\bar{x}',x'}$ и $B_{\bar{x}',x'} = S_{k|\bar{x}',x'}$, где $j \neq k$, причем

$$A'_x \neq \text{const} \text{ и } B'_x \neq \text{const}, \text{ где } \text{const} \in \{0,1\}, \quad (6)$$

то сначала к таким парам сомножителей применяется следующее преобразование

$$\begin{aligned} A_{\bar{x}',x'}B_{\bar{x}',x'} &= x\,A'_x B_{\bar{x}'=0,x'=1} \vee \bar{x}\,A'_{\bar{x}} B_{\bar{x}'=1,x'=0} \vee \\ &\vee A_{\bar{x}'=0,x'=0} B_{\bar{x}',x'}, \end{aligned} \quad (7)$$

где A'_x и $A'_{\bar{x}}$ – формальные производные по x и $\bar{x}$ соответственно.

Затем, если нет пар, удовлетворяющих условию (6), и найдутся вложенные подформулы $\bigwedge_{i=1}^{i=n} S_{i|\bar{x}',x'}$, в которых имеется хотя бы один сомножитель, для которого $A'_x = 1$, используется преобразование

$$\begin{aligned} A_{\bar{x}',x'}B_{\bar{x}',x'} &= x\,B_{\bar{x}'=0,x'=1} \vee \bar{x}\,A'_{\bar{x}} B_{\bar{x}'=1,x'=0} \vee \\ &\vee A_{\bar{x}'=0,x'=0}\,B_{\bar{x}',x''=0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Если нет пар, удовлетворяющих условию (6), и найдутся вложенные подформулы $\bigwedge_{i=1}^{i=n} S_{i|\bar{x}',x'}$, в которых имеется хотя бы один сомножитель, для которого $A'_{\bar{x}} = 1$, используется преобразование

$$\begin{aligned} A_{\bar{x}',x'}B_{\bar{x}',x'} &= x\,A'_x B_{\bar{x}'=0,x'=1} \vee \bar{x}\,B_{\bar{x}'=1,x'=0} \vee \\ &\vee A_{\bar{x}'=0,x'=0} B_{\bar{x}',x'=0}. \end{aligned} \quad (9)$$

Пример 7. Покажем, что импликативные связи, используемые для описания обязательных сочетаний морфологических элементов при построении особенных скобочных форм, могут быть выражены конъюнкцией соответствующих логических переменных. В примере 5 импликативные связи используются для учета разделяемых ресурсов, представленных вспомогательными элементами. В этом примере использование элемента $\dot{b}$ требует, чтобы был использован также элемент $\dot{v}$, то есть $b \to v$. Тогда $(a \vee b \vee c)(b \to v) = (a \vee b \vee c)(\bar{b} \vee v)$. Для выражения $(a \vee b \vee c)(\bar{b} \vee v)$ с помощью правила (10) получаем $bv \vee (a \vee c)(\bar{b} \vee v)$ и $mon[bv \vee \vee (a \vee c)(\bar{b} \vee v)] = bv \vee a \vee c$. Таким образом, для учета импликации $b \to v$ в выражении $(a \vee b \vee c)(b \to v)$ достаточно вместо этого выражения сразу записать $bv \vee a \vee c$.

Для учета запретов на сочетания элементов можно использовать аналогичный прием. Если в примере 5 элемент c не может быть использован совместно с h, то для учета импли-

кации $c \to \overline{h}$ можно вместо c записать $c\overline{h}$: $(a \vee bv \vee c\overline{h})(a \vee d \vee e)(d \vee g \vee h \vee v)$. Для этого выражения с помощью правил (7–9) можно получить особенную форму $a(d \vee g \vee h \vee v) \vee c(d \vee \vee (g \vee v)e) \vee v(d \vee e)b$.

Компьютерный эксперимент. Преобразование исходной СНФ в ОСФ имеет экспоненциальную сложность [8, 10], поэтому исследованы программные реализации алгоритма построения ОСФ-1 на основе разложения Шеннона и алгоритма построения ОСФ-2 с использованием разложений с формальными производными для тестовых задач с исходными неособенными формулами вида

$$\bigwedge_{j=1}^{j=n}[(\bigvee_{i=1}^{i=m} x_i y_{m\times(j-1)+i}) \vee (\bigvee_{i=m+1}^{i=k} z_{j,i-m} u_{j,i-m})],$$

где m – число неособенных переменных; n – число внешних подформул, связанных операцией И; k– число подформул в каждой внешней подформуле. Для $n = 7$ и $k = 7$ число вариантов, порождаемых исходной формулой $N = k^m =$ 823543. Длина исходной скобочной формы $L_{\text{исх}}$ = 212 32-битовых машинных слов.

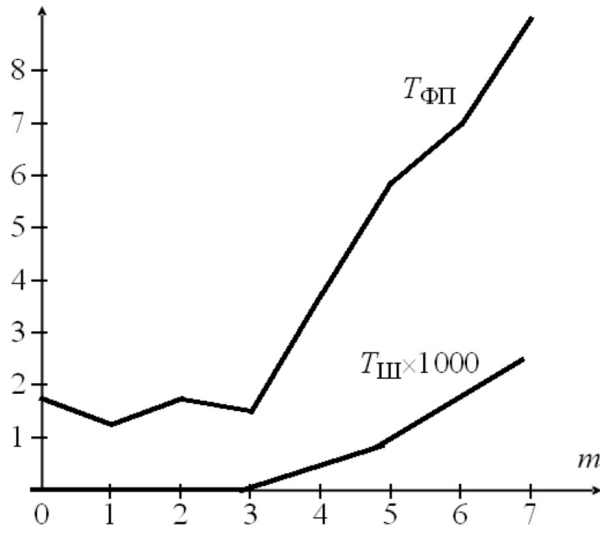


Рис. 1. Время счета, с
m – число неособенных переменных

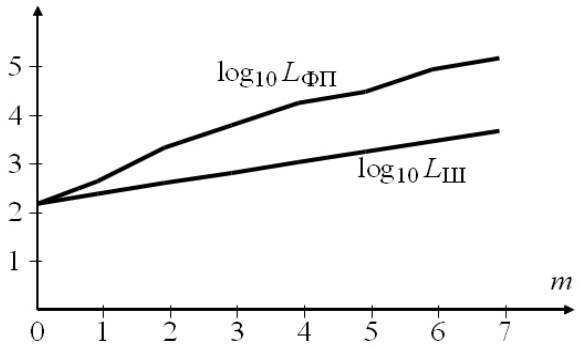


Рис. 2. Число вариантов
m – число неособенных переменных

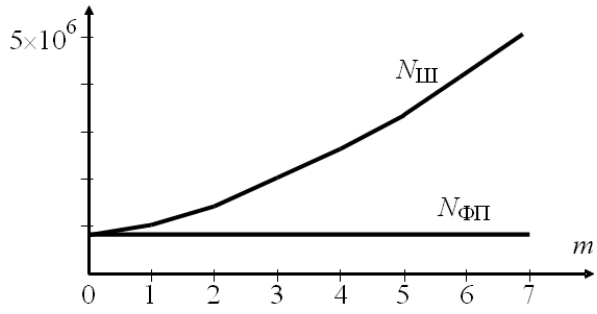


Рис. 3. Длина ОСФ
m – число неособенных переменных

На графиках (рис. 1–3) представлены зависимости времени счета T, числа вариантов N и длины результирующей ОСФ L от числа неособенных переменных при использовании алгоритма с формальными производными (ФП), причем $N_{\text{ФП}} = N =$ = 823543, и при использовании алгоритма на основе разложения Шеннона (Ш). Использовался персональный компьютер Intel Pentium 4 (2,4 GHz).

Несмотря на то, что практическая реализация алгоритмов построения ОСФ-2 целесообразна только для случая ограниченного перекрестного следования между элементами логических сомножителей исходной СНФ, применение предложенных алгоритмов открывает новые возможности для создания методов решения «универсальных» задач морфологического синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zwicky, F.** Morphological Astronomy [Текст] / F. Zwicky. –Berlin: Springer-Verl., 1957.

2. **Дворянкин, А.М.** Методы синтеза технических решений [Текст] / А.М. Дворянкин, А.И. Половинкин, А.Я. Соболев. –М.: Наука, 1977.

3. **Одрин, В.М.** Морфологический анализ систем [Текст] / В.М. Одрин, С.С. Картавов. –Киев: Наук. думка, 1977.

4. **Одрин, В.М.** Морфологические методы решения проблемных задач – раздел технологии научного и технического творчества. V. Морфологический синтез: суть, назначение, классификация и общая характеристика методов [Текст] / В.М. Одрин // УСиМ. –2003. –№ 1. –С. 5–17.

5. **Ritchey, T.** Problem Structuring using Computer-Aided Morphological Analysis [Текст] / T. Ritchey // J. of

the Operational Research Society, Special Issue on Problem Structuring Methods. –2006. –57. –P. 792–801.

6. **Михалевич, В.С.** Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем [Текст] / В.С. Михалевич, В.Л. Волкович. –М.: Наука, 1982.

7. **Цвиркун, А.Д.** Основы синтеза структуры сложных систем [Текст] / А.Д. Цвиркун. –М.: Наука, 1982.

8. **Анкудинов, Г.И.** Об одном общем подходе к синтезу структуры алгоритмов, устройств и систем [Текст] / Г.И. Анкудинов // Кибернетика. –Киев, 1982. –№ 1. –С. 55–68.

9. **Анкудинов, Г.И.** Символьно-численные методы в задачах дискретного программирования с логическими ограничениями [Текст] / Г.И. Анкудинов // Кибернетика. –Киев, 1989. –№ 3. –С. 51–55.

10. **Анкудинов, Г.И.** Синтез структуры сложных объектов [Текст] / Г.И. Анкудинов. –Л.: ЛГУ, 1986.

11. **Грундспенькис, Я.А.** Комплекс алгоритмов синтеза и сравнения структур с нечетко описанными элементами [Текст] / Я.А. Грундспенькис, Я.К. Тентерис // Принятие решений в условиях нестатистической неопределенности. –Рига: Риж. политехн. ин-т, 1982. –С. 35–43.

12. **Анкудинов, И.Г.** Автоматизация структурного синтеза и принятия решений в управлении и проектировании [Текст] / И.Г. Анкудинов. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.

УДК 004.896

К.А. Аксёнов, Ван Кай, А.С. Антонова, О.П. Аксёнова, А.А. Липодаева

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫМ ХОЛДИНГОМ

Строительная отрасль – динамично развивающаяся область, требующая применения новых технических решений. Первые лица строительных компаний и холдингов, а также лица, принимающие решения (ЛПР), сталкиваются в процессе принятия решений в сфере управления с многокритериальным выбором между различными альтернативами по обеспечению выполнения в срок всех этапов строительных работ. Эффективное планирование строительных работ – залог достижения заданных показателей продолжительности строительства и стоимости возводимых объектов. Динамичный характер строительного производства и окружающей среды, риски возникновения непредвиденных ситуаций требуют от ЛПР быстрого реагирования и гибкой корректировки разработанных планов. Разработка системы поддержки принятия решений (СППР) в сфере управления строительной компанией (холдингом) актуальна в связи с возрастающей потребностью в автоматизации труда ЛПР по планированию и отслеживанию хода строительных работ.

Технология гибридных агентов мультиагентных процессов преобразования ресурсов

В процессах принятия решений и управления строительством используются проблемно-ориентированные системы сетевого планирования (такие, как MS Project и TimeLine), также на практике встречается применение систем имитационного моделирования (СИМ), в которых модель настраивается под конкретные нужды или существуют готовые шаблоны формализации проблемной области (ARIS с модулем eM-Plant, Arena, AnyLogic, BPsim). Автоматизация процесса принятия решений в управлении строительством на основе ситуационных моделей сетевого планирования описана в [1].

Задача управления строительными работами подразумевает выполнение двух подзадач: 1) планирование сроков работ с распределением ресурсов (трудовых собственных и субподрядных, материально-технических собственных и арендованных, денежных собственных и инвестированных) по отдельным работам; 2) отслеживание в процессе выполнения работ изменений внешней и внутренней среды, оперативную корректировку плана работ с целью достижения их эффективного исполнения с учетом временных, финансовых и ресурсных ограничений.

Решение выделенных задач можно рассматривать под разными углами. Традиционно ЛПР используют при планировании работ метод PERT

(Project Evaluation and Review Technique) – технику оценки и анализа проектов. В рамках данного метода ЛПР осуществляет с помощью специализированных инструментов (например, MS Project, TimeLine) построение диаграмм взаимосвязи событий и работ, характеризуемых длительностью, стоимостью и необходимыми ресурсами. Примерами подобных диаграмм служат сетевые графики и диаграммы Ганта. На основе метода критического пути с помощью сетевых графиков ЛПР выделяют «узкие места» в планировании строительных работ и осуществляют генерацию альтернативных вариантов смещения работ с целью устранения «узких мест», таких, как перегрузка собственных ресурсов, превышение лимита стоимости отдельных работ, в т. ч. вследствие использования большого объема субподряда. В дальнейшем полученные варианты планирования реализуются в ряд сетевых диаграмм взаимосвязи работ и событий, анализируя которые ЛПР выделяют наиболее эффективное решение с учетом существующих ограничений.

Недостаток подобного подхода к планированию строительных работ – частичная автоматизация труда ЛПР по построению сетевых графиков/диаграмм Ганта и выявлению «узких мест» в планировании, в то время как существенный объем работ по генерации альтернативных вариантов планирования и выбору наиболее эффективного варианта осуществляется ЛПР вручную на основании квалификации, опыта и применяемых эвристик учета различных факторов среды. В связи с этим рассмотрим другой подход к решению задачи управления строительными работами: использование имитационного мультиагентного моделирования.

Формализуем процессы управления строительными работами с помощью модели мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР) [2], которая позволяет в динамике оценить показатели выполнения и стоимости процессов (время выполнения, наличие дублирующих функций, стоимость процесса, затраты на заработную плату сотрудников и т. д.), а также оценить показатели эффективности процессов (рентабельность, отношение времени исполнения ко времени ожидания, отношение фактического времени исполнения к плановому времени). Применение мультиагентного моделирования обеспечивает с помощью базы знаний агентов формализацию модели ЛПР и накопленных сценариев решения задач в области управления строительными работами. Преимущества модели МППР и реализующей данную модель системы динамического моделирования ситуаций (СДМС) BPsim.MAS по сравнению с упомянутыми ранее СИМ заключаются в проблемной ориентации модели на процессы преобразования ресурсов, использовании в модели агентного подхода, ориентации системы на непрограммирующего пользователя (ЛПР).

На основе архитектуры гибридного агента МППР можно создавать следующие виды агентов, для решения различных прикладных задач:

реактивные агенты, поведение которых определяется реактивной подсистемой и описывается только диаграммой деятельности (конечным автоматом). Данный вид агентов используется для задач динамического моделирования МППР;

реактивно-интеллектуальные агенты, поведение которых определяется реактивной подсистемой и описывается только продукционной базой знаний (тактической). Данный вид агентов используется для задач динамического моделирования МППР, описания моделей ЛПР, управляющих процессами;

интеллектуальные агенты, поведение и логика работы которых определяется только планирующей подсистемой, а знания хранятся в фреймовой базе знаний (стратегической). Данный вид агентов используется для построения проблемно-ориентированных интеллектуальных систем на основе аппарата фреймовых экспертных систем (задачи диагностики, проектирования, построения советующих ЭС и систем технико-экономического проектирования);

гибридные агенты, полностью реализующие функциональность архитектуры гибридного агента МППР. Данный вид агентов используется для построения сложных, интеллектуальных систем управления и планирования, контур которых состоит из двух элементов: динамической модели процесса управления и блока (модуля), реализующего поиск решения многопараметрической задачи и выработки (генерации) управляющего воздействия на модель процесса управления.

Применение технологии гибридных агентов МППР для формализации процессов управления строительными работами позволяет автоматизировать функции ЛПР по генерации альтернативных вариантов решения различных задач: поиску инвесторов и поставщиков материалов, выбору субподрядных организаций, обнаружению и ликвида-

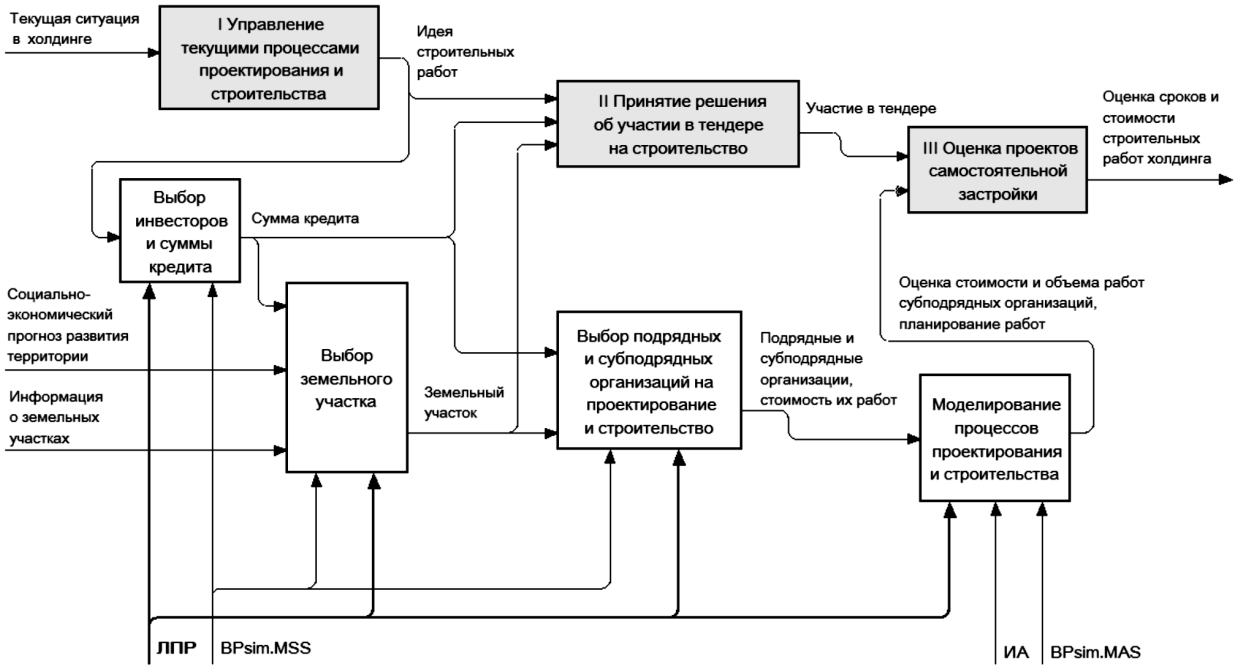


Рис. 1. Контур управления строительными работами

ции «узких мест» в планировании. Использование технологии гибридного агента предполагает описание предметной области с помощью различных по функциональности программных продуктов, интегрированных в единую систему поддержки принятия решений: СДМС BPsim.MAS и системы технико-экономического проектирования (ТЭП) BPsim.MSS [3]. Система ТЭП BPsim.MSS реализует технологию интеллектуальных агентов (ИА), обеспечивающую пользователя инструментом разработки проблемно-ориентированных интеллектуальных систем. Технология ИА позволяет автоматизировать труд ЛПР по решению задач анализа и синтеза организационно-технических систем, таких, как реинжиниринг бизнес-процессов [4], управление проектами, управление строительными работами.

На рис. 1 представлен контур управления строительными работами на основе технологии гибридных и интеллектуальных агентов МППР.

За основу динамической модели процессов проектирования и строительства, реализованной в BPsim.MAS, взята модель МППР, обеспечивающая поддержку планирования работ и оценки различных проектов самостоятельной застройки. Модель поиска решений, реализованная в BPsim.MSS, лежит в основе поиска эффективных решений многокритериальных задач управления строительными работами: управления текущими процессами строительства и проектирования, принятия решений об участии в тендере на строительство. В результате интеграции предложенных моделей достигается комплексная автоматизация труда ЛПР по управлению строительным холдингом.

Разработка моделей строительного холдинга Wan Bao

В ходе обследования предметной области были выявлены следующие этапы управления строительными работами: формирование бизнес-плана, отражающего предполагаемые экономические показатели деятельности холдинга при определенных начальных условиях, получение кредита на строительство, участие в тендере на строительство, планирование проектных и строительных работ, проведение проектных и строительных работ, осуществление продажи/сдачи в аренду площадей возведенных объектов.

В инструменте BPsim.MSS описаны основные классы, отражающие содержание баз данных холдинга по поставщикам материалов, характеристикам земельных участков, субподрядным организациям, структуре холдинга, кредитным организациям и т. д. На основании разработанной диаграммы классов был спроектирован ИА

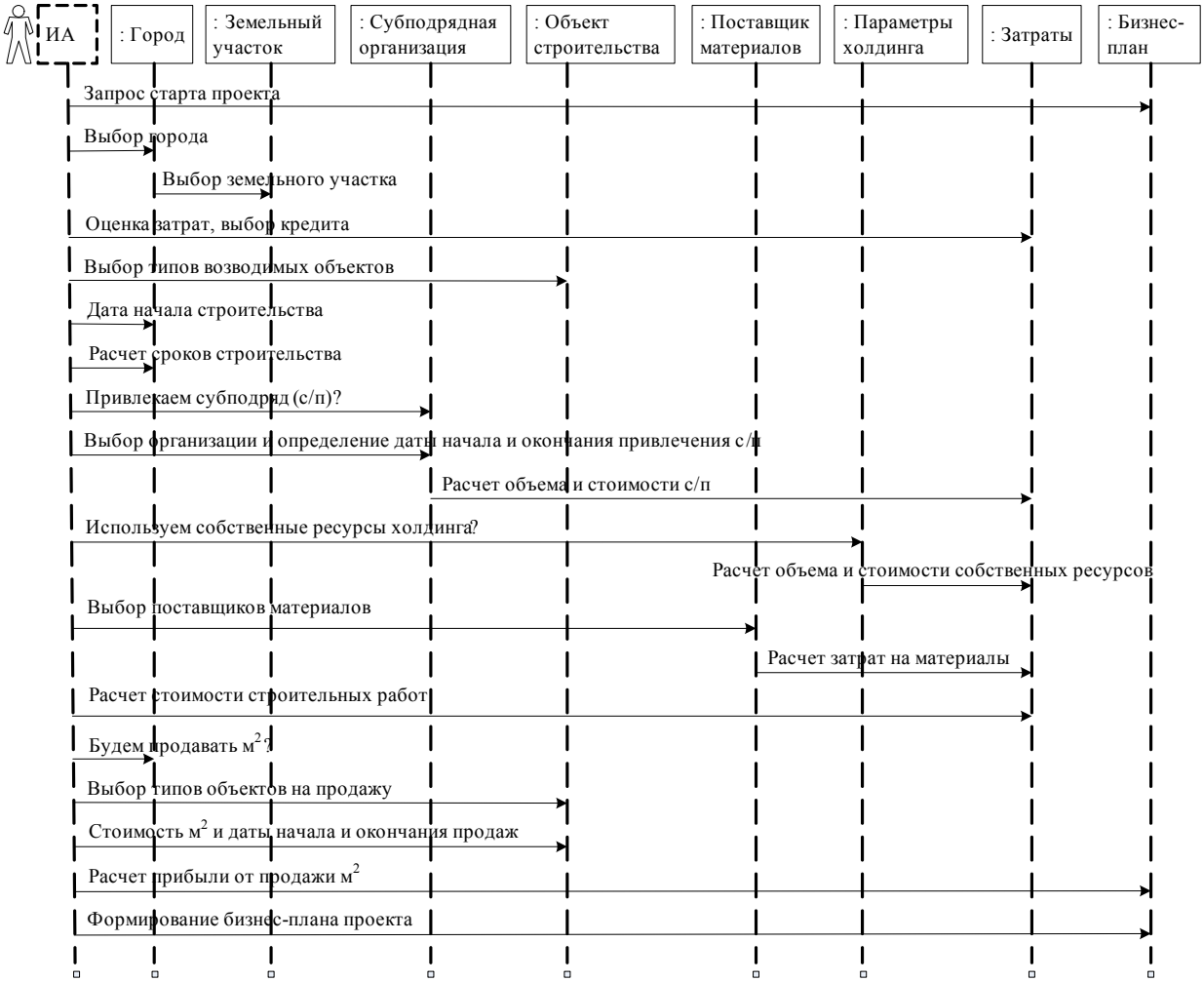


Рис. 2. Диаграмма поиска решений ИА бизнес-планирования строительных работ

бизнес-планирования, обеспечивающий в автоматизированном режиме генерацию альтернативных вариантов бизнес-планов строительных работ. ЛПР осуществляет оценку предложенных планов и выбор более выгодного плана с экономической точки зрения. На рис. 2 представлена диаграмма поиска решений ИА бизнес-планирования.

Начальные условия выбранного бизнес-плана подаются на вход разработанной в BPsim.MAS имитационной модели МППР проектных и строительных работ. Модель предназначена для оценки влияния управляющих решений на динамические характеристики процессов проектирования и строительства холдинга Wan Bao. К данным характеристикам относятся: фактическая стоимость процессов, перераспределение ресурсов (денежных, материальных и трудовых) между процессами, простои в работах, перегрузки отдельных процессов, выявленные процессы, требующие подключения субподрядных ресурсов, фактические суммарные объемы рабочей силы и материалов, фактическая длительность процессов. Оценку характеристик среды осуществляют в модели интеллектуально-реактивные агенты.

Рассмотрим описание базы знаний (БЗ) следующих агентов: агента операций *AOp*, отвечающего за выявление в модели операций, требующих подключение субподряда; агента распределения *AP*, реализующего захват заявки на выполнение операции и распределение ресурсов холдинга *Rхолд* и субподрядных ресурсов в процессе выполнения операции *Op*. Описанные атрибуты заявки *z* на выполнение операций представлены в табл. 1.

В ходе разработки БЗ агентов были использованы следующие операторы работы с заявками: *Select(z,Node)* – заявка *z* захвачена узлом *Node*;

Таблица 1

Определение атрибутов заявки *z* на выполнение операции *Op*

Обозначение	Описание
z_p	Требуемые трудозатраты на выполнение операции *Op*
z_s	Трудозатраты по операции *Op*, отнесенные на субподряд
z_time	Оставшееся время выполнения операции *Op*
z_pr	Признак привлечения субподряда для выполнения операции *Op*: 0 – не привлекаем субподряд; 1 – привлекаем субподряд
z_owner	Узел-владелец заявки *z* (агент *AOp* или *AP*, операция *Op*, следующий узел модели *NextNode*)
z_d	День начала операции *Op*
z_m	Месяц начала операции *Op*

Таблица 2

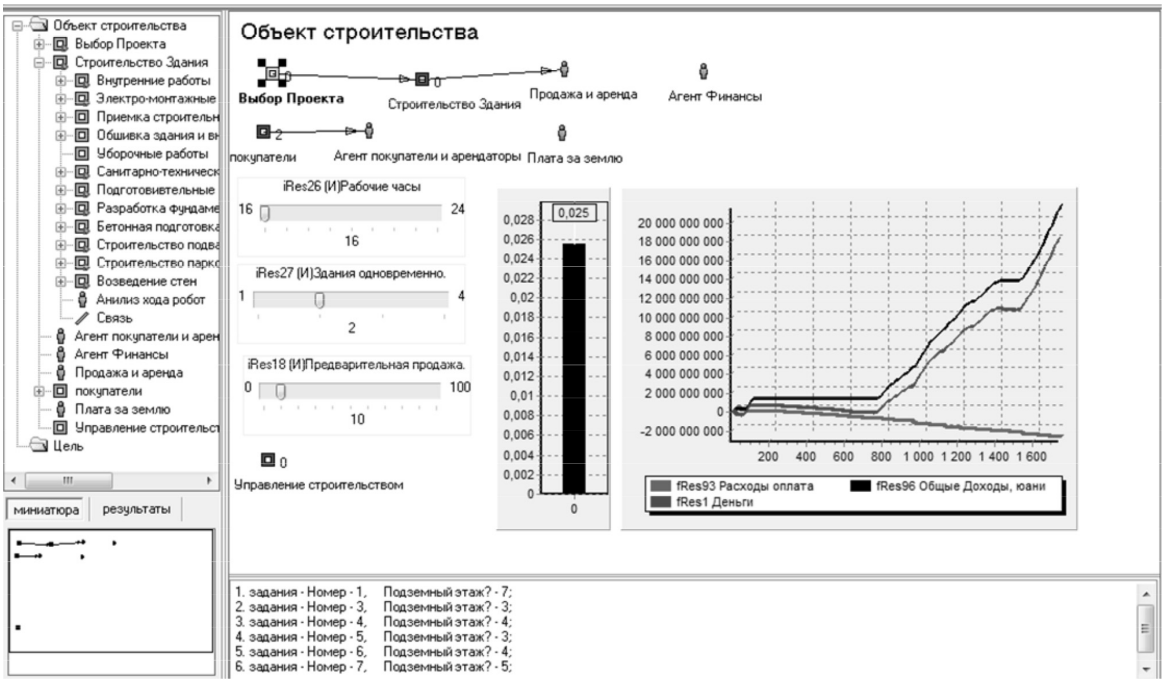
БЗ агентов операции и распределения и описание узла-операции

База знаний агента операции *AOp*		
Описание ситуации	Условие IF	Условие THEN
Субподряд для выполнения операции не требуется, достаточно своих ресурсов	*Select(z,AOp)*	*Rхолд:= Rхолд-z_p*
	(iRes43=z_d)&(iRes44=z_m)	*z_pr:=0*
	z_p≤Rхолд	*z_owner:=«Op»*
Субподряд для выполнения операции требуется, недостаточно своих ресурсов	*Select(z,AOp)*	*z_s:=z_p - Rхолд*
	(iRes43=z_d)&(iRes44=z_m)	*Rхолд:=0*
	z_p>Rхолд	*z_pr:=1*
		z_owner:=«Op»
Условия запуска и ресурсы на выходе операции *Op*		
Длительность	Условия запуска	Ресурсы на выходе
z_time	*Select(z,Op)*	*Rхолд:=Rхолд+z_p*
	z_pr=0	*z_owner:=«NextNode»*
База знаний агента распределения *AP*		
Описание ситуации	Условие IF	Условие THEN
Захват агентом *AP* заявки с требованием субподряда при условии незанятости агента	*Select(z,AP)<>1*	*z_owner:=«AP»*
	Select(z,Op)	
	z_pr=1	
Время выполнения операции закончилось	*Select(z,AP)*	*Rхолд:= Rхолд+z_p - z_s*
	z_time=0	*z_owner:= «NextNode»*
Время выполнения операции не закончилось и субподряд уже не требуется	*Select(z,AP)*	*z_pr:=0*
	z_time>0	*Rхолд:= Rхолд-z_s*
	Rомд ≥ z_s	*z_owner:=«Op»*
Время выполнения операции не закончилось и субподряд еще требуется	*Select(z,AP)*	*z_time:= z_time-1*
	z_time>0	
	Rхолд< z_s	

Select(z,Node)<>1 – заявка *z* не захвачена узлом *Node*. Также при описании БЗ были использованы переменные, сопоставляющие время имитации и календарное время: *iRes43* – текущий день, *iRes44* – текущий месяц. Описание БЗ агентов *AOp* и *AP* и операции *Op* приведено в табл. 2.

На рис. 3 *а* представлена структура модели МППР процессов строительных работ в BPsim.MAS, на рис. 3 *б* – декомпозиция узла «Строительство здания».

а)



б)

Рис. 3. Вид имитационной модели процессов строительных работ в BPsim.MAS:
а – Структура имитационной модели процессов строительных работ; *б* – Декомпозиция узла модели «Строительство здания»

Оптимизация разработанной имитационной модели МППР

В ходе проведения экспериментов с имитационной моделью строительного холдинга Wan Bao было установлено, что предложенная в модели детализация строительных работ (более 120 операций, порядка 90 ресурсов) влечет за собой увеличение объема требуемых для проведения эксперимента вычислительных ресурсов и машинного времени. Кроме того, при моделировании строительства двух и более объектов возникают перегрузки отдельных цепочек операций, что ведет к увеличению очередей заявок и простою дальнейших работ. Для устранения подобных проблем проведена оптимизация модели МППР с помощью ИА анализа и синтеза и применения процедур свертки и реинжиниринга [4–5].

Применение интеллектуального агента анализа и синтеза [4] обеспечило проведение анализа загрузок цепочек операций и построение параллельных веток операций к цепочкам, загрузка которых превышает допустимую (возникают очереди). Реинжиниринг операций позволил снять их перегрузку и сократить общее время выполнения. Применение процедур свертки [5] привело к сокращению времени эксперимента и уменьшило ресурсоемкость имитационной модели. Свертки представляют собой процедуры структурного и/или параметрического синтеза, направленного на элементы модели МППР, такие, как операции и базы знаний агентов. Статистика, по правилам свертки, примененным к модели строительного холдинга, представлена в табл. 3.

В результате проведенной оптимизации время эксперимента при моделировании строительства одиннадцати объектов сократилось на 46 % к шестому году моделирования.

Проведение эксперимента с моделью строительного холдинга Wan Bao

Имитационный эксперимент с моделью строительного холдинга проводился со следующими начальными условиями и упрощениями: осуществление строительства одиннадцати объектов с последующей продажей возведенных площадей; осуществление строительства целиком на деньги кредитных организаций с учетом выплаты беспроцентного кредита; наличие в собственности пригодного для строительства земельного участка; наличие на складе всех необходимых для строительства материалов; расчет прибыли без учета налогов.

Оценим в динамике следующие выходные характеристики модели: текущие расходы на выплату кредита и заработную плату рабочим *fRes93*; доход от продаж возведенных площадей *fRes96*; остаток на счете *fRes1=fRes96-fRes93*, подразумевающий прибыль без учета налогов, процентов по кредиту, стоимости земельного участка и материалов.

Результаты экспериментов, проведенных с моделью МППР, сохраняются в MS Project и MS Excel (рис. 4).

Согласно проведенному эксперименту, тенденции роста остатка денежных средств на счете связаны с окончанием строительства отдельных объектов и с существенным увеличением объемов продаваемых площадей. Расходы проекта на конец имитационного эксперимента достигли значения $3{,}4 \cdot 10^9$ юаней. Сумма средств на счете ко времени окончания моделирования достигла значения $6{,}76 \cdot 10^9$ юаней.

Данные эксперимента согласуются со статистическими данными работы строительного холдинга Wan Bao на протяжении пяти лет (с июня 2005 по август 2010 г.). Следовательно, можно сде-

Таблица 3

Статистика применения правил свертки и реинжиниринга к имитационной модели холдинга Wan Bao

Наименование правила свертки	Количество изменений
Две и более параллельные операции	Свернуто 9 операций
Две и более последовательные операции	Свернуто 2 операции
Служебная (неиспользуемая) операция	Свернуто 3 операции
Независимое средство	Удалено 2 средства
Добавление параллельных операций	Добавлено 4 операции

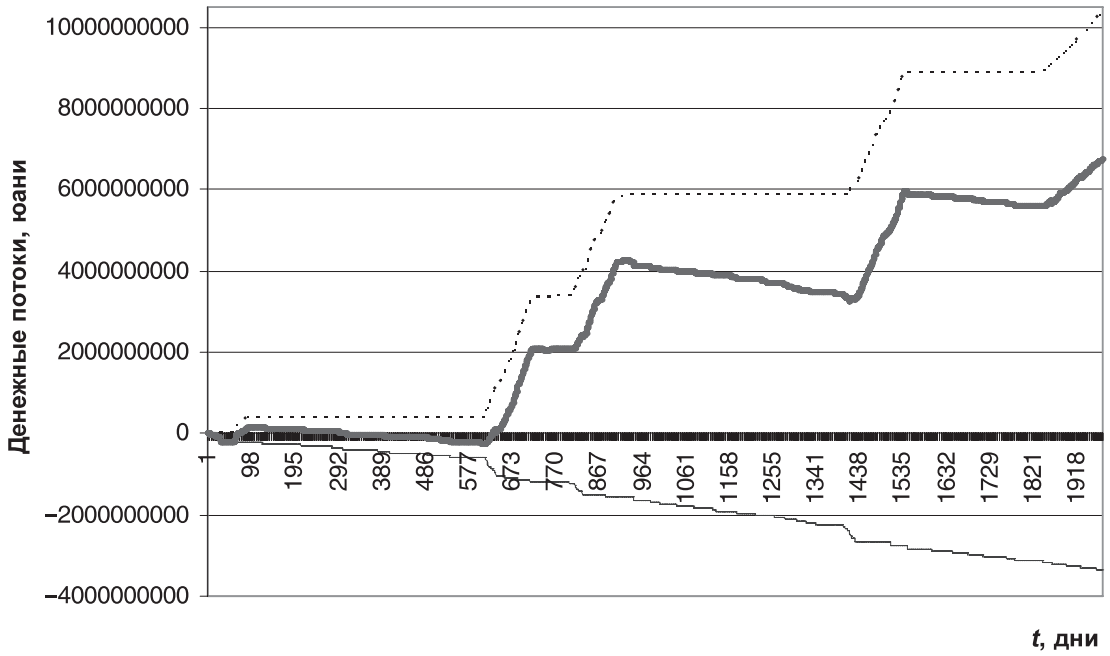


Рис. 4. Диаграмма денежных потоков в MS Excel
(--------) доход от продаж fRes96; (————) текущие расходы fRes93; (————) остаток на счете fRes1

лать вывод об адекватности разработанной имитационной модели МППР объекту управления.

Применение СППР на основе технологии гибридных агентов МППР в управлении строительным холдингом обеспечивает автоматизированное решение ЛПР следующих задач анализа и синтеза сложных организационно-технических систем: формирование бизнес-плана работ с помощью разработанного в BPsim.MSS ИА бизнес-планирования; планирование проектных и строительных работ на основании оценки динамических характеристик процессов при проведении экспериментов с разработанной имитационной моделью в BPsim.MAS, включая оценку объема субподрядных работ. Интеграция технологий диалоговых экспертных систем и имитационного мультиагентного моделирования обеспечивает непрерывную комплексную поддержку принятия решений в сфере управления строительным холдингом.

Работа выполнена в рамках госконтракта 02.740.11.0512.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Старцев, М.А.** Интегрированная информационная система для автоматизированного управления процессом капитального строительства на промышленном предприятии на основе иерархических ситуационных моделей сетевого планирования: Дис. … канд. техн. наук [Текст] / М.А. Старцев. –Уфа: Изд-во Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 1999. –16 с.

2. **Аксёнов, К.А.** Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов [Текст] / К.А. Аксёнов, Н.В. Гончарова. –Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. –311 с.

3. **Аксёнов К.А.** Разработка и применение объектно-ориентированной системы моделирования и принятия решений для мультиагентных процессов преобразования ресурсов [Текст] / К.А. Аксёнов, И.И. Шолина, Е.М. Сафрыгина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2009. –№80. –С. 87–97.

4. **Аксёнов, К.А.** Анализ и синтез процессов преобразования ресурсов на основе имитационного моделирования и интеллектуальных агентов [Текст] / К.А. Аксёнов, А.С. Антонова, И.А. Спицина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 1 (115). –С. 13–19.

5. **Аксёнов, К.А.** Задача свертки имитационной модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов [Текст] / К.А. Аксёнов, Ван Кай // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –№ 1 (115). –С. 126–132.

УДК 303.732.4

К.Ю. Дибихин, Н.В. Вагапова

СИСТЕМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ (НА ПРИМЕРЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА)

Разнообразие методов и средств защиты растений приводит к необходимости выбора наиболее эффективных технологических решений. Специфика данной проблематики заключается в использовании системного подхода к анализу, идентификации и синтезу структур, представленных средствами наземного и авиационного комплексов. Цель исследований – разработка методики оценки эффективности наземного и авиационного комплексов на основе методов сравнительного анализа.

В соответствии с выводами, приведенными в [1], относим исследуемый объект к сложным техническим системам, представленным двумя компонентами: наземными средствами и средствами сельскохозяйственной авиации, как показано на рис. 1.

Первое направление – методы внесения минеральных удобрений и химических веществ наземным способом [2, 3], нашедшим широкое распространение вследствие следующих определяющих причин:

1) доступность и невысокая стоимость транспортных средств;

2) упрощенная схема технического обслуживания.

3) возможность интеграции в сельскохозяйственное предприятие;

4) невысокая стоимость горюче-смазочных и расходных материалов;

5) приемлемые требования к уровню подготовки персонала;

6) возможность эксплуатации в ночное время.

Второе направление – сельскохозяйственные авиационные работы – неотъемлемая часть процесса выращивания и сохранения урожаев, применяются для борьбы против насекомых-вредителей, для уничтожения гербицидами сорняковых растений. Проводимые авиацией агротехнические мероприятия также включают:

внесение минеральных удобрений;

борьбу с сорной растительностью;

удаление листьев (дефолиация) сельскохозяйственных культур;

ускорение созревания (десикация) сельскохозяйственных культур;

аэросев многолетних трав;

внесение средств биологической защиты и стимуляторов роста.

Использование авиации обусловлено следующими преимуществами:

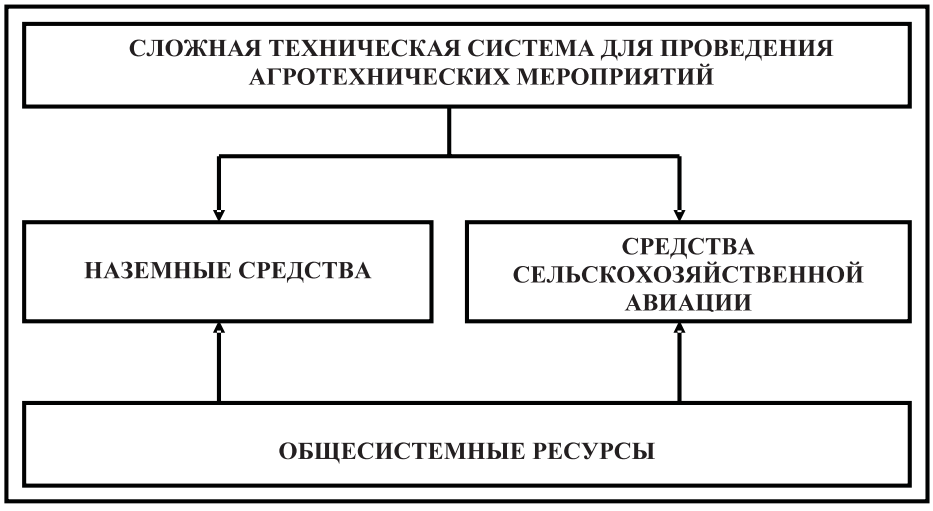


Рис. 1. Структурная модель сложной технической системы для проведения агротехнических мероприятий

Рис. 2. Структурная модель наземных средств для проведения агротехнических мероприятий

возможностью обрабатывать посевы в период их роста и развития;

выполнением полетов над полями во время размокания почвы;

высокой технологичностью;

высокой производительностью в сочетании с высоким качеством;

высокой экономической эффективностью.

Компонента, представленная наземными средствами, может быть реализована в виде структурной модели, показанной на рис. 2.

Общесистемные ресурсы распределяются между действующими и обеспечивающими компонентами. Средства сельскохозяйственной авиации в компонентном аспекте включают: действующие компоненты, выполняющие авиационные работы и обеспечивающие компоненты, включающие средства обслуживания (СО). Сбор и анализ информации средствами приобретения (СП), ее обработка и хранение осуществляются средствами (СПОИ). В составе действующих компонент выделяем:

летательный аппарат как средство доставки (СД);

навесное оборудование как средство исполнения (СИ);

химические вещества как средства воздействия (СВ);

культурные растения и почва как объекты воздействия (ОВ);

авиационно-техническую базу как средство базирования (СБ).

Состав средств сельскохозяйственной авиации в компонентном аспекте представлен на рис. 3.

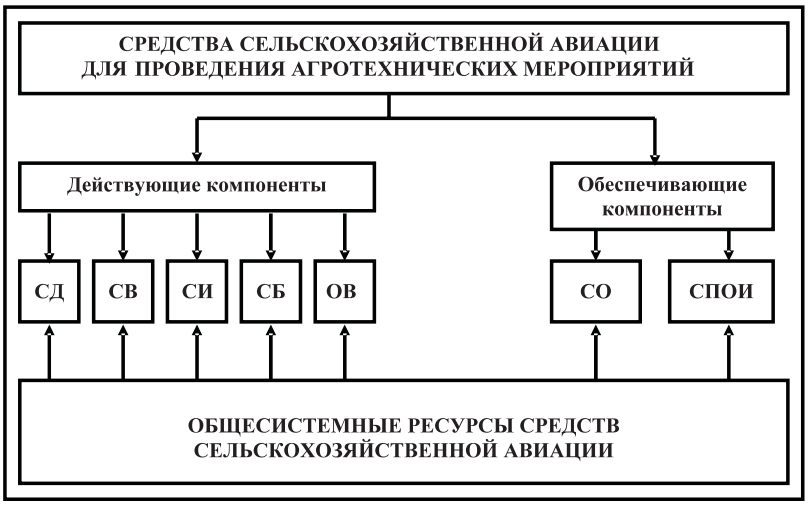


Рис. 3. Структурная модель средств сельскохозяйственной авиации для проведения агротехнических мероприятий

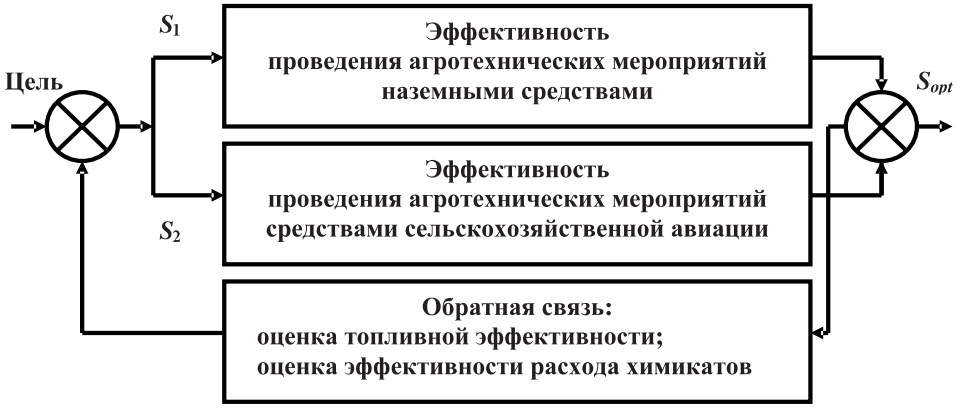


Рис. 4. Структурная схема управления процессом выбора технологических структур для проведения агротехнических мероприятий

Представленные компоненты объединены ресурсами подсистемы управления. Планирование технологии осуществляется на основе анализа альтернативных технологических структур S_1, S_2, …, S_n и обусловлено необходимостью учета:

площади обрабатываемых участков;

удаленности обрабатываемых участков.

Структурная схема управления процессом выбора технологических структур S_{opt} представлена на рис. 4.

Процесс выбора реализуется через описание

$$S_{opt} = \begin{vmatrix} Q_{\text{хим}} = \text{const}; \\ \Pi \to \max; \\ q_m \to \min \end{vmatrix}, \qquad (1)$$

где $Q_{\text{хим}}$ – расход химикатов на площади, кг(л)/га; П – производительность технических средств, га/ч; q_m – коэффициент топливной эффективности, определяемый по формуле:

$$q_m = \frac{M_{\text{топл}}}{T_{\text{п.ц.}}}, \qquad (2)$$

где $M_{\text{топл}}$ – количество топлива, израсходованного за производственный цикл, кг (л).

На основе расхода химикатов $Q_{\text{хим}}$ определяется производительность:

$$\Pi = \frac{60 \cdot M_{\text{хим}} \cdot \varphi}{Q_{\text{хим}} \cdot T_{\text{п.ц.}}} \text{ га/ч}, \qquad (3)$$

где $M_{\text{хим}}$ – общая масса химических веществ, кг (л); φ – коэффициент загрузки средства доставки; $T_{\text{п.ц.}}$ – время выполнения производственного цикла, мин.

Методологические основы построения системы поддержки принятия решения, обусловленные рядом специфических особенностей системного подхода, заключающихся в тесной взаимосвязи образующих подсистем, представлены функционально зависимыми:

технологиями;

технологическими структурами;

технологическими параметрами.

Реализации, получаемые от системы поддержки принятия решения, подчинены принципам функциональной и причинно-следственной иерархии структуры уровней моделирования. Первый, наиболее высокий уровень, определяет технологию проведения агротехнических мероприятий на основе использования наземных средств или средств сельскохозяйственной авиации. Второй уровень представлен технологическими структурами, реализующими на практике этапы технологического процесса, включающие процесс технологической подготовки, подготовительные операции и, непосредственно, технологические операции. Третий уровень включает детальные описания технологических параметров и технологических режимов проведения агротехнических мероприятий, отображающих специфику использования различных подходов, методов и технологических приемов.

Обособленный, надсистемный или организационный уровень, представленный совокупностью функционально обособленных подсистем и включающий управленческие структуры, реализующие диспетчерские и координирующие функции, образует тактический и стратегический контуры управления. Наличие тактического и стратегического контуров управления позволяет осуществлять:

анализ результатов использования тех или иных технологий;

планирование предстоящих агротехнических мероприятий.

Представленная структурная модель процесса выбора рационального варианта совокупности организационных и технологических структур для проведения агротехнических мероприятий и приведенная на рис. 4, позволяет сконфигурировать структурно-функциональную схему системы поддержки принятия решения, представленную на рис. 5.

Концептуально схему и идеологию построения системы поддержки принятия решения о выборе оптимальной технологии проведения агротехнических мероприятий определяет его операционное ядро, представленное двумя подсистемами:

подсистемой сравнительного анализа технологических параметров средств наземного и авиационного комплексов, позволяющей производить оценку результатов деятельности подразделений агропромышленного комплекса;

подсистемой модификации базы данных, позволяющей редактировать и пополнять записи по результатам проведения сезонных агротехнических мероприятий за прошедший отчетный период.

Структурно-функциональная схема системы поддержки принятия решения обусловлена наличием тактического и стратегического контуров управления, представленных, соответственно, информационным и операционным ядром, а также подсистемой стратегического планирования.

В представленной иерархии более низкий, инженерный уровень системы поддержки принятия решения представлен информационным ядром, образованным базами данных:

технологических параметров средств наземного комплекса;

технологических параметров средств авиационного комплекса;

параметров тактических технологических операций, реализуемых наземными средствами или средствами сельскохозяйственной авиации.

Представленные в структурно-функциональной схеме базы данных являются операционной средой системы поддержки принятия решения, реализующей алгоритм функционирования системы. Данный алгоритм реализуется на основе взаимодействия исполняемых модулей с базами данных, осуществленных на основе использования

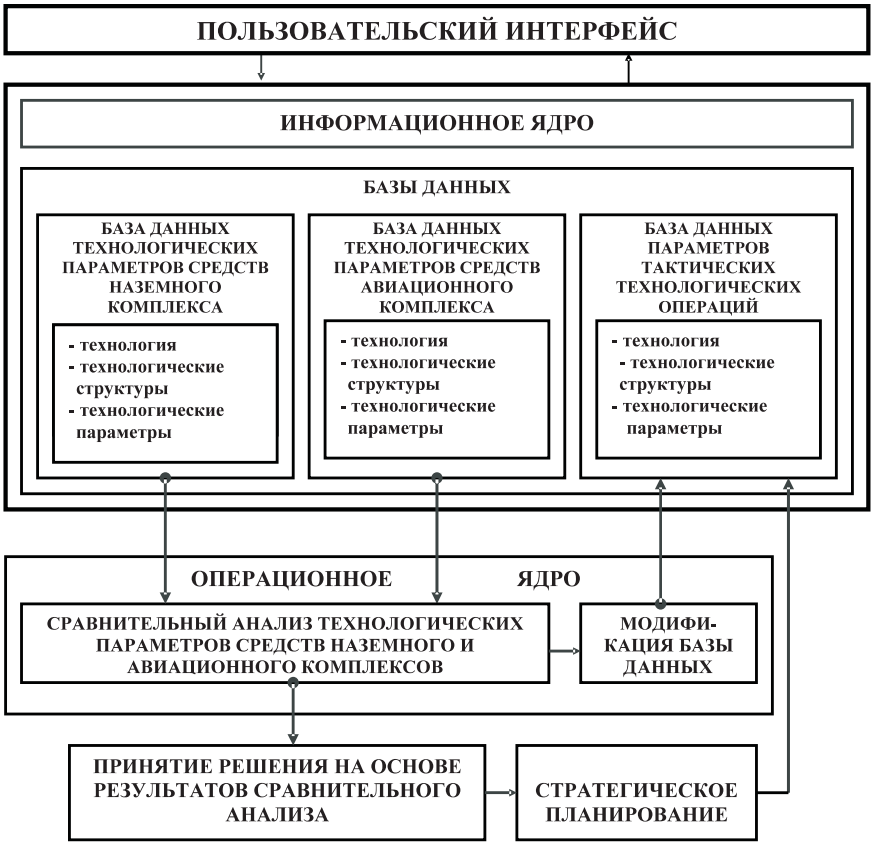


Рис. 5. Структурно-функциональная схема системы поддержки принятия решения

подсистем базовой информационной технологии. Интеграция базовой информационной технологии в агропромышленном комплексе основывается на детальном учете специфики сельскохозяйственного производства, характеризующейся уникальностью понятийного аппарата, обусловливающего необходимость установления достаточно гибких связей информационных и логико-лингвистических моделей. В общем случае, создание файла практически любой базы данных включает три основных этапа:

1. Анализ информации, подлежащей размещению в проектируемом файле базы данных.

2. Создание структуры файла базы данных с описанием параметров включаемых в записи полей.

3. Заполнение файла базы данных информацией в соответствии с заданной структурой.

В базу данных объема и параметров агротехнических мероприятий заносятся данные об общем объеме планируемых работ в соответствии с заданной структурой, определяемой совокупностью учитываемых технологических параметров.

Структура базы данных общего объема и параметров агротехнических мероприятий на территории сельскохозяйственного полигона показана в табл. 1.

Представленная структура базы данных ориентирована на описание сходных технологий, технологических приемов и технологических режимов.

В случае, когда приводится более подробная детализация планируемых сельскохозяйственных работ, структура базы данных может быть модифицирована и ориентирована на специализацию отдельных технологических режимов в рамках описания отдельных сельскохозяйственных участков.

Детализированная структура базы данных объема и параметров агротехнических мероприятий представлена в табл. 2.

Обусловленность представленной детализацией определяет проблематику взаимоисключающих или взаимодополняющих альтернатив, заключающуюся в следующих основных положениях, определяемых концепцией создания базы данных:

создание дополнительной базы данных с «жесткой» (неизменяемой) структурой, что влечет за собой известную информационную избыточность, с вытекающими из этого затратами вычислительных ресурсов;

создание исходной базы данных с гибкой, изменяющейся структурой, допускающей ее текущую модификацию, что приводит, в результате, к необходимости использования более гибкого алгоритма функционирования системы.

База данных технологических параметров наземных средств проведения агротехнических мероприятий предназначена для хранения основных технико-эксплуатационных параметров основных и вспомогательных агрегатов и машин, оборудованных специальными средствами распределения химических веществ и биологических объектов и предназначенных для

Таблица 1

Общий объем и параметры агротехнических мероприятий

Имя поля	Тип поля	Описание
Q	Real (Number)	Объем планируемых работ
t	Real (Number)	Критическое время обработки
q	Real (Number)	Расход химикатов
S	Real (Number)	Общая площадь участков
n	Real (Number)	Количество участков

Таблица 2

Детализированная структура объема и параметров агротехнических мероприятий

Имя поля	Тип поля	Описание
t	Real (Number)	Критическое время обработки
q	Real (Number)	Расход химикатов по участкам
s	Real (Number)	Площадь участка
n	Real (Number)	Количество участков

проведения сельскохозяйственных работ средствами наземного комплекса.

В качестве специальных средств распределения химических веществ и биологических объектов могут использоваться интегрированные или навесные вспомогательные машины и механизмы, обеспечивающие необходимое качество внесения химикатов и соблюдение норм экологической безопасности.

Структура базы данных технологических параметров наземных средств для проведения агротехнических мероприятий представлена в табл. 3.

База данных технологических параметров средств сельскохозяйственной авиации предназначена для хранения информации о параметрах сельскохозяйственных летательных аппаратов. Структура базы данных средств сельскохозяйственной авиации представлена в табл. 4.

Сельскохозяйственные летательные аппараты различаются рядом летно-технических характеристик:

массой пустого и снаряженного;
рабочей скоростью;
максимальной массой загружаемых химикатов;
емкостью топливных баков;
скоростью перелета;
временем производственного цикла
и др.

По результатам проведенных исследований установлено:

1) исследование ряда проблем, обусловленных необходимостью анализа, идентификации и

Таблица 3

Структура базы данных технологических параметров наземных средств проведения агротехнических мероприятий

Имя поля	Тип поля	Назначение
kod	Int (short)	Уникальный код
naim	character	Наименование транспорта
Vtr	Real (Number)	Транспортная скорость
Proizv	Real (Number)	Производительность погрузчика
Povorot	Real (Nu mber)	Время поворота одного агрегата
SCHt	Real (Number)	Рабочая ширина захвата
Qt	Real (Number)	Грузовместимость
Vtr	Real (Number)	Рабочая скорость агрегата
Ctoit	Real (Number)	Балансовая стоимость трактора
Ctoitr	Real (Number)	Балансовая стоимость разбрасывателя
Ostanovka	Real (Number)	Продолжительность технологических остановок трактора, приходящихся на 1 ч
Ostanovrb	Real (Number)	Продолжительность технологических остановок разбрасывателя, приходящихся на 1 ч
Remontt	Real (Number)	Отчисление на реновацию и ремонт трактора
Remontrb	Real (Number)	Отчисление на реновацию и ремонт разбрасывателя
KPDm	Real (Number)	КПД передаточного механизма от вала двигателя к валу отбора мощности
KPDpb	Real (Number)	КПД разбрасывающего рабочего агрегата
KPDtr	Real (Number)	КПД трактора
Copr	Real (Number)	Коэффициент сопротивления перекатыванию разбрасывателя
Zagruz	Real (Number)	Коэффициент средней загрузки двигателя трактора при работе с разбрасывателем
Rashod	Real (Number)	Удельный расход топлива
Cena	Real (Number)	Цена горюче-смазочных материалов
Hranenie	Real (Number)	Издержки на хранение
Plata	Real (Number)	Часовая заработная плата
Vrem	Real (Number)	Время работы транспорта в день
Zagrtr	Real (Number)	Годовая загрузка трактора
Zagrrb	Real (Number)	Годовая загрузка разбрасывателя

Таблица 4

Структура базы данных средств сельскохозяйственной авиации

Имя поля	Тип поля	Назначение
kodik	Int (short)	Уникальный код
VC	character	Воздушное судно
naimen	Character	Наименование транспорта
Zaprav	Real (Number)	Время заправки топливом
Perelet	Real (Number)	Скорость перелета
Razvarot	Real (Number)	Скорость разворота
Visota	Real (Number)	Высота разворота
Vzlet	Real (Number)	Время взлета и посадки
Massa	Real (Number)	Масса загружаемых химикатов
Dvigatel	Int (short)	Количество авиадвигателей
Polosa	Real (Number)	Длина взлетно-посадочной полосы
Rulil	Real (Number)	Время руления до взлета и после посадки
Naletal	Real (Number)	Время налета в производственный день
Mdv	Real (Number)	Мощность двигателей воздушного судна
KoR	Real (Number)	Коэффициент сокращения времени разворота по отношению к стандартному
KoP	Real (Number)	Коэффициент межполевых перелетов
Aerodrom	Real (Number)	Площадь, занимаемая аэродромами авиапредприятия
Toplivo	Real (Number)	Удельный расход топлива
KoUd	Real (Number)	Коэффициент удорожания при капитальном ремонте
MMassa	Real (Number)	Максимальная масса загружаемых химикатов
Grunt	Real (Number)	Удельная допустимая нагрузка на грунт
Cena	Real (Number)	Цена топлива
YE	Real (Number)	Цена у.е.

синтеза средств проведения агротехнических мероприятий, приводит к изменению методологического подхода к их организации и управлению;

2) комплекс проблем, обусловленных спецификой исследуемой предметной области, совокупность общих и частных задач с накладываемыми ограничениями, целесообразно решать с привлечением методов системного подхода;

3) специфика организации и планирования агротехнических мероприятий с использованием наземных средств и средств сельскохозяйственной авиации приводит к необходимости их идентификации как сложных технических систем.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Оценку эффективности подсистем (компонент) сложной технической системы можно осуществить с помощью независимых, ориентированных на конкретную подсистему показателей эффективности.

Идентификация сложной технической системы для проведения агротехнических мероприятий ставит задачу синтеза на основе определения критериев эффективности для множества систем (подсистем), перспективных с точки зрения включения в будущий комплекс.

В качестве критериев эффективности приняты основные классические показатели качества управления: точность, быстродействие и устойчивость; в качестве частных критериев – эффективность используемых технологий; эффективность технологических структур; эффективность технологических параметров.

Предложенные решения позволяют осуществлять системное управление организационными и технологическими структурами конфигурируемого комплекса, направленное на решение си-

стемных задач синтеза оптимальной структуры элементов комплекса, выявления их взаимосвязей и сочетаемости в процессе функционирования.

Представленные подходы и методы идентификации элементов (подсистем) комплекса на основе анализа реализуемых ими функций и протекающих в них процессов, позволяют осуществлять системное управление их поведением в рамках выбираемой или выстраиваемой стратегии развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клиланд, Д.** Системный анализ и целевое управление [Текст] / Д. Клиланд, В. Кинг. –М.: Сов. радио, 1974. –280 с.

2. **Догановский, М.Г.** Машины для внесения удобрений: Конструкции, теория, расчет и испытания [Текст] / М.Г. Догановский, Е.В. Козловский. –М.: Машиностроение, 1972. –272 с.

3. **Догановский, М.Г.** Механизация внесения удобрений [Текст] / М.Г. Догановский, Е.В. Козловский. –Л.: КОЛОС, 1976. –320 с.

УДК 681.3.069

О.М. Проталинский, Т.В. Хоменко

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРЕДМЕТНЫХ ЗАДАЧ ПОИСКОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Обострение конкурентной борьбы в рыночных условиях требует от производителей датчиковой аппаратуры изыскания резервов повышения эффективности производства при сокращении сроков создания изделия, в т. ч. сроков проектирования [1]. Для оптимальной организации начальных этапов проектирования датчиковой аппаратуры широко используются автоматизированные системы поискового конструирования [2], основным недостатком которых является использование классических методов решения задач основных этапов проектирования, неприменимых в условиях даже частичного отсутствия априорных сведений об объекте проектирования.

Следовательно, расширение потенциала автоматизированных систем поискового конструирования возможно при формировании единого пространства различных семантических и синтаксических интерпретаций задач проектирования и интегрировании выявленных взаимосвязей, которое неосуществимо без вскрытия глубинных закономерностей, лежащих в основе начального этапа проектирования.

Для этого, используя аппарат дискретной математики [3, 6] и системного анализа [4], сформируем концептуальное представление задач начального этапа проектирования на основе их последовательного отображения в теоретико-множественный контекст, которое, согласно [5], на трех уровнях абстрагирования имеет вид $\Omega_i = \{\mathrm{K}_i; \Lambda_i\}$, $i = \overline{1;3}$, где

Первый уровень – абстрактный (i = 1), обеспечивающий общее представление систем знаний, $\Omega_1 = \{\mathrm{K}_1; \Lambda_1\}$ представляется:

• множеством категорий $\mathrm{K}_1 = \{K_1; K_2\}$ первого уровня абстрагирования, где

$K_1 := M = \{m_{jk^i}\}$ – информационные категории ($k^i = \overline{1, q^i}$):

«ПРОЦЕСС (m_{1k^1}), СОСТАВЛЯЮЩАЯ (m_{2k^1}), ПРИЗНАК (m_{3k^1})»;

$K_2 := H = \{h_{w^i}\}$ – схемы информационных категорий ($w^i = \overline{1, z^i}$);

• множеством морфизмов $\Lambda_1 = \{\Theta_1; \Psi_1\}$ первого уровня абстрагирования, где

морфизмы $\Theta_1 = \{\rho^1 B_1; \rho^1 N_1\}$ отношения внутренней композиции рассматриваются как множество статических отношений информационных категорий [6]:

$$M\rho^1 B_1 M := \{m_{jk^1}; m'_{jk^1}\} \in \rho^1 B_1 \subset K_1 \times$$

$$\times K_1 \vee M\rho^1 N_1 M := \{m_{jk^1}; \ldots; m'_{jk^1}\} \in \rho^1 B_1 \big|_M \subset \times K_1,$$

отражающих существование отображения подмножеств множества K_1 вида $\rho^1 B_1 : K_1 \times$

$\times K_1 \to K_1 \vee \rho^1 N_1 : K_1 \times \ldots \times K_1 \to K_1$, где ρ^1 = «компоновка» информационных категорий на основе отношения частичного порядка на подмножестве K_1 множества K_1,

морфизмы $\Psi_i = \{E_i; F_i\}$ отношения внешней композиции рассматриваются как множество динамических отношений информационных категорий:

$E_1 = \{e_{l^1}\}$ – множество критериев и ограничений на связи элементов информационных категорий K_1;

$F_1 = \{f_{r^1}\}$ – множество правил, отражающих существование функционального отображения на подмножестве K_3 множества K_1 первого уровня абстрагирования вида $F_1 : K_1 \times E_1 \to K_2$.

На этом основании определены формальные правила перехода от абстрактного к абстрактному уровню (рис. 1); от абстрактного к объектному уровню (рис. 2) концептуального представления.

Прямое произведение объектов K_1 и K_1 – это объект $K_1 \times K_1$ с морфизмами $\rho^1 B_1 : K_1 \times K_1 \to K_1$, такими, что для любого объекта K_1 существует единственный морфизм $f_{r^1} : K_1 \to K_1$.

Прямое произведение объектов K_1 и E_1 – это объект $K_1 \times E_1$ с морфизмами $f_{(r-2)^1} : K_1 \times E_1 \to K_1$ и $f_{(r+2)^1} : K_1 \times E_1 \to E_1$, такими, что для любого объекта K_1 с морфизмами $f_{(r-1)^1} : K_1 \to K_1$ и $f_{(r+1)^1} : K_1 \to E_1$ существует единственный морфизм $f_{r^1} : K_1 \to K_1 \times E_1$.

Второй уровень – объектный ($i = 2$), обеспечивающий представление специфики систем знаний предметной области Ω_2, представляется:

• множеством категорий $K_2 = \{K_1; K_2; K_3\}$ второго уровня абстрагирования, где

$K_1 := D = \{d_{jk^i}\}$ – множество предметных категорий ($k^i = \overline{1, q^i}$):

«ЗАДАЧА (d_{1k^2}), ОБЪЕКТ (d_{2k^2}), АТРИБУТ (d_{3k^2})»;

$K_2 := H = \{h_{w^i}\}$ – множество схем предметных категорий ($w^i = \overline{1, z^i}$);

$K_3 := V = \{v_{t^i}\}$ – множество предметных зависимостей ($t = \overline{1, u}$),

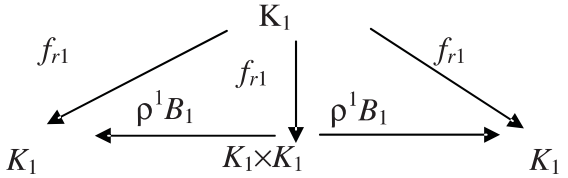


Рис. 1. Формальные правила перехода абстрактного уровня концептуального представления

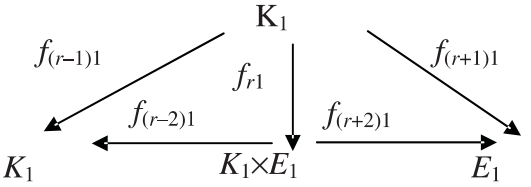


Рис. 2. Формальные правила перехода от абстрактного к объектному уровню концептуального представления

• множеством морфизмов $\Lambda_2 = \{\Theta_2; \Psi_2\}$ второго уровня абстрагирования:

морфизмы $\Theta_2 = \{\rho^* B_2; \rho^* N_2\}$ отношения внутренней композиции рассматриваются как множество статических отношений категорий:

$$D\rho^1 B_2 D := \{d_{jk^2}; d'_{jk^2}\} \in \rho^1 B_2 \subset K_1 \times$$

$$\times K_1 \vee D\rho^2 B_2 D := \{d_{jk^2}; d'_{jk^2}\} \in \rho^2 B_2 \subset K_1 \times K_1 \vee$$

$$\vee D\rho^1 N_2 D := \{d_{jk^2}; \ldots; d'_{jk^2}\} \in \rho^1 \big|_D \subset \times$$

$$\times K_1 \vee D\rho^2 N_2 D := \{d_{jk^2}; \ldots; d'_{jk^2}\} \in \rho^2 \big|_D \subset \times K_1,$$

а также

$$H\rho^1 B_2 H := \{h_{w^2}; h'_{w^2}\} \in \rho^1 B_2 \subset K_2 \times$$

$$\times K_2 \vee H\rho^1 N_2 H := \{h_{w^2}; \ldots; h'_{w^2}\} \in$$

$$\in \rho^1 N_2 \big|_H \subset \times K_2,$$

$$H\rho^2 B_2 H := \{h_{w^2}; h'_{w^2}\} \in \rho^2 B_2 \subset K_2 \times$$

$$\times K_2 \vee H\rho^2 N_2 H := \{h_{w^2}; \ldots; h'_{w^2}\} \in$$

$$\in \rho^2 N_2 \big|_H \subset \times K_2,$$

отражающих существование отображения подмножеств множества K_2 вида

$$\rho^* B_2 : K_1 \times K_1 \to K_1 \vee \rho^* N_2 : K_1 \times \ldots \times K_1 \to K_1 \vee$$

$$\vee \rho^* B_2 : K_2 \times K_2 \to K_2 \vee \rho^* N_2 : K_2 \times \ldots \times K_2 \to K_2,$$

где **ρ1 = «компоновка» категорий на основе отношения частичного порядка, ρ2 = «состав» категорий на основе отношения принадлежности/включения;**

морфизмы $\Psi_2 = \{E_2; F_2\}$ отношения внешней композиции рассматриваются как множество динамических отношений категорий:

$E_2 = \{e_{l^2}\}$ – множество критериев и ограничений на связи K_1,

$F_2 = \{f_{r^2}\}$ – множество правил, отражающих существование функционального отображения на подмножестве K_3 множества K_2 второго уровня абстрагирования в виде:

$$F_2 : K_1 \times E_2 \to K_2 \vee F_2 : K_2 \times E_2 \to K_3.$$

Формальные правила перехода при $i = 2$ от объектного к объектному уровню и от объектного к конкретному уровню концептуального представления предметных задач аналогичны формальным правилам перехода при $i = 1$.

Третий уровень – конкретный ($i = 3$), описывающий множество конкретных фактов систем знаний предметной области Ω_3, представляется:

• множеством категорий $\mathrm{K}_3 = \{K_1; K_2; K_3\}$ третьего уровня абстрагирования, где

$K_1 := A = \{a_{jk'}\}$ – экземпляры предметных категорий:

«ИНГРЕДИЕНТ (a_{1k^3}), КОМПОНЕНТА (a_{2k^3}), ЗНАЧЕНИЕ (a_{3k^3})»;

$K_2 := H = \{h_{w^i}\}$ – схемы экземпляров предметных категорий;

$K_3 := V = \{v_{t^i}\}$ – экземпляры предметных зависимостей ($t = \overline{1,u}$),

• множеством морфизмов $\Lambda_3 = \{\Theta_3; \Psi_3\}$ третьего уровня абстрагирования:

морфизмы $\Theta_3 = \{\rho^* B_3; \rho^* N_3\}$ отношения внутренней композиции рассматриваются как множество статических отношений категорий:

$$A\rho^* B_3 A := \{a_{jk^3}; a'_{jk^3}\} \in \rho^* B_3 \subset K_1 \times$$

$$\times K_1 \vee A\rho^* N_3 A := \{a_{jk^3}; \ldots; a'_{jk^3}\} \in$$

$$\in \rho^* N_3\big|_A \subset \times K_1 \vee$$

$$H\rho^* B_3 H := \{h_{w^3}; h'_{w^3}\} \in \rho^* B_3 \subset K_2 \times$$

$$\times K_2 \vee H\rho^* N_3 H := \{h_{w^3}; \ldots; h'_{w^3}\} \in$$

$$\in \rho^* N_3\big|_H \subset \times K_2,$$

$$V\rho^* B_3 V := \{v_{t^3}; v'_{t^3}\} \in \rho^* B_3 \subset K_3 \times$$

$$\times K_3 \vee V\rho^* N_3 V := \{v_{t^3}; \ldots; v'_{t^3}\} \in$$

$$\in \rho^* N_3\big|_V \subset \times K_3,$$

отражающих существование отображения подмножеств множества K_3 вида

$$\rho^* B_3 : K_1 \times K_1 \to K_1 \vee \rho^* N_3 : K_1 \times \ldots \times K_1 \to K_1 \vee$$

$$\rho^* B_3 : K_2 \times K_2 \to K_2 \vee \rho^* N_3 : K_2 \times \ldots \times K_2 \to K_2 \vee$$

$$\rho^* B_3 : K_3 \times K_3 \to K_3 \vee \rho^* N_3 : K_3 \times \ldots \times K_3 \to K_3,$$

где ρ1 = «компоновка» категорий на основе отношения частичного порядка, ρ2 = «состав» категорий на основе отношения принадлежности/включения, ρ3 = «упорядочивание» категорий на основе отношения полного порядка;

морфизмы $\Psi_3 = \{E_3; F_3\}$ отношения внешней композиции рассматриваются как множество динамических отношений категорий:

$E_3 = \{e_{i^3}\}$ – множество критериев и ограничений на связи элементов экземпляров предметных категорий K_1;

$F_3 = \{f_{r^3}\}$ – множество правил, отражающих существование функционального отображения на подмножестве K_3 множества K_3 третьего уровня абстрагирования в виде: $F_3 : K_1 \times E_3 \to K_2 \vee F_3 : K_2 \times E_3 \to K_3$.

Проведение теоретических исследований предметных задач поискового конструирования ФПД чувствительных элементов на трех уровнях абстрагирования: абстрактном (цель заказчика), объектном (тематика предметной области), конкретном (поиск лучшего решения – физического принципа действия) позволило выявить следующие закономерности:

1) в процессе формирования отношений элементов категорий как внешней, так и внутренней композиции обнаружено повторение применения абстракций как проявление закона цикличности и описания закона цикличности знаковых представлений на каждом уровне абстрагирования;

2) при порождении в модели Ω_i тезауруса набора свойств и требований к атрибутам выявлена принадлежность каждого элемента множества категорий $\mathrm{K}_i = \{K_n\}$ к одному из типов – *контекстуальному*, *структурированному*, *контекстуально-структурированному*; принадлежность каждого элемента множества морфизмов $\Lambda_i = \{\Theta_i; \Psi_i\}$ к одному из типов – *контекстуальному*, *структурному*, *монадическому*.

Так как каждый тип категории множества элементов и множества морфизмов имеет свое семантическое и синтаксическое представление, то для рецепции системы Ω_{i+1} ($i + 1$) уровня абстракции необходима адаптация тезауруса на совместимость элементов и других структурных свойств системы Ω_i i-го уровня абстракции. При выполнении формальных правил перехода от системы Ω_i к системе Ω_{i+1}, такая адаптация определит стратегию ω_i, которая за конечное время τ_Ω обеспечивает достижение цели поискового конструирования ФПД чувствительных элементов системы управления для всякой пары $(\tilde{\eta}; \tilde{\xi})$, состоящей из управляемого процесса $\tilde{\eta}$ и определенного для него функционала $\tilde{\xi}$.

В рамках предложенного концептуального представления предметных задач поискового

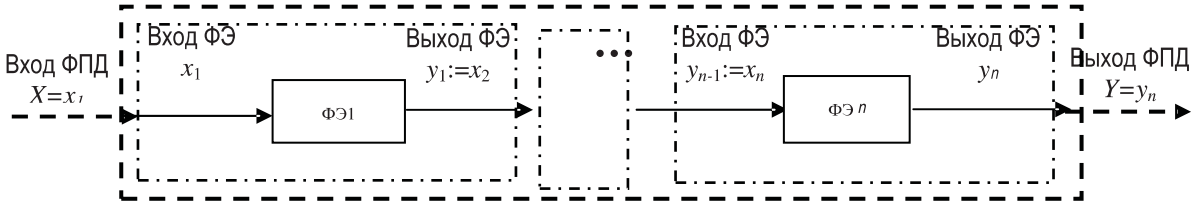


Рис. 3. Параметрическая структурная схема ФПД

конструирования ФПД чувствительных элементов рассмотрим элемент сценария возможных стратегий с использованием базы знаний автоматизированной системы «Интеллект» [7].

Так, система $\Omega_i = \{\mathrm{K}_i; \Lambda_i\}$ на третьем уровне абстрагирования состоит из

• множества категорий K_3, содержащего элементы $\{K_1; K_2; K_3\}$, где K_1 – множество физических эффектов (ФЭ) структурированного типа; K_2 – множество схем, отражающее последовательное преобразование входной величины к выходной, структурированного типа; K_3 – множество паспортов физико-технических эффектов, контекстуально-структурированного типа.

• множества морфизмов Λ_3, содержащего элементы $\{\Theta_3; \Psi_3\}$, где Θ_3 – множество отношений ρ_i монадического типа, позволяющих рассматривать статические отношения ρ1:=«компоновка», ρ2:=«состав», ρ3=«упорядочивание» категорий K_1 (ФЭ), K_2, K_3 и получать ФПД чувствительных элементов в виде параметрической структурной схемы; Ψ_3 – множества отношений на множестве критериев E_3 (приписанных каждому ФЭ и рассчитываемых для ФПД, принадлежащих к контекстуальному/структурному типу) и множестве правил F_3 (позволяющих решать основные задачи начального этапа проектирования, принадлежащих к контекстуальному/структурному типу).

Управляемый процесс $\tilde{\eta}$ – выбор вариантов ФПД с контекстуальными/структурированными исходами ФПД (T_1) и с контекстуальными/структурированными компонентами исходов ФЭ (T_2) при контекстуальном/структурном критерии (T_3) и контекстуальными/структурными компонентами по критериям (T_4) будет охарактеризован кортежем $\tilde{\eta} = \langle T_{1-C/K}; T_{2-C/K}; T_{3-CK/K}; T_{4-CK/K} \rangle$, с универсальным множеством исходов – альтернатив ФПД

$$\mathrm{A} = \{\mathrm{A}_1; \mathrm{A}_2; \ldots; \mathrm{A}_m\},$$

где $\mathrm{A}_i = \{\alpha_1; \alpha_2; \ldots; \alpha_n\} \in T, (i = \overline{1,m} \in I) \wedge$ $\wedge\, \alpha_j \in T_2,\ j = \overline{1,n} \in J$;

универсальным множеством критериев

$$\mathrm{E} = \{\mathrm{E}_1; \mathrm{E}_2; \ldots; \mathrm{E}_k\},$$

где $\mathrm{E}_p = \{e_1; e_2; \ldots; e_l\} \in T_3, (p = \overline{1,k} \in P) \wedge e_s \in$ $\in T_4, s = \overline{1,l} \in S$.

Рассмотрим подмножество $\mathrm{A} = \{\mathrm{A}_1; \mathrm{A}_2; \mathrm{A}_3\}$ множества синтезированных вариантов ФПД чувствительного элемента измерения тепловой величины в терминах автоматизированной системы «Интеллект»: входная величина – механическое линейное (ml) перемещение (Qml); выходная величина – разность температур (Ut) (рис. 4).

Для A_1 – ФПД1 состоит из ФЭ1 – эффект за-

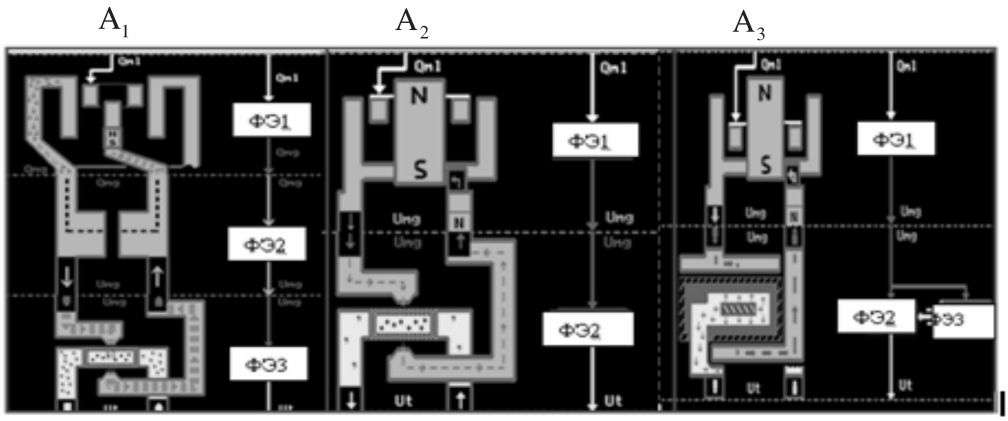


Рис. 4. Альтернативы – варианты ФПД чувствительного элемента

Таблица 1

Значения компонентов критерия вариантов ФПД

Компоненты критерия	Исходы – альтернативы		
	A_1	A_2	A_3
e_1 – диапазон	0,018 К	10 К	3,33е–0,3 К
e_2 – погрешность	5,1 %	5,48 %	5,2 %
e_3 – чувствительность	2 (К)/(М)	150 (К)/(М)	0,037 (К)/(М)
e_4 – надежность	1,16е–0,4 отк/ч	около 2,5е–0,5 отк/ч	1,5е–0,5 отк/ч
e_5 – массогабар. размер	около 0,11 кг	около 0,7 кг	0,51 кг
e_6 – цена	низкая	средняя	высокая

висимости магнитного потока от перемещения, ФЭ2 – параметр магнитная жесткость, ФЭ К3 – эффект Риги–Ледюка.

Для A_2 – ФПД2 состоит из ФЭ1 – эффект регулируемого магнитного напряжения, ФЭ2 – эффект Риги–Ледюка.

Для A_3 – ФПД3 состоит из ФЭ1 – эффект регулируемого магнитного напряжения, ФЭ2 – магнетокалорический эффект в парамагнетиках.

Контекстуальные/структурные значения компонентов $\{e_1;e_2;e_3;e_4;e_5;e_6\} \in T_4$, критерия $E_p \in T_3$ для каждой альтернативы множества А вариантов ФПД представлены в табл. 1, где E_p={e_1– диапазон; e_2– погрешность; e_3– чувствительность; e_4– надежность; e_5– массогабаритные размеры; e_6– цена}.

Тогда, для данного типа задания элемента $\tilde{\eta}$ пары $(\tilde{\eta};\tilde{\xi})$ должен быть определен функционал $\tilde{\xi}$, охарактеризованный правилами выбора ФПД чувствительного элемента в нечеткой среде, тем самым определяется сценарий возможных стратегий ω.

Например, пусть $\mu_{e_s}(A_i)$ – число в диапазоне [0; 1], характеризующее уровень оценки исхода $A_i \in A$ по компоненте e_s критерия E_p: чем больше число $\mu_{e_s}(A_i)$, тем выше оценка исхода $A_i \in A$.

Исходя из данных табл. 1 для оценки исходов – альтернатив ФПД $\{A_1;A_2;A_3\} \in T_1$ универсального множества исходов – альтернатив T_2 по компонентам $\{e_1;e_2;e_3;e_4;e_5;e_6\} \in T_4$ критерия $E_p \in T_3$, были получены результаты, представленные в табл. 2.

Компоненту e_s критерия E_p представим в виде нечеткого множества на универсальном множестве исходов А при $i = \overline{1,m}$:

$$\tilde{e}_s = \{\mu_{e_s}(A_1)/A_1;\mu_{e_s}(A_2)/A_2;\ \ldots;\ \mu_{e_s}(A_m)/A_m\}, \quad (1)$$

где $\mu_{e_s}(A_i)$ – степень принадлежности элемента A_i нечеткому множеству $\tilde{e}_s$.

Сформируем матрицы парных сравнений исходов – альтернатив по каждой компоненте e_s критерия.

Общее количество матриц совпадает с количеством компонентов критерия. Тогда, при $i', i'', s \in N$ имеем:

$$\begin{aligned} &r(A_{i'}) < r(A_{i''}) \leftrightarrow \mu^{A}_{\succ}(A_{i'}:\{e_s\},\ i' \in I, s \in S) > \\ &\quad > \mu^{A}_{\succ}(A_{i''}:\{e_s\},\ i'' \in I, s \in S); \\ &r(A_{i'}) = r(A_{i''}) \leftrightarrow \mu^{A}_{\succ}(A_{i'}:\{e_s\},\ i' \in I, s \in S) = \\ &\quad = \mu^{A}_{\succ}(A_{i'}:\{e_s\},\ i'' \in I, s \in S), \end{aligned} \quad (2)$$

где $r(A_i)$ – ранг исхода – альтернативы A_i; $r(A_i) \in N$.

Матрицы парных сравнений множества А вариантов ФПД чувствительного элемента, с учетом того, что обладают свойствами транзитивности, обратной симметричности и являются диагональными, имеют следующий вид:

$$A(e_1) = \begin{pmatrix} & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & * & 1 & 4 \\ A_2 & 1 & * & 8 \\ A_3 & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & * \end{pmatrix};$$

$$A(e_2) = \begin{pmatrix} & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & * & 1 & 1 \\ A_2 & 1 & * & 3 \\ A_3 & 1 & \frac{1}{3} & * \end{pmatrix};$$

Таблица 2

Результаты сравнения значений ФПД

Компоненты критерия	Результат сравнения значений компонент критерия
e_1 – диапазон	Отсутствие преимущества A_1 над A_2 Существенное преимущество A_2 над A_3 Слабое преимущество A_1 над A_3
e_2 – погрешность	Отсутствие преимущества A_1 над A_2 Слабое преимущество A_2 над A_3 Отсутствие преимущества A_1 над A_3
e_3 – чувствительность	Отсутствие преимущества A_1 над A_2 Явное преимущество A_2 над A_3 Слабое преимущество A_1 над A_3
e_4 – надежность	Слабое преимущество A_1 над A_2 Отсутствие преимущества A_2 над A_3 Слабое преимущество A_1 над A_3
e_5 – массогабарит. размеры	Существенное преимущество A_1 над A_2 Слабое преимущества A_2 над A_3 Явное преимущество A_1 над A_3
e_6 – цена	Явное преимущество A_1 над A_2 Явное преимущество A_2 над A_3 Существенное преимущество A_1 над A_3

$$A(e_3)=\begin{pmatrix} & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & * & 1 & 3 \\ A_2 & 1 & * & 8 \\ A_3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{8} & * \end{pmatrix};$$

$$A(e_4)=\begin{pmatrix} & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & * & 4 & 3 \\ A_2 & \frac{1}{4} & * & 1 \\ A_3 & \frac{1}{3} & 1 & * \end{pmatrix};$$

$$A(e_5)=\begin{pmatrix} & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & * & 8 & 6 \\ A_2 & \frac{1}{8} & * & 4 \\ A_3 & \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & * \end{pmatrix};$$

$$A(e_6)=\begin{pmatrix} & A_1 & A_2 & A_3 \\ A_1 & * & 8 & 6 \\ A_2 & \frac{1}{8} & * & 7 \\ A_3 & \frac{1}{6} & \frac{1}{7} & * \end{pmatrix}.$$

С учетом (1) и формулы вычисления значений функции принадлежности имеем:

$$\tilde{e}_1=\left\{\frac{0,2}{A_1};\frac{0,1}{A_2};\frac{0,33}{A_3}\right\};\quad \tilde{e}_2=\left\{\frac{0,5}{A_1};\frac{0,25}{A_2};\frac{0,24}{A_3}\right\};$$

$$\tilde{e}_3=\left\{\frac{0,25}{A_1};\frac{0,1}{A_2};\frac{0,27}{A_3}\right\};\ \tilde{e}_4=\left\{\frac{0,43}{A_1};\frac{0,2}{A_2};\frac{0,23}{A_3}\right\};$$

$$\tilde{e}_5=\left\{\frac{0,43}{A_1};\frac{0,2}{A_2};\frac{0,4}{A_3}\right\};\ \tilde{e}_6=\left\{\frac{0,43}{A_1};\frac{0,02}{A_2};\frac{0,45}{A_3}\right\}.$$

Нечеткое решение $\tilde{D}$ есть пересечение нечетких множеств $\tilde{e}_s$ компонентов критерия:

$$\tilde{D}=\tilde{e}_1\cap\ldots\cap\tilde{e}_l=\{\min_{s=1,l}\mu_{e_s}(A_1)/A_1;\ \ldots;\ \min_{s=1,l}\mu_{e_s}(A_m)/A_m\}. \quad (3)$$

Тогда, согласно (2) и (3) окончательно получаем

$$\tilde{D}=\left\{\frac{0,2}{A_1};\frac{0,02}{A_2};\frac{0,23}{A_3}\right\}.$$

Результат свидетельствует о существенном преимуществе варианта ФПД A_3 над вариантом ФПД A_2, а также о слабом преимуществе варианта ФПД A_3 над вариантом ФПД A_1.

Предложенное концептуальное представление предметных задач поискового конструирования физического принципа действия чувствительных

элементов системы управления для различных типов задания элемента $\tilde{\eta}$ пары $(\tilde{\eta}; \tilde{\xi})$ управляемого процесса и сформированный функционал $\tilde{\xi}$, позволяет предопределить возможные стратегии $\tilde{\omega}$ для достижения цели поискового конструирования.

В настоящее время в целях создания единого пространства знаний как системы рассматривается множество стратегий для разработки методики поискового конструирования физического принципа действия чувствительных элементов систем управления на начальном этапе проектирования. Реализация такой методики позволит, во-первых, обеспечивать формирование и интеграцию различных семантических и синтаксических интерпретаций базы данных, инвариантных к программным средствам и, во-вторых, применять разработанную методику на ранних этапах проектирования технических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы развития рынка систем автоматизации технологических процессов [Текст] / Датчики и системы. –2005. –№ 3. –С.53–56.

2. **Хоменко, Т.В.** Автоматизированные системы поискового конструирования: системный анализ и развитие системной парадигмы [Текст] / Т.В Хоменко // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. –2010. –№ 1. –С.136–141.

3. **Горбатов, В.А.** Основы дискретной математики: Учеб. пособие [Текст] / В.А. Горбатов. –М.: Высш. шк., 2000. –311 с.

4. **Калянов, Г.Н.** CASE структурный системный анализ (автоматизация и применение) [Текст] / Г.Н. Калянов. –М.: Лори, 2001. –328 с.

5. **Волкова, Г.Д.** Применение методологии автоматизации интеллектуального труда к созданию автоматизированных систем проектирования: Сб. науч. тр. [Текст] / Г.Д. Волкова, Е.Г. Семячкова // Техника. Экономика. Автоматизация. Проектирования. –М., 1995. –С. 48–55.

6. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.algebraic.ru/doku.php?id=theory:category

7. **Зарипов, М.Ф.** Предметно-ориентированная среда для поиска новых технических решений «Интеллект» [Текст] / М.Ф. Зарипов, И.Ю. Петрова / IV Междунар. конф. РИ-95. –СПб., 1995. –С.60–61.

УДК 004.414.23, 004.252

О.В. Мамутова, А.С. Филиппов

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Развитие технологий производства электронных устройств сопровождается уменьшением размеров элементов памяти и понижением требуемого напряжения питания. Это ведет к повышению чувствительности элементов памяти к таким возмущающим внешним воздействиям, как нарушения в системе питания, электромагнитные помехи, сильные электрические поля и избыток тепла. При этом особое внимание уделяют вопросам нарушения работы элементов памяти вследствие одиночных событий (single event effect – SEE) попадания в кристалл тяжелых ионизированных частиц высокой энергии (ТЗЧ). Результатом таких воздействий на элементы памяти является высокая интенсивность сбоев ячеек памяти (SEU – single event upset), которые приводят к изменению хранимой информации [1, 2]. Интенсивность появления таких сбоев в полупроводниковых устройствах в оборудовании на околоземных орбитах на несколько порядков превышает интенсивность появления отказов. Поэтому для аппаратуры, подверженной космическому излучению или работающей в непосредственной близости от источников излучения, применяются методы повышения надежности за счет структурной и информационной избыточности.

В современных вычислительных системах для увеличения производительности используют иерархическое построение оперативной памяти [3]. При этом сбои элементов памяти на разных уровнях иерархии по-разному влияют на надежность всей системы. В статье описано решение научной задачи эффективной организации иерархической памяти вычислительной системы для достижения требуемой надежности и производительности в условиях возможности возникновения случайных сбоев. В данной работе в качестве исследуемой системы выбрана типовая структура высоконадежной вычислительной системы, имеющей доменную организацию с иерархической системой памяти. Примером такой системы является система, разработанная на кафедре КСиПТ СПбГПУ [4].

Система включает в себя домен внешней памяти и вычислительный домен, причем каждый процессор вычислительного домена имеет свою локальную кэш-память. Структура системы представлена на рис. 1. В рамках каждого домена мо-

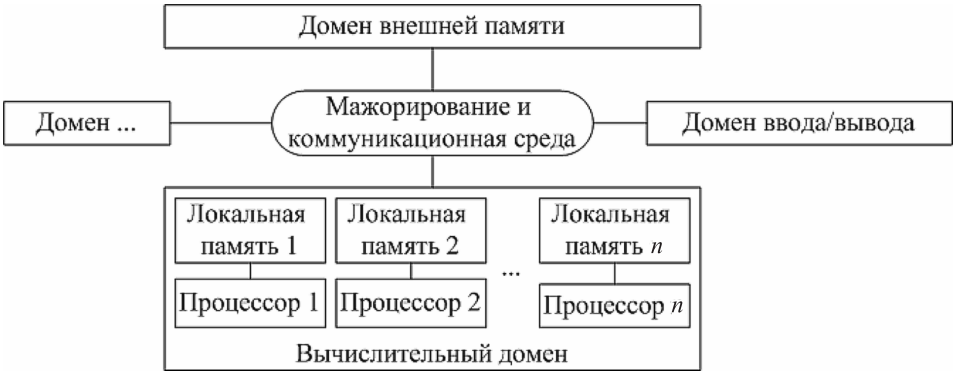


Рис. 1. Структура целевой высоконадежной вычислительной системы

жет использоваться структурное резервирование. В условиях наличия вероятности сбоев в кэш-памяти отказом системы будем называть состояние, когда более половины процессорных узлов вычислительного домена совершают ошибочное выполнение исполняемого программного кода.

Следует отметить, что применение в системе такого структурного резервирования с мажорированием эффективно по сравнению с вариантом без резервирования только на коротких интервалах времени, когда вероятность безотказной работы одного процессорного узла больше 0,5. Поэтому рассмотрение выбранной структуры актуально в контексте исполнения задач, сопровождаемых сбросом состояния системы после выполнения каждой задачи, что можно рассматривать как процесс автоматического самовосстановления.

Цель данной работы – разработка модели системы и проведение анализа влияния параметров кэш-памяти на общую производительность и надежность системы для поиска эффективной конфигурации иерархической памяти по критерию надежность-производительность.

Методики исследования

Для рассматриваемого класса систем невозможны исследования на прототипе. Поэтому параметры производительности и надежности обычно оценивают с помощью нефизической модели. Необходимо выбрать способ моделирования, чтобы оценить производительность и надежность вычислительной системы при изменяющихся параметрах элементов системы памяти для заданной исполняемой программы. Для оценки параметров производительности и надежности иерархической системы памяти вычислительной системы можно использовать потактовые микропроцессорные симуляторы [5, 6]. Такой подход позволяет определить, как на работу системы памяти влияют различные способы защиты от сбоев, выбор архитектуры кэш-памяти и исполняемая программа. Недостаток подхода – отсутствие универсальности: для каждой микропроцессорной системы требуется создание оригинального симулятора, что представляет дорогую и сложную задачу.

Альтернативой является применение средств моделирования, позволяющих проводить анализ с использованием моделей вознаграждений [7]. Для разработки модели выбрана современная программная среда моделирования Möbius (создана в рамках группы Performability Engineering Research Group (PERFORM), Center for Reliable and High-Performance Computing, Иллинойский университет в Урабана-Шампейн, США), предназначенная для моделирования сложных систем с целью совокупной оценки надежности и производительности систем. Преимущество этого средства – поддержка множества формализмов моделирования, а также возможность создания иерархических моделей любой сложности [8].

Разработка модели системы

Разработанная модель удовлетворяет основным предъявляемым требованиям, соответствующим поставленной задаче. Во-первых, модель выполняет свою главную задачу – предоставляет возможность получения данных о показателях надежности и производительности. Во-вторых, модель предоставляет возможность варьирования значений параметров системы памяти, таких, как объем, время ответа, интенсивность различных обращений и интенсивность появления сбоев. В-третьих, модель легко масштабируема в рамках выбранного класса систем: увеличение числа процессорных узлов в рамках построенной модели легко осуществимо без изменения структуры всей модели целиком. Также модель универсальна: может быть использована для оценки параметров систем с различной организацией отдельных ее частей в рамках заданной структуры. Кроме того, результаты, получаемые при моделировании, представлены в виде, пригодном для сравнения с результатами, получаемыми на любой другой модели. Так можно подтвердить адекватность построенной модели.

В качестве основной характеристики надежности системы памяти в условиях возможности появления одиночных сбоев (SEU) принята λ – интенсивность появления сбоев в максимальном объеме кэш-памяти. При этом размер кэш-памяти определяется как относительная величина cache_size, принимающая значения от нуля до единицы и показывающая активно используемую долю от максимально возможного размера кэш-памяти: 0 – кэш-память не используется, 1 – используется весь возможный объем кэш-памяти. То есть, учитывая равномерное распределение вероятности возникновения сбоя по всей площади кэш-памяти, $\lambda = \lambda \cdot cache_size$ – интенсивность возникновения сбоев в активной области кэш-памяти.

Для характеристики исполняемой программы и быстродействия кэш-памяти выбраны следующие усредненные параметры:

p_{write} – вероятность обращения к памяти по записи;

p_{miss} – вероятность промаха при обращении в кэш-память;

t_{hit} – среднее время обращения к памяти при попадании в кэш, с;

t_{miss} – среднее время обращения к памяти при кэш-промахе, с.

Для масштабирования системы используется параметр nmr_val, определяющий степень резервирования высоконадежной системы. Например, если nmr_val равен единице, в системе не используется структурное резервирование и вычислительный домен содержит только один процессорный узел. Если nmr_val равен трем, значит использовано троирование, т. е. система считается полностью работоспособной пока функционируют два процессорных узла из трех. Для задания времени работы системы используется параметр mission_time.

В качестве показателя надежности предложено использовать среднее время безотказной работы системы при наличии сбоев кэш-памяти T (средняя наработка до отказа). В качестве показателя производительности – число обращений к памяти, выполняемых за единицу времени. Тогда совокупным показателем надежность-производительность считаем N – число операций, выполненных заданной программой до перехода в состояние отказа при наличии сбоев в кэш-памяти. Поскольку для оценки надежности системы, использующей структурное резервирование, нецелесообразно использовать величину средней наработки до отказа, предлагается еще один показатель надежности – вероятность безотказной работы за заданное время mission_time. При этом для характеристики производительности используется число операций, выполненных заданной программой за время mission_time.

Следует указать следующие общие соображения о возможном влиянии размера кэш-памяти на надежность и производительность системы.

Если уменьшить размер кэш-памяти, уменьшается вероятность попадания частицы в активную область кэш. При этом частицы, попадающие в неактивную область кэш-памяти, не могут привести к отказу системы. Таким образом, с уменьшением размера кэш-памяти надежность системы увеличивается.

С другой стороны, с уменьшением размера кэш-памяти увеличивается время выполнения программы. При этом вероятность возникновения сбоя в течение большего промежутка времени больше.

Кроме того, если в системе реализована временная избыточность, изменение размера кэш-памяти меняет время исполнения программы до отказа системы. При этом меняется число возможных повторных исполнений.

Поскольку в целевой системе не реализованы алгоритмы временной избыточности, разработанная модель в полной мере отражает первый аспект влияния размера кэш-памяти и второй аспект в случае использования показателя надежность-производительность числа операций, выполненных заданной программой до перехода в состояние отказа.

Также следует отметить важную особенность кэш-памяти, состоящую в возможности маскирования возникающих сбоев при перезаписи сбойного значения в ходе выполнения программы, при смене контекста задач или при отсутствии операций чтения сбойной ячейки. Эта особенность кэш-памяти учитывается в модели возможностью подключения модели исполняемой программы, точность которой определяет точность моделирования указанных процессов маскирования.

Разработка в среде Möbius заключается в построении следующей иерархии моделей:

- ATOMIC – на этом уровне создается описание простых базовых моделей с помощью выбранных формализмов;
- COMPOSED – на этом уровне возможно построение более сложной модели из простейших или других сложных подмоделей с помощью операций объединения и дублирования;
- REWARD – эта модель определяет измеряемые параметры в созданной модели;
- STUDY, TRANSFORMER, SOLVER – необходимы для моделирования и получения результатов.

Иерархическая структура построенной модели представлена на рис. 2.

Путем декомпозиции системы выделены следующие базовые подмодели:

модель сбоев кэш-памяти – учитывает зависимость появления ошибок при обращении в кэш-память от ее размера;

модель исполняемой программы – моделирует поток обращений процессора к памяти с уче-

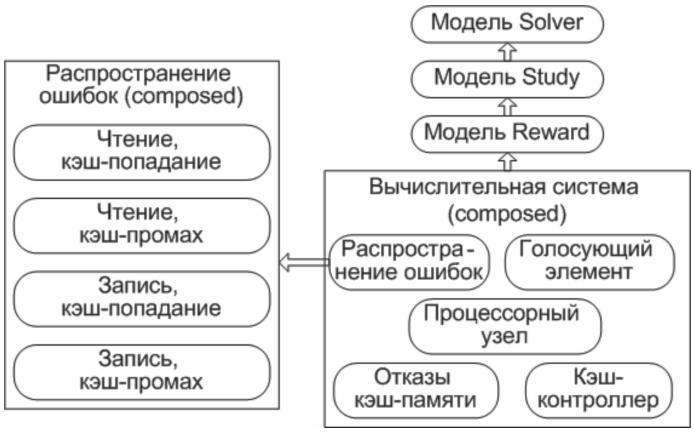


Рис. 2. Структура ядра разработанной модели вычислительной системы в Möbius

том заданных усредненных параметров производительности размера кэш-памяти;

модели распространения ошибок в иерархической системе памяти при различных типах обращений (*запись*/*чтение*, *попадание в кэш*/*кэш-промах*);

модель работы голосующего элемента, определяющего момент возникновения отказа всей системы.

Базовые модели реализованы с помощью формализма SAN (Stochastic activity networks) – расширения сетей Петри, используемого в среде Möbius. Из базовых подмоделей построены следующие сложные модели:

модель работы узла процессорного домена – включает в себя модель исполняемой программы, модель сбоев кэш-памяти и модели распространения отказов;

модель высоконадежной системы – верхняя модель в предлагаемой иерархии, включает в себя подмодели процессорных узлов домена и модель голосующего элемента.

Предложенная декомпозиция позволяет, во-первых, изменять отдельные элементы модели, не изменяя всю модель целиком, и, во-вторых, осуществлять расширение модели путем добавления в структуру новых базовых моделей.

Ниже представлены описания базовых подмоделей.

CACHE_CONTROLLER – модель исполняемой программы, которая определяет тип текущего обращения процессора к памяти. В системе, использующей кэш-память, возможно четыре ситуации при обращении процессора к определенной ячейке памяти: попадание при чтении, промах при чтении, попадание при записи и промах при записи. Тип очередного обращения определяется фиксированной вероятностью так, что сумма четырех вероятностей равна единице. В соответствии с типом текущего обращения к памяти формируется временная задержка, затем осуществляется переход метки в соответствующую подмодель распространения ошибок.

CACHE_MEMORY представляет собой модель отказа кэш-памяти с заданной интенсивностью экспоненциального распределения появления сбоев и определенной функцией зависимости от интенсивности тех или иных обращений к памяти, а также от активно используемой области кэш.

READ_HIT – модель распространения ошибки в случае обращения к памяти типа «Попадание при чтении». В этой ситуации наличие сбоя во внешней памяти не влияет на логику распространения ошибок. И рассматривая худший случай, считаем, что наличие сбоя в кэш приводит к сбою выполняемой программы узла.

READ_MISS – модель распространения ошибки в случае обращения к памяти типа «Промах при чтении». Если нет сбоев ни в кэш-памяти, ни во внешней памяти, программа успешно продолжает свое выполнение. Если есть сбой в кэш-памяти, но нет сбоя во внешней памяти, то при смене блоков ошибка из кэш-памяти попадает во внешнюю память, но программа успешно продолжает свое выполнение, прочитав из внешней памяти значение без ошибки. Если есть сбой во внешней памяти, рассматривая худший случай, считаем, что из внешней памяти прочитано сбойное значение и происходит сбой выполняемой программы.

WRITE_HIT – модель распространения ошибки в случае обращения к памяти типа «Попадание при записи». Если используется процедура записи writethrough, при любой записи тут же происходит запись во внешнюю память. Если же используется процедура writeback, записанное значение попадает во внешнюю память с задержкой. Рассматривая худший вариант, считаем, что обратная запись во внешнюю память происходит сразу, перенося ошибочное значение из кэш-памяти во внешнюю память, и наоборот.

WRITE_MISS – модель распространения ошибки в случае обращения к памяти типа «Промах при записи». В этой ситуации всегда происходит смена блоков внешней памяти и кэш. Тогда если ошибка только в кэш-памяти, считаем, что в худшем случае она тут же попадает во внешнюю память с обратной записью, оставаясь при этом в кэш-памяти. Если сбой во внешней памяти, он попадает в кэш-память при смене блоков.

SIMPLE_VOTER – модель голосующего элемента, маскирующего отказы отдельных узлов. Модель содержит четыре места, наличие меток в которых отображает состояние всей системы: OK – система функционирует, ошибок не замечено; soft_diagnostic – замаскировано ошибочное обращение к памяти (отказ системы определяется метками в diagnostic и fault); diagnostic – некоторое число резервированных процессорных узлов отказало, но система продолжает успешно функционировать; fault – система находится в состоянии отказа, т. к. более половины процессорных узлов отказало.

Следует отметить, что разработанная модель системы характеризуется следующими ограничениями, которые необходимо учитывать при анализе результатов данного моделирования и при последующем использовании модели.

1. Вероятность возникновения одного из типов обращения задается фиксированной вероятностью на всем протяжении выполнения программы. В действительности интенсивность тех или иных обращений различается для каждой исполняемой программы и не имеет определенной функции распределения. Для проведения моделирования следует подключать модель анализа потока обращений в память разного типа, отслеживая исполняемый код программы либо в процессе моделирования, либо проведя предварительную процедуру адресной трассировки (address trace). Кроме того, в действительности если в одном из слов кэш-памяти произошел сбой и значение слова изменилось, то такая ошибка может привести к неверному исполнению кода программы только в случае обращения к этой ячейке. В построенной модели, не включающей в себя модель для анализа потока исполняемых команд, распределение обращений к ячейкам активной области кэш считаем равномерным. Считаем также, что ошибочное значение не может быть перезаписано в ходе выполнения программы, хотя в действительности возможно восстановление сбоев в результате записи или в результате смены исполняемой задачи.

2. В реальной системе задержка при кэш-промахе не фиксирована, а определяется текущими условиями исполнения программы. Однако можно использовать усредненное значение, как это делают при численной приближенной оценке производительности системы.

3. Вероятность появления кэш-промахов определяется как линейная зависимость от размера кэш-памяти. Для большинства систем существует пороговое значение размера кэш-памяти, после которого увеличение объема не оказывает существенного влияния на интенсивность кэш-промахов.

Результаты моделирования

В таблице приведены заданные при моделировании значения параметров модели. Оценка вероятности безотказной работы проведена для mission_time = 1 с размером выборки 10^4. Значение относительного размера кэш-памяти cache_size для проведенных экспериментов менялось от нуля до единицы с шагом 0,1.

На рис. 3 представлены графики, отражающие зависимости средней наработки до отказа T, совокупного показателя надежность-производительность N и вероятности безотказной работы P от относительного размера кэш-памяти (cache_size), полученные в результате моделирования. При рассмотрении результатов следует учитывать, что возможность имитационной оценки параметров T и N при cache_size = 0 ограничена, поэтому соответствующие результаты не учитывались при формировании зависимостей на рисунке.

Оценки T и N, полученные при моделировании, имеют доверительный интервал 5 % с вероятностью 95 %. Увеличение статистической точности оценки возможно, однако при этом

Значение параметров модели

Параметр	Значение
Интенсивность появления сбоев, λ (c^{-1})	2
Вероятность промаха при обращении в кэш (при максимальном размере кэш), pmiss (%)	1
Вероятность обращения к памяти по записи, pwrite (%)	10
Время обращения к памяти при попадании в кэш, thit (c)	10^{-5}
Время обращения к памяти при кэш-промахе, tmiss (c)	10^{-3}
Число процессорных узлов, nmr_val	3

увеличивается время моделирования. Точность оценки *P* определяется выбранным размером выборки и составляет четыре знака после запятой, при этом время моделирования имеет степенную зависимость от выбираемой точности оценки.

Полученные результаты показывают, что с учетом принятых усредненных характеристик исполняемой программы совокупный показатель надежность-производительность принимает наименьшее значение при относительном размере кэш-памяти в диапазоне от 0,2 до 0,9. При этом вероятность безотказной работы более 0,9 за 1 с достигается при относительном размере кэш-памяти не более 0,1.

Построенное ядро модели вычислительной системы позволяет оценить корректность получаемых результатов путем сравнения с расчетными значениями. Для проведения аналитических расчетов использованы следующие выражения:

$$P = 3 \cdot e^{-2 \cdot \text{cache_size} \cdot \lambda \cdot \text{mission_time}} - 2 \cdot e^{-3 \cdot \text{cache_size} \cdot \lambda \cdot \text{mission_time}};$$

$$T = \frac{3}{2 \cdot \text{cache_size} \cdot \lambda} - \frac{2}{3 \cdot \text{cache_size} \cdot \lambda};$$

$$T = N(1 - p_{\text{miss}})t_{\text{hit}} + N \cdot p_{\text{miss}} \cdot t_{\text{miss}}.$$

Сравнение результатов моделирования с аналитическими расчетами показало, что средняя погрешность оценки *N* составляет около 7 %, а среднее абсолютное отклонение оценки *P* составляет 0,004205. Анализ результатов моделирования при nmr_val равном 1 и 5 показал, что погрешности получаемых оценок незначительно отличаются от указанных выше.

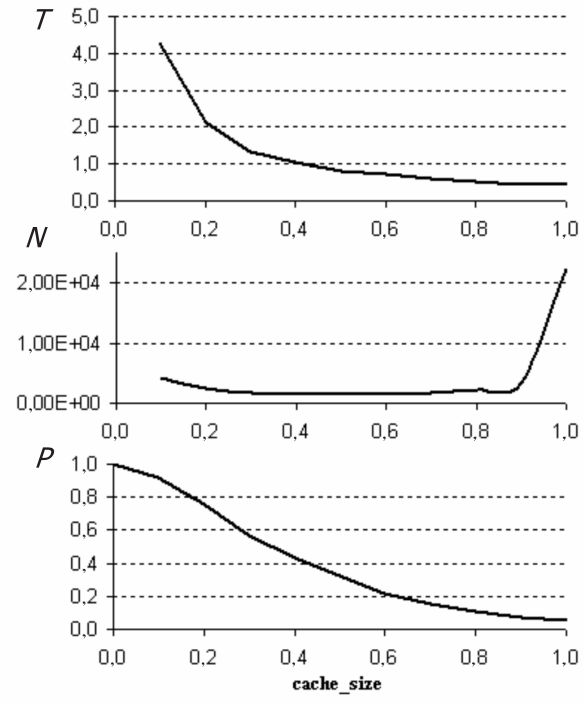


Рис. 3. Примеры результатов моделирования

Разработана модель вычислительной системы с доменной организацией и иерархической системой памяти. Построенная модель удовлетворяет всем предъявляемым требованиям: она позволяет получить совокупную оценку надежность-производительность; результаты соответствуют оценкам, найденным логико-вероятностным методом. Кроме того, разработанная модель обладает следующими преимуществами: она легко масштабируема, является открытой и универсальной.

Модель апробирована на системах с различным числом процессорных узлов (1, 3 и 5). Сравнение с результатами, полученными аналитически, показало корректность построенной модели.

Предложено совершенствовать модель путем добавления подмоделей системного окружения, например, модель исполняемой программы, модель отказов внешней памяти, модель отказов вычислителя процессорного узла или модель появления ошибок коммуникационной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Edmons, L.D.** An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics [Текст] / L.D. Edmons, C.E. Barnes, L.Z. Scheick. – Jet propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2000. –83 p.

2. **Чумаков, А.И.** Действие космической радиации на ИС [Текст] / А.И. Чумаков. –М.: Радио и связь, 2004. –320 с.

3. **Hennessy, Lohn L.** Computer architecture: a quantitative approach [Текст] / Lohn L. Hennessy, David A. Patterson. –Morgan Kaufmann Publishers, 2007. –676 с.

4. **Глухих, М.И.** Формализация представления отказоустойчивых систем при проектировании структуры системы [Текст] / М.И. Глухих // Информационно-управляющие системы. –2005. –№ 3. –С. 27–35.

5. **Cai Yuan.** Cache Size Selection for Performance, Energy and Reliability of Time-Constrained Systems [Текст] / Yuan Cai, Marcus T. Schmitz, Alireza Ejlali [et al.] // Proc. of the 2006 Asia and South Pacific Design Automation Conf., Jan. 2006.

6. **Asadi, G.-H.** Balancing Performance and Reliability in the Memory Hierarchy [Текст] / G.-H. Asadi, V. S. Mehdi, B. Tahoori [et al.] // Proc. of the IEEE International Symp. on Performance Analysis of Systems and Software, 2005. –ISPASS 2005, IEEE Computer Society, March 2005.

7. **Haverkort, Boudewijn R.** Performability modelling tools and techniques [Текст] / Boudewijn R. Haverkort, Ignas G. Niemegeers. // Performance Evaluation. –Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam, The Netherlands. –March 1996. –Vol. 25. –Iss. 1.

8. **Deavours, D.D.** The Möbius framework and its implementation [Текст] / D.D. Deavours, G. Clark, T. Courtney [et al.] // IEEE Transactions on Software Engineering. –Oct. 2002. –№ 28(10). –P 956–969.

УДК 004.416.6

В.М. Ицыксон, А.В. Зозуля

ФОРМАЛИЗМ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЧАСТИЧНЫХ СПЕЦИФИКАЦИЙ КОМПОНЕНТОВ ПРОГРАММНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Разработка программного обеспечения в настоящее время является одной из самых быстро развивающихся отраслей. Успешность компании-разработчика зависит от множества факторов, таких, как

качество выпускаемого программного обеспечения;

обеспечиваемый уровень поддержки;

своевременный выход новых версий продукта;

поддержка большого числа программных и аппаратных платформ;

оперативность в переносе программного обеспечения на новые мобильные устройства

и т. п.

Перечисленные выше свойства не могут обеспечиваться только талантливой командой разработчиков, требуется также наличие определенных технологий, позволяющих автоматизировать существенную часть процесса разработки и сопровождения программного обеспечения. Такие технологии базируются на использовании формальных моделей и методов, обеспечивающих автоматизированный или автоматический анализ, синтез, трансформацию и оценку программных систем.

Одна из задач, часто встающая перед разработчиками, – перенос отлаженного корректно функционирующего программного кода в новые условия:

на новую операционную систему;

в новую версию ранее использовавшейся библиотеки;

в новую библиотеку;

на новую аппаратную платформу

и т. п.

Особенность указанной ситуации заключается в том, что имеющаяся программная система прошла стадии разработки, тестирования, отладки, внедрения и обладает определенным уровнем качества. Переработка системы с заменой библиотечных вызовов, подключением новых компонентов приводит к появлению *новой* программной системы, для которой придется частично или полностью повторить стадии разработки,

тестирования, отладки и внедрения, чтобы достичь того же уровня качества. Такое повторение этапов для системы, *уже* обладающей определенным уровнем качества, обеспечение которого стоило определенных материальных затрат, часто является неоправданным. Особенно расточительным это выглядит, если обратить внимание на то, что в программной системе не появилось новой функциональности, просто она стала функционировать в новом окружении.

Один из подходов, позволяющих сократить расходы на реинжиниринг, – автоматизация портирования приложений из одного окружения в другое с помощью формальных спецификаций окружений [6]. Основой технологии автоматизации портирования являются спецификации компонентов программного окружения, позволяющие на требуемом уровне детализации задавать семантические свойства исходного и целевого окружений. Важная особенность спецификаций окружений – необходимость задания лишь некоторых свойств окружений, непосредственно отвечающих за взаимодействие программы с библиотекой и абстрагирующихся от тонкостей реализации самой библиотеки. Такие спецификации будем называть *частичными*.

Данная статья посвящена разработке формализма частичных семантических спецификаций компонентов программного окружения для языка программирования Си, обеспечивающего задание необходимых для портирования свойств.

Требования к частичным спецификациям

Решение задачи автоматизированного переноса приложений из одного окружения в другое невозможно без наличия спецификаций исходного и целевого программных окружений. При этом уровень детализации описания должен быть, с одной стороны, достаточным для спецификации всех аспектов компонентов, необходимых для реинжиниринга, а, с другой стороны, достаточно высоким, чтобы абстрагироваться от ненужных при реинжиниринге подробностей.

Определим требования, предъявляемые к частичным спецификациям окружений. Для этого обратимся к рисунку, на котором схематично изображено взаимодействие программы с гипотетическим окружением – библиотекой ввода-вывода. Основные точки взаимодействия программы и библиотеки изображены дугами, а основные участники взаимодействия – геометрическими фигурами. Исходя из семантики языка Си, частичные спецификации окружений должны обеспечивать задание следующих характеристик.

Описание заголовочных файлов библиотеки. Требуется для корректной модификации программы при переходе с одной библиотеки на другую.

Описание сигнатур функций библиотеки. Каждая сигнатура должна содержать название функции, описание принимаемых параметров, их типов и возвращаемого результата.

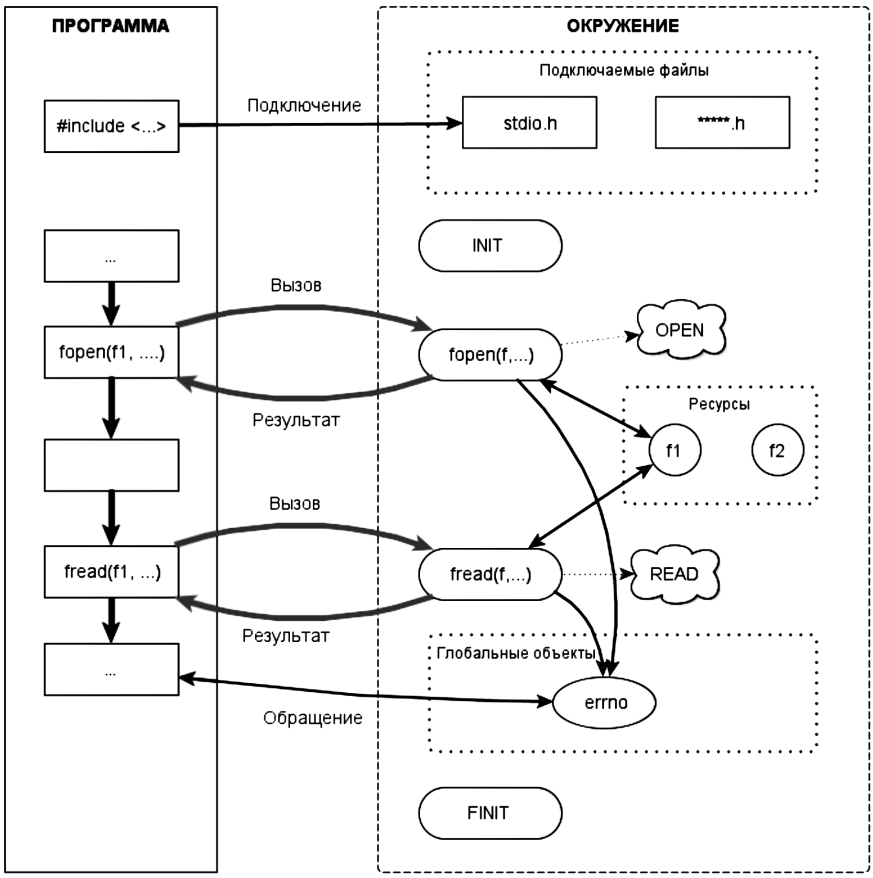
Описание ресурсов окружения (операционной системы). Ресурсы – объекты операционной системы, имеющие свой жизненный цикл [6, 8]. Манипуляция с ресурсами – один из побочных эффектов функционирования библиотеки, чрезвычайно важный для корректного проведения преобразования программы. На рисунке ресурсом, например, является файловый дескриптор f1.

Описание глобальных объектов. Еще одним способом взаимодействия программы и библиотеки является использование глобальных переменных. На примере, изображенном на рисунке, глобальная переменная *errno* используется для передачи кода ошибки между библиотекой и основной программой.

Задание семантической интерпретации значений объектов используемых типов. Семантика взаимодействия между программой и библиотекой (вызов функций с параметрами, получение результата, обращение к глобальной переменной) может определяться конкретными значениями переменных, параметров, возвращаемых значений, причем в разных библиотеках конкретные значения (или диапазоны значений) могут существенно отличаться. Требуется механизм, задающий интерпретацию значений типов, используемых при взаимодействии.

Описание абстрактных действий, выполняемых программой. Кроме манипулирования ресурсами, еще одним побочным эффектом вызова библиотечных функций является выполнение действий, реализующих функциональность библиотеки. Требуется механизм идентификации и параметризации таких действий для возможности сопоставления с действиями, выполняемыми другими библиотеками. Примеры действий (OPEN и READ) приведены на рисунке.

Описание поведения библиотечных функций. Для задания укрупненного алгоритма работы функций, реализующих функциональность библиотеки, требуется механизм спецификации



Взаимодействие программы с окружением

поведения, позволяющий манипулировать параметрами функций возвращаемым значением, их типами, глобальными объектами, ресурсами и действиями.

Описание инициализации и финализации окружения. Некоторые библиотеки имеют специальные функции для инициализации (загрузки) и финализации (выгрузки) библиотеки. Требование соответствующего механизма в частичных спецификациях обусловлено необходимостью корректной инициализации ресурсов, глобальных объектов, а также своевременным их освобождением.

Исходя из сформулированных требований, необходимо выбрать готовый формализм или разработать новый, наиболее пригодный для задания всех необходимых характеристик частичных спецификаций.

Существует несколько подходов к спецификации компонентов программного обеспечения:

• формальное описание сигнатур функций и модулей при помощи системы типов и эффектов [1];

• аппарат логических пред- и постусловий, Z-нотации [8];

• алгебры и исчисления процессов, язык LOTOS [7];

• конечные автоматы – языки SDL, ESTELLE [2, 10];

• темпоральные логики CTL, LTL [4];

• визуальные языки моделирования, например, язык UML [11];

• денотационная семантика [5].

Каждый из перечисленных подходов позволяет описать один или несколько аспектов выдвинутых требований, но не может покрыть все требования. Это, в первую очередь, связано с разнородностью объектов, предназначенных для спецификации. Например, темпоральные логики предназначены, в т. ч. для описания правил последовательности наступления событий в системе, но непригодны для спецификации поведения функций. Конечные автоматы могут применяться для описания жизненного цикла ресурсов, но неприменимы при задании семантики параметров функций.

В данной статье предлагается собственный формализм для задания частичных спецификаций программных окружений, базирующийся на некоторых перечисленных выше формализмах и позволяющий (в отличие от каждого из них в отдельности) задавать все требуемые свойства библиотеки. Для простоты и наглядности описаний примеры спецификаций будут приводиться на аннотирующем языке PanLang, специально предназначенном для описания семантики функций библиотек языка Си [6, 9].

Частичные спецификации программных окружений

Частичной спецификацией программного окружения будем называть следующую совокупность S:

$$S = (T, C, G, R, R_U, F, A, H, f_i, f_f),$$

где C – конечное множество именованных констант; T – конечное множество семантических типов; G – конечное множество глобальных объектов; R – конечное множество типов ресурсов; R_U – конечное множество утилитарных ресурсов ($R_U \subset R$); F – конечное множество функций; A – конечное множество действий; H – конечное множество заголовочных файлов; f_i – функция инициализации программного окружения; f_f – функция финализации программного окружения.

Детализируем определение каждого элемента спецификации.

Константы. Являются неотъемлемой частью любого программного окружения. При переносе кода между окружениями необходимо осуществить замену констант на семантически аналогичные. Очевидно, что константы связаны с типами тех переменных, значения которых они описывают. В общем случае константы могут быть представлены в виде интервальных значений. Константы могут использоваться как для задания значения переменных, так и для задания значений атрибутов ресурсов:

$$C = \{(n_i, v_i)\},$$

где n_i – имя константы; v_i – значение константы.

В листинге 1 приведен пример, демонстрирующий задание констант, используемых в дальнейшем для передачи параметров в функции окружения:

```
const O_RDONLY = 0;
const O_WRONLY = 1;
const O_RDWR = 2;
```

Листинг 1: Пример задания констант

Семантические типы. В различных окружениях переменные разных типов могут иметь одну и ту же семантику. При формировании спецификаций окружений такие переменные должны быть специфицированы одинаковым образом. Перенос кода между окружениями будет сопровождаться заменой специфицированных типов переменных. Обращение к переменным специфицированных типов может быть опосредовано либо функциями, либо с использованием константы. В этом случае и функции, и константы также должны быть описаны в спецификациях:

$$T = \{t_i\};\ t_i = (n, t_b, C_T, R),$$

где t_i – новый семантический тип; n – имя типа; t_b – базовый (расширяемый) тип, где $t_b \in T \cup T_c$, где T_c – множество типов языка Си; C_T – множество символических констант, связанных с типом; R – сюръективное отображение R: $t_b \rightarrow C_T$.

Имя типа привносит семантику в описание переменной, ресурса или параметра функции. Для одного базового типа языка Си может быть объявлено несколько семантических типов в рамках одной спецификации. Важно также отметить, что одна и та же переменная может иметь несколько семантических значений. Например, в зависимости от успешности выполнения функции, в качестве результата возвращается либо идентификатор ресурса, либо код ошибки. В этом случае возвращаемое значение имеет два семантических значения: ресурс и код ошибки. В другом окружении аналогичная функция может возвращать ресурс и код ошибки через два разных аргумента. Поэтому в качестве базового типа может выступать уже ранее определенный в спецификации тип.

Множество именованных констант C_T и отображение R позволяют именовать отдельные значения или группы значений базового типа. На основании сопоставлений этих имен можно сопоставлять состояние различных переменных из разных окружений.

Рассмотрим примеры задания семантики типов переменных, хранящих дескрипторы сокетов, в операционных системах Linux и Windows (листинг 2 и 3).

Данное описание вносит семантику для типов языка Си, означающую, что переменная типа `int` для Linux и переменная типа `SOCKET` для Windows, значение которой хранит возвращаемое значение функций `socket`, являются дескриптором сокета. При переносе приложения, содер-

```
type SOCKET_TYPE (int) {
}
function SOCKET socket(...) {
...
}
```

Листинг 2: Описание типа сокета и функции, создающей сокет, в ОС Linux

```
type SOCKET_TYPE (SOCKET) {
}
function SOCKET socket(...) {
...
}
```

Листинг 3: Описание типа сокета и функции, создающей сокет, в ОС Windows

```
type FILE_FLAGS (char*) {
   READ = "r";
   WRITE = "w";
   ALL = "rw";
}
```

Листинг 4: Описание семантики параметра `mode` функции `fopen`

```
type FILE_FLAGS (int) {
   READ = O_RDONLY;
   WRITE = O_WRONLY;
   ALL = O_RDWR;
}
```

Листинг 5: Описание семантики параметра `flags` функции `open`

жащего функции работы с сокетами между ОС, на основе подобных спецификаций возможно автоматическое преобразование соответствующих типов.

Следующие примеры демонстрируют описания семантики параметров функций открытия файлов из разных программных библиотек (листинг 4 и 5).

Данное описание вносит семантику для типов языка Си, означающую, что значение функции, переданной вторым параметром, является флагом режима работы с файлом. Кроме того, такое описание задает интерпретацию возможных значений переменных данного типа. Типы языка Си `char*`, `int` и значения `"r"`, `"w"`, `"rw"`, `O_RDONLY`, `O_WRONLY`, `O_RDWR` являются зависимыми от окружения, в то же время семантика в виде имени типа и именованных констант возможных значений не зависит от конкретного окружения. На основе указанных спецификаций возможно автоматическое преобразование соответствующих типов и констант при смене библиотеки работы с файлами.

Глобальные объекты. Глобальные объекты – это специальные объекты окружения, изменение состояния которых может быть одним из побочных эффектов окружения. Глобальные объекты являются моделью глобальных переменных программ или глобальных ресурсов:

$$G = \{(n_i, t_i)\},$$

где n_i – имя объекта; t_i – тип, $t_i \in T \cup T_c \cup R$.

Глобальные объекты объявляются и инициализируются в f_i, могут освобождаться в f_f и доступны из всех функций окружения.

Ресурсы. Будем понимать под ресурсами объекты операционной системы (среды, платформы), имеющие свой жизненный цикл, существующие в операционной системе и управляющиеся посредством специальных системных (библиотечных) вызовов. К ресурсам относятся, например, файлы, потоки, дескрипторы, объекты в динамической памяти, семафоры, мьютексы, сокеты и т. п.

Работа с ресурсами – неотъемлемая часть практически любого приложения. Именно ресурсы обычно являются существенной частью программных окружений и платформ, между которыми требуется осуществить перенос. Любой ресурс обладает некоторым жизненным циклом: создание ресурса, изменение его состояния, оперирование ресурсом, освобождение. Жизненным циклом ресурса управляют соответствующие функции. Обычно для ресурсов характерно наличие атрибутов. Атрибут ресурса – изменяемое свойство ресурса, влияющее на логику выполнения операций над ним. Значениями атрибутов ресурса также управляют соответствующие функции. В качестве формализма для представления семантики, связанной с ресурсами, будет использоваться формализм расширенного детерминированного конечного автомата (Extended finite state machine, EFSM) [3].

Рассмотрим подробнее этот формализм. В расширенном автомате помимо состояний и переходов имеется конечное множество внутренних переменных, способных принимать различные значения. Полное состояние расширенного автомата включает текущее состояние управления и текущие значения всех переменных. Входные и выходные символы могут иметь параметры. Помимо символов, каждый переход помечен также охранным условием (guard condition) и действием. Охранное условие зависит от переменных и параметров символов и определяет дополнительное условие выполнения данного перехода. Для того чтобы переход выполнился, мало подать на вход автомата нужный символ, нужно еще использовать такие значения его параметров, чтобы охранное условие выполнилось. Действие (указывается перед выходным символом) определяет новые значения внутренних переменных и значения параметров реакции в зависимости от прежних значений переменных и значений параметров стимула. Пусть программа состоит из ресурсов и функций, изменяющих состояния ресурсов, значения атрибутов ресурсов и выполняющих действия над ресурсами. Для каждого ресурса определено конечное множество состояний (состояния могут быть параметризованы) и множество атрибутов. Для каждой функции определены входные и выходные состояния ресурсов, операции над ресурсами и изменения их атрибутов. Выходами управляет логическая функция от входных состояний и их параметров. Таким образом, исходный код программы представляет собой сеть конечных автоматов. В общем случае эти конечные автоматы могут быть связанными, тогда в логических функциях переходов участвуют состояния иных ресурсов.

С точки зрения семантики для каждого ресурса необходимо определить:

вид ресурса;

типы, которыми представлен ресурс;

возможные состояния ресурса;

начальное состояние;

конечные состояния;

атрибуты ресурса.

Для некоторых ресурсов необходимо выделять, какое из состояний ресурса является *начальным*, какие состояния являются *конечными*. Конечное состояние ресурса – такое состояние ресурса, после перехода в которое возможно корректное удаление самого ресурса. При реинжиниринге кода, содержащего операции с таким ресурсом, необходимо осуществить соответствующую кодогенерацию с целью соблюдения корректности удаления ресурса.

Функции для работы с ресурсами будем называть *ресурсными функциями*. С точки зрения семантики ресурсные функции дополнительно к существующей семантике могут:

создавать или удалять ресурсы;

переводить ресурсы из одного состояния в другое;

проверять состояния ресурсов;

проверять и изменять значения атрибутов ресурса;

выполнять какое-либо действие с участием ресурса.

Важно отметить, что для некоторых состояний ресурса может не существовать функций, выполняющих какие-либо действия над ресурсом, находящемся в данном состоянии. Состояния ресурсов, для которых специфицирована хотя бы одна функция с некоторым действием, будем назвать *ключевыми состояниями ресурса*.

Среди ресурсов можно выделить особый тип ресурсов, не играющих ключевую роль в работе программы. Будем их называть *утилитарными ресурсами*. Такие ресурсы служат для настройки, инициализации, предварительной подготовки компонентов программного окружения и, как правило, являются частью только одного из окружений. В таком окружении ресурсные функции остальных ресурсов могут проверять состояние утилитарных ресурсов. При переносе кода между

окружениями необходимо учитывать такие ресурсы особенным образом.

Формальное описание ресурса можно представить так:

$$R = \{(n, t, Q, Q_K, F_R, A_R, y, q_0, Q_F)\},$$

где n – имя ресурса; t – тип ресурса, $t \in T$; Q – конечное множество состояний ресурса; Q_K – конечное множество ключевых состояний ресурса, $Q_K \in Q$; F_R – конечное множество ресурсных функций; A_R – конечное множество атрибутов ресурса; y – функция переходов: $Q \times F_R \times A_R \rightarrow Q^{\sim} \times \times A^{\sim}_R$, $Q^{\sim} \in Q$, $A^{\sim}_R \in A_R$; q_0 – начальное состояние ресурса, $q_0 \in Q$; Q_f – конечные состояния ресурса, $Q_f \in Q$.

Язык PanLang позволяет описывать программные ресурсы, использующиеся в окружениях, явным образом. Для каждого типа ресурса задаются имя и перечень состояний, в которых ресурс может находиться во время выполнения программы [9]. Для любого типа ресурса можно задавать произвольные атрибуты, а также дополнительные свойства.

Рассмотрим описания ресурса, соответствующего сокетам для ОС Linux и библиотеки WinSock ОС Windows (листинг 6 и 7).

```
resource SOCKET (SOCKET_TYPE) {
   states CREATED, CONNECTED, LISTENING, BOUND, CLOSED;
   finit CLOSED;
   attribute SHUTDOWN_HOW SHUTDOWN_TYPE;
}
type SHUTDOWN_HOW (int) {
   READ = SHUT_RD;
   WRITE = SHUT_WR;
   READ_WRITE = SHUT_RDWR;
}
```

Листинг 6: Описание ресурса для ОС Linux

```
resource SOCKET (SOCKET_TYPE) {
   states CREATED, CONNECTED, LISTENING, BOUND, CLOSED;
   finit CLOSED;
   attribute SHUTDOWN_HOW SHUTDOWN_TYPE;
}
type SHUTDOWN_HOW (int) {
   READ = SD_RECEIVE;
   WRITE = SD_SEND;
   READ_WRITE = SD_BOTH;
}
```

Листинг 7: Описание ресурса для ОС Windows

Из данных спецификаций видно, что описания ресурсов сокетов совпадают. Различия изолированы в описаниях типов SOCKET_TYPE и SHUTDOWN_HOW. Задача переноса кода между окружениями сводится к преобразованию типов переменных и констант, соответствующих данным типам.

Действия. Видимое поведение функции может быть как операцией над аргументами, так и действием с некоторым *побочным эффектом* (side effect). Побочный эффект функции – это модификация значений глобальных переменных, осуществление операций ввода/вывода, осуществление операций с какими-либо ресурсами (файлы, динамическая память, потоки, объекты синхронизации и пр.). Поведение функции с побочным эффектом может быть не детерминировано на одном и том же наборе значений входных аргументов. Побочный эффект может быть не связан с ресурсом. Например, функция sleep (описана в unistd.h) задерживает выполнение потока или процесса. Для таких функций необходимо задание семантики, при помощи которой можно описать *действие* (action), выполняемое функцией. При переносе кода между окружениями, где функции имеют различные имена, типы, количе-

ство параметров, действия функций несут основную семантическую нагрузку и будут являются основным критерием их соответствия:

$$A = \{(n, P)\},$$

где n – имя действия; P –множество параметров действия.

В отличие от функций, действия не содержат операционной семантики, все элементы спецификации действий задаются декларативно. Действия с точки зрения семантики представляют собой одну неделимую операцию. Функция может выполнять несколько действий.

Язык PanLang содержит конструкции, позволяющие объявлять действия и использовать их в теле функции. Рассмотрим пример спецификаций функции `unsigned sleep(unsigned int seconds)` из библиотеки unistd.h ОС Linux и функции `VOID WINAPI Sleep(DWORD dwMilliseconds)` из библиотеки Winbase.h ОС Windows (листинг 8 и 9).

```
type SEC (unsigned int) {
}
type SLEEP_TIME (SEC) {
}
action SLEEP (SLEEP_TIME);
function sleep (SLEEP_TIME t) {
   action SLEEP (t);
}
```

Листинг 8: Описание действий для ОС Linux

```
type MILISEC (DWORD) {
}
type SLEEP_TIME (MILISEC) {
}
action SLEEP (SLEEP_TIME);
function Sleep (SLEEP_TIME t) {
   action SLEEP (t);
}
```

Листинг 9: Описание действий для ОС Windows

Из данных спецификаций видно, что описания функций совпадают. Действия `SLEEP` задают семантику для функций, благодаря которой возможно автоматическое сопоставление и замена одной функции на другую. Различия в спецификациях сосредоточены в описаниях типов `SLEEP_TIME`. В одном случае данный тип расширяет тип `SEC`, в другом – `MILISEC`. При автоматизированном переносе исходного кода между окружениями подобные различия спецификаций преодолеваются путем генерации функций преобразования значений одного типа в другой. В данном случае функция преобразования будет тривиальной.

Функции. Являются основным составляющим каждого API. Необходимо формально описать *видимое* поведение функции, заключающееся в выполнении действий и изменении окружения. Изменять окружение функции могут с помощью аргументов, возвращаемых значений и оперируя с ресурсами. Видимое поведение функций необходимо специфицировать посредством операционной семантики, в то время как остальные аспекты спецификации задаются декларативно.

Таким образом, с точки зрения семантики для функции должны быть определены:

сигнатура, определяющая *семантику* аргументов функции и возвращаемого значения;

видимое поведение, описываемое алгоритмом, и заключающееся в модификации аргументов функции, формировании возвращаемого значения функции, модификации глобальных объектов, модификации *ресурсов*, в выполнении *действий*.

Формальное определение:

$$F = (n, P_{in}, P_{out}, B),$$

где n – имя функции; P_{in} – конечное множество входных параметров функции; P_{out} – конечное множество выходных параметров функции; $P_{in} \in P$, $P_{out} \in P$, где P – конечное множество кортежей видов (n, t), (n, t, e), где n – имя параметра, $t \in T^*$, e – выражение; B – укрупненный алгоритм функции.

В языке PanLang для каждой функции задается сигнатура, имя функции и описание поведения [9]. Сигнатура включает в себя имена и типы аргументов, а также тип результата. Секция поведения содержит последовательность операторов, описывающих поведение специфицируемой функции. Поддерживаются несколько групп операторов:

управление вычислительным процессом (конструкция ветвления `if`, оператор завершения программы);

модификация значений объектов (параметров функций, внутренних переменных, глобальных переменных и пр.)

работа с участками памяти;

работа с ресурсами (создание и освобождение, проверка и изменение состояний, модификация значений атрибутов);

действия

и т. п.

```
type FILE_FLAGS (char*) {
   READ = "r";
   WRITE = "w";
   ALL = "rw";
}
resource FILE (FILE_TYPE) {
   states OPEN, CLOSED;
   finit CLOSED;
   attribute FILE_FLAGS MODE;
}
function FILE fopen (FILE_NAME (char*), FILE_FLAGS mode) {
   f = new FILE(OPEN);
   attr(f, MODE) = mode;
   return f;
}
```

Листинг 10: Пример спецификации функции `fopen`

В качестве примера описания семантики функций рассмотрим спецификацию функции `FILE *fopen(const char *restrict filename, const char *restrict mode)` из библиотеки `<stdio.h>` (листинг 10).

Данная спецификация определяет семантику функции `fopen` – создание ресурса `FILE` с начальным состоянием `OPEN`, задание режима доступа к файлу.

Заголовочные файлы. В языке Си функции, типы и константы объявляются в заголовочных файлах. Спецификация окружения должна содержать перечень необходимых заголовочных файлов, достаточных для функционирования окружения (в т. ч. и для компиляции программы в окружении). Заголовочные файлы могут требоваться как для всех элементов спецификации, так и для конкретных элементов: функций, типов и пр.:

$$H = \{h_i\},$$

где h_i – имя заголовочного файла.

Пример спецификации, задающей заголовочные файлы, требующиеся для описываемых функций, приведен листинге 11:

```
requires <stdio.h>;
requires <stdlib.h>;
```

Листинг 11: Спецификация задания заголовочных файлов

При переносе исходного кода в новое окружение к существующим заголовочным файлам в код, затрагивающий специфицированную часть окружения, добавятся файлы, описанные в спецификации целевого окружения.

Применение разработанного формализма

Описанный формализм удовлетворяет всем поставленным требованиям, т. е. позволяет специфицировать структуру и видимое поведение программного окружения. Все способы взаимодействия программы и окружения описываются формально с использованием простого математического аппарата: теории множеств, конечных автоматов или простых императивных конструкций, сводящихся к выражениям логики первого порядка. Простота аппарата позволяет решать актуальные задачи реинжиниринга:

проверку совместимости двух окружений;

генерацию функций или шаблонов функций для элементарных преобразований семантических типов;

формирование правил преобразования программы при реинжиниринге.

Для задания частичных спецификаций разработчик может использовать язык PanLang с Си-подобным синтаксисом, позволяющий описывать все компоненты спецификаций в привычной для программиста форме [9]. Такие спецификации состоят из декларативных и императивных описаний и могут быть построены на основе анализа руководств по используемым библиотекам.

Представленный формализм для описания частичных спецификаций приложений является основой для системы портирования приложений из одного программного окружения в другое [6], разрабатываемой на кафедре компьютерных систем и программных технологий Снкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Проведение реинжиниринга программных систем при переносе в новое программное окружение – непростая научно-техническая задача. В зависимости от сложности программного окружения, используемых в программной системе библиотечных функций, механизмов, применяемых разработчиком при проектировании программы, задача может решаться полностью автоматизированно, частично автоматизированно или вручную.

В статье отражены основные результаты исследования в области формализации частичных спецификаций программных компонентов, связанной с переносом программного кода между окружениями. Для описания поведения компонентов использован язык PanLang, являющийся мощным выразительным средством. Показаны возможности языка для специфицирования семантики компонентов.

Полученные результаты служат основой для решения задачи автоматизации переноса приложений из одной среды в другую. При этом в отличие от других подходов не требуется явное алгоритмическое описание процесса трансформации, что позволяет автоматизировать широкий класс задач портирования.

Направления дальнейших исследований связаны с расширением спектра поддерживаемых способов взаимодействия программы и окружения и адаптацией формализма и сопутствующих алгоритмов к объектно-ориентированным языкам программирования (в первую очередь – C++, Java и C#). Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос возможности создания абстрактных спецификаций, не привязанных к конкретному языку программирования, для решения задачи автоматизации межязыковой трансляции.

Работа выполнена в рамках госконтракта № П2226 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pierce, B.C.** Types and Programming Languages [Текст] / B.C. Pierce. –Cambridge: The MIT Press, 2002. –645 p.

2. **Budkowski, S.** ISO Standardized Description Technique ESTELLE [Текст] / S. Budkowski, P. Dembinski, M.Diaz. ISO. – 1989. –P. 1–28.

3. **Cheng, K-T**. Automatic Functional Test Generation Using The Extended Finite State Machine Model [Текст]/ K.-T. Cheng, A.S. Krishnakumar // International Design Automation Conf. (DAC). ACM. –1993. –P. 86–91.

4. **Eisner, C**. Comparing Symbolic and Explicit Model Checking of a Software System [Текст] / C. Eisner, D. Peled // Proc. of the 9th International SPIN Workshop on Model Checking of Software. –London: Springer-Verlag, 2002. –P. 230–239.

5. **Scott, D.** Toward a Mathematical Semantics for Computer Languages [Текст] / D. Scott, C. Strachey // Programming Research Group Technical Monograph PRG-6. –Oxford: OUCL, 1971. –43 p.

6. **Itsykson V.** Automated Program Reengineering When Porting Software to a New Environment Described by Partial Specifications [Текст] / V. Itsykson, A. Zozulya, M. Glukhikh // Proc. of 2nd Workshop Program Semantics, Specification and Verification. –St.Petersburg, 2011. –P. 111–119.

7. **Turner, K.J.** Template-based specification in LOTOS [Текст] / K.J. Turner. –Department of Computing Science and Mathematics, University of Stirling, Scotland, 1993.

8. **Spivey, J.M.** The Z Notation: A Reference Manual [Текст] / J.M. Spivey // Programming Research Group. –University of Oxford, 1992.

9. **Ицыксон, В.М.** Язык спецификаций поведения программных компонентов [Текст] / В.М. Ицыксон, М.И. Глухих // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –№ 3 –С. 63–71.

10. **Кознов, Д.В.** Языки визуального моделирования. Проектирование и визуализация программного обеспечения: Учеб. пособие [Текст] / Д.В. Кознов. –СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. –171 с.

11. **Фаулер, М.** UML. Основы [Текст] / М. Фаулер; Пер. с англ. –СПб.: Символ-Плюс, 2004. –3-е изд. –192 с.

УДК 519.2

Г.И. Белявский, Н.Д. Никоненко

ЗАДАЧА О РАНДОМИЗИРОВАННОЙ ОСТАНОВКЕ ПРИ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОМ ХЕДЖИРОВАНИИ

В статье решается задача об оптимальной рандомизированной остановке при аппроксимации конечной последовательности случайных величин f последовательностью стохастических интегралов $G(\gamma)$ процесса S в дискретном времени. Для решения данной задачи используется теорема о минимаксе, метод стохастического динамического программирования Беллмана и метод проекции обобщенного градиента. Последовательность f можно интерпретировать как динамическое дисконтированное финансовое обязательство, процесс S – как дисконтированную цену рискового актива на финансовом рынке, а последовательность стохастических интегралов $G(\gamma)$ – как дисконтированный процесс доходов стратегии γ.

Предварительные замечания

Рассмотрим фильтрованное вероятностное пространство $(\Omega, (F_i)_{i=0}^N, P)$, на котором задан базовый адаптированный процесс S, причем $S_i \in L_2(\Omega, P)$. Последовательность стохастических интегралов $G(\gamma) = \{G_1(\gamma), ..., G_N(\gamma)\}$ для предсказуемой последовательности γ определяется равенствами $G_N(\gamma) = \sum_{i=1}^{N} \gamma_i \Delta S_i$. Введем определение рандомизированной остановки.

Определение. Будем называть рандомизированной остановкой вектор $q = \{q_1, ..., q_N\}$, такой, что $\sum_{i=1}^{N} q_i = 1, q_i \geq 0$, рандомизированной остановкой, отделенной от нуля, назовем вектор $q = \{q_1, ..., q_N\}$, где $\sum_{i=1}^{N} q_i = 1, q_i \geq \delta > 0$.

Рассмотрим аппроксимацию конечной последовательности $f = \{f_1, ..., f_N\} \in L^N = L_2(\Omega, P) \times \times L_2(\Omega, P) \times \cdots \times L_2(\Omega, P)$ случайных величин последовательностью стохастических интегралов при фиксированной рандомизированной остановке q. Скалярное произведение в L^N определим равенством $(a,b)_{L^N(q)} = \sum_{i=1}^{N} q_i (a_i, b_i)$, согласованная норма определяется равенством $\|a\|_{L^N(q)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} q_i \|a_i\|_{L_2}^2}$.

При естественном допущении $\gamma_i \Delta S_i \in \in L_2(\Omega, P)$, последовательность $G(\gamma) \in L^N$ образует в этом пространстве линейное подпространство H.

Далее предположим, что базовый процесс S удовлетворяет условию невырожденности [2]:

$$(E_P(\Delta S_k / F_{k-1}))^2 \leq \delta E_P(\Delta S_k^2 / F_{k-1}), \delta \in (0,1). \quad (1)$$

Применив доказательство, приведенное в работе [3], можно доказать, что подпространство H замкнуто в L^N.

Аппроксимация рассматривается в смысле нормы $L^N(q)$, т. е. необходимо найти

$$\min \|f - G(\gamma)\|_{L^N}^2 \text{ по всем } G(\gamma) \in H. \quad (2)$$

Данную задачу можно рассматривать как проекцию точки пространства L^N на подпространство H. Пространство L^N является гильбертовым, поскольку декартово произведение гильбертовых пространств есть гильбертово пространство [11], согласно теореме [7] и ее следствию [7]. Подпространство H замкнуто, поэтому задача (2) имеет решение и притом единственное.

Основной результат

Рассмотрим задачу:

$$\min_{x \in R, G(\gamma) \in H} \max_{q \in Q(\delta)} \|f - x - G(\gamma)\|_{L^N(q)}^2, \quad (3)$$

где $f - x = \{f_1 - x, ..., f_N - x\}$,

$$Q(\delta) = \left\{ \sum_{i=1}^{N} q_i = 1, q_i \geq \delta > 0 \right\}.$$

Интерпретация. Задачу (3) можно рассматривать как задачу об оптимальной δ-рандомизированной остановке при среднеквадратичном хеджировании динамического финансового обязательства (последовательность f), последовательность γ – оптимальная стратегия воспроизведения финансового обязательства. Базовый процесс S представляет собой дисконтированную цену рискового актива, $x = X_0$ – начальный капитал портфеля.

Для упрощения решения задачи (3) целесообразно перейти от задачи на минимакс к задаче на максимин. Для этого воспользуемся теоремой о минимаксе [8]. Теорема о минимаксе фон Неймана устанавливает следующее равенство: $\min\limits_{u \in X} \max\limits_{v \in T} f(u,v) = \max\limits_{v \in T} \min\limits_{u \in X} f(u,v)$, если функция $f(u,v)$ непрерывна на произведении выпуклых компактов, выпукла по $u \in X$ и вогнута по $v \in T$.

Введем обозначение целевой функции задачи об оптимальной рандомизированной остановке:

$$W(x,\gamma,q) = \sum_{i=1}^{N} q_i E_P \left(f_i - \left(x + \sum_{j=1}^{i} \gamma_j \Delta S_j \right) \right)^2.$$

Функция $W(x,\gamma,q)$ – положительно определенная квадратичная функция по переменным x и γ, следовательно, выпуклая по этим переменным. По переменной q функция $W(x,\gamma,q)$ – линейная, следовательно, вогнутая. Функция $W(x,\gamma,q)$ – непрерывная функция, определенная на декартовом произведении $R \times H \times Q$. Множество Q – выпуклый компакт. Множество $R \times H$ выпуклое, но не является компактом. Чтобы преодолеть эту трудность, применим компактификацию Александрова: воспользуемся теоремой о компактификации [10].

Поскольку $R \times L^N$ является локально компактным хаусдорфовым пространством и H – замкнутое линейное подпространство L^N, то компактификация осуществляется присоединением к $R \times H$ «бесконечно удаленной точки»: $\overline{R} \times \overline{H} = R \times H \bigcup \{\infty, \infty\}$.

Доопределим функцию в точке (∞, ∞) $W(\infty, \gamma, q) = W(x, \infty, q) = W(\infty, \infty, q) = \infty$. Поскольку данная функция выпуклая по переменным x, γ и решается задача на минимум по данным переменной, то будем считать, что данная точка не влияет на решение задачи.

Таким образом, функция $W(x,\gamma,q)$ непрерывная и выпуклая на выпуклом компакте $\overline{R} \times \overline{H}$. Следовательно, теорема фон Неймана применима, т. е.:

$$\min_{(x,G(\gamma)) \in \overline{R} \times \overline{H}} \max_{q \in Q(\delta)} \left\| f - x - G(\gamma) \right\|^2_{L^N(q)} = \\ = \max_{q \in Q(\delta)} \min_{(x,G(\gamma)) \in \overline{R} \times \overline{H}} \left\| f - x - G(\gamma) \right\|^2_{L^N(q)}. \quad (4)$$

Решение внутренней задачи

При фиксированной стратегии q рассмотрим задачу:

$$\min_{(x,G(\gamma)) \in \overline{R} \times \overline{H}} \left\| f - x - G(\gamma) \right\|^2_{L^N(q)} = \\ = \min_{(x,\gamma)} \sum_{i=1}^{N} q_i E_P \left(f_i - \left(x + \sum_{j=1}^{i} \gamma_j \Delta S_j \right) \right)^2, \quad (5)$$

где γ – предсказуемая последовательность. При любом x задача $\min\limits_{G(\gamma) \in \overline{H}} \left\| f - x - G(\gamma) \right\|^2_{L^N(q)}$ имеет единственное решение – проекция $f - x$ на замкнутое подпространство H. Для ее решения применим метод стохастического динамического программирования. Воспользуемся стохастическим аналогом результата, полученного в [4].

Вместо задачи (5) рассмотрим последовательность более простых задач. Определим последовательность функций от случайных величин:

$$\Psi_k(x) = \min_{\gamma_{k+1}^N} \sum_{i=1}^{N} q_i E_P \times \\ \times \left(\left(f_i - \left(x + \sum_{j=k+1}^{i} \gamma_j \Delta S_j \right) \right)^2 \Big/ F_k \right), \quad (6)$$

$$x \in F_k,\ k = 0, ..., N-1;\ \gamma_{k+1}^N = (\gamma_i)_{i=k+1}^N.$$

Если определение (6) корректно, то функционалы (6) удовлетворяют рекуррентным стохастическим уравнениям Беллмана:

$$\Psi_k(x) = \min_{\gamma_{k+1}} E_P(q_k (f_k - x)^2 + \\ + \Psi_{k+1}(x + \gamma_{k+1} \Delta S_{k+1}) / F_k). \quad (7)$$

Является справедливым утверждение.

Утверждение. Для всех $q \in Q(\delta)$ задача $\min\limits_{\gamma_{k+1}^N} \sum\limits_{i=1}^{N} q_i E_P \left(\left(f_i - \left(x + \sum\limits_{j=k+1}^{i} \gamma_j \Delta S_j \right) \right)^2 \Big/ F_k \right)$ имеет решение для всех k, определение (6) корректно и $\Psi_k(x) = a_k x^2 + b_k x + c_k$, причем оптимальное значение

$$\gamma_{k+1}^*(x) = \theta_k x + \vartheta_k, \quad (8)$$

где $a_k, b_k, c_k, \theta_k, \vartheta_k \in F_k$.

Доказательство проведем методом индукции назад.

Шаг 1. Покажем, что утверждение верно для $l = N-1$. Заметим, что $a_N = q_N, b_N = -2q_N f_N$, $c_N = q_N (f_N)^2$.

Рассмотрим

$$\Psi_{N-1}(x) = q_N \min_{\gamma_N \in F_{N-1}} E_P((f_N - x - \gamma_N \Delta S_N)^2 / F_{N-1}).$$

Непосредственно убеждаемся, что

$$\gamma_N^* = -x\frac{E_P(\Delta S_N / F_{N-1})}{E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1})} + \frac{E_P(f_N \Delta S_N / F_{N-1})}{E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1})}.$$

Отсюда $\theta_{N-1} = \dfrac{E_P(\Delta S_N / F_{N-1})}{E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1})}$,

$$\vartheta_{N-1} = \frac{E_P(f_N \Delta S_N) / F_{N-1})}{E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1})},$$

$$\Psi_{N-1}(x) = a_{N-1}x^2 + b_{N-1}x + c_{N-1},$$

где $a_{N-1} = \dfrac{q_N}{E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1})} \times$

$$\times (E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1}) - (E_P(\Delta S_N / F_{N-1}))^2);$$

$$b_{N-1} = \frac{2q_N}{E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1})} \times$$

$$\times (E_P(f_N \Delta S_N / F_{N-1}) E_P(\Delta S_N / F_{N-1}) -$$

$$- E_P(f_N / F_{N-1}) E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1}));$$

$$c_{N-1} = \frac{q_N}{E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1})} \times$$

$$\times (E_P((f_N)^2 / F_{N-1}) E_P((\Delta S_N)^2 / F_{N-1}) -$$

$$- (E_P(f_N \Delta S_N / F_{N-1}))^2).$$

Шаг 2. Пусть утверждение верно для $l = k+1$.

Шаг 3. Покажем, что утверждение верно для $l = k$.

Раз верно для $l = k+1$, значит, справедливы (7) и (8).

Решим задачу (7), получим:

$$\gamma_{k+1} = -x\frac{E_P(a_{k+1}\Delta S_{k+1} / F_k)}{E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2 / F_k)} - \frac{E_P(b_{k+1}\Delta S_{k+1} / F_k)}{2E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2 / F_k)}. \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в (7), получим рекуррентные формулы для вычисления коэффициентов a_k, b_k, c_k:

$$a_N = q_N, b_N = -2q_N f_N, c_N = q_N (f_N)^2,$$
$$a_k = E_P(a_{k+1}(\theta_k \Delta S_{k+1} + 1)^2 / F_k) + q_k,$$
$$b_k = E_P(b_{k+1}(\theta_k \Delta S_{k+1} + 1) / F_k) - \quad (10)$$
$$-2q_k f_k + 2\vartheta_k E_P(a_{k+1}(\theta_k \Delta S_{k+1} + 1)\Delta S_{k+1} / F_k),$$

$$c_k = E_P(c_{k+1} / F_k) + \vartheta_k^2 E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2 / F_k) +$$
$$+ \vartheta_k E_P(b_{k+1}\Delta S_{k+1} / F_k) + q_k (f_k)^2,$$

где

$$\theta_k = -\frac{E_P(a_{k+1}\Delta S_{k+1} / F_k)}{E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2 / F_k)},$$

$$\vartheta_k = -\frac{E_P(b_{k+1}\Delta S_{k+1} / F_k)}{2E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2 / F_k)}.$$

Рассмотрим формулу (9) для вычисления γ. Покажем, что если знаменатели дробей θ_k и ϑ_k равны нулю, то и их числители равны нулю. Заметим, что знаменатели рассматриваемых дробей совпадают с точностью до константы.

Рассмотрим $E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2 / F_k)$.

Согласно формуле построения коэффициентов (10) $a_k \geq 0$. Тогда, согласно свойствам математического ожидания, получим, что $E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2 / F_k) \geq 0$. Поскольку рассматриваем задачу о рандомизированной остановке, отделенной от нуля, то, используя метод математической индукции, нетрудно показать, что все $a_k \geq \delta > 0$. Откуда, знаменатель $E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2 / F_k)$ равен нулю, если $E_P((\Delta S_{k+1})^2 / F_k) = 0$.

Рассмотрим $\left|E_P(b_{k+1}\Delta S_{k+1} / F_k)\right|$. Для выражения $E_P(\left|b_{k+1}\Delta S_{k+1}\right| / F_k)$ воспользуемся неравенством Гельдера для условного математического ожидания [5], получим $E_P(\left|b_{k+1}\Delta S_{k+1}\right| / F_k) \leq$ $\leq (E_P(\left|b_{k+1}\right|^2 / F_k))^{\frac{1}{2}} (E_P(\left|\Delta S_{k+1}\right|^2 / F_k))^{\frac{1}{2}}$. Отсюда $E_P(\left|f_{k+1}\Delta S_{k+1}\right| / F_k) = 0$. Из неравенства Йенсена [5] следует равенство $E_P(b_{k+1}\Delta S_{k+1} / F_k) = 0$. Аналогично получим, что $E_P(a_{k+1}\Delta S_{k+1} / F_k) = 0$.

Таким образом, если знаменатель в (10) равен нулю, то числитель также равен нулю. В этом случае в качестве оптимального значения возьмем $\gamma_{k+1}^* = 0$ и, следовательно, $\theta_k = \vartheta_k = 0$. Тем самым утверждение доказано.

Рассмотрим $\Psi_0(x) = a_0 x^2 + b_0 x + c_0$, где a_0, b_0, c_0 – константы. Оптимальное значение $x^* = -\dfrac{b_0}{2a_0}$.

Решение внешней задачи

Рассмотрим задачу:

$$\max_q \min_{(x,\gamma)} \sum_{i=1}^N q_i E_P\left(f_i - \left(x + \sum_{j=1}^i \gamma_j \Delta S_j\right)\right)^2, \quad (11)$$
$$\sum_{i=1}^N q_i = 1, q_i \geq \delta > 0.$$

Целевая функция задачи (11)

$$\Phi(q)=\min_{(x,\gamma)}\sum_{i=1}^{N}q_iE_P\left(f_i-\left(x+\sum_{j=1}^{i}\gamma_j\Delta S_j\right)\right)^2$$

вогнутая недифференцируемая функция, поскольку является максимумом линейных функций [6]. Введем обозначение

$$\chi_i(q):=E_P\left(f_i-\left(x^*(q)+\sum_{j=1}^{i}\gamma_j^*(q)\Delta S_j\right)\right)^2,$$

где $(x^*(q),\gamma^*(q))$ – решение внутренней задачи. Для решения (11) применим метод проекции обобщенного градиента:

$$q^{t+1}=\prod_{Q(\delta)}(q^t+h_tg(q^t)), \qquad (12)$$

где $\prod_{Q(\delta)}(\cdot)$ проекция на множество $Q(\delta)$, $g(q)$ обобщенный градиент:

$$g(q)=\begin{pmatrix}\chi_1(q)\\ \chi_2(q)\\ \\ \chi_N(q)\end{pmatrix},\chi_i(q)\ge 0.$$

Шаговые множители удовлетворяют соотношению $h_k\to 0,\sum_{k=0}^{\infty}h_k=\infty$.

Отметим, поскольку $\chi_i(q)\ge 0$, то из того, что $q_i^t\ge\delta$, следует неравенство $(q^t+h_tg(q^t))_i\ge\delta$. Рассмотрим вектор $x:x_i\ge\delta$, тогда существует такое $\overline{\delta}>0$, что $\frac{x_i}{\sum_{j=1}^{N}x_j}\ge\overline{\delta}$. Поэтому (12) трансформируется в

$$q^{t+1}=\frac{q^t+h_tg(q^t)}{(I,q^t+h_tg(q^t))}. \qquad (13)$$

В (13) вектор $I=\begin{pmatrix}1\\ \dots\\ 1\end{pmatrix}$, $(.,.)$ – скалярное произведение в R^N.

Случай мартингальной меры

Пусть мера P такова, что $E_P(\Delta S_k/F_{k-1})=0$. Является справедливым утверждение.

Утверждение. Коэффициенты a_k являются константами, коэффициенты θ_k равны нулю.

Доказательство проведем методом математической индукции назад.

Шаг 1. Покажем, что утверждение верно для $l=N-1$.

Непосредственно убеждаемся, что $\theta_{N-1}=0, a_{N-1}=q_{N-1}+a_N$.

Шаг 2. Пусть утверждение верно для $l=k+1$.

Шаг 3. Покажем, что утверждение верно для $l=k$.

Так как $\theta_k=-\frac{E_P(a_{k+1}\Delta S_{k+1}/F_k)}{E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2/F_k)}=$

$$=-\frac{a_{k+1}E_P(\Delta S_{k+1}/F_k)}{E_P(a_{k+1}(\Delta S_{k+1})^2/F_k)},$$

то $\theta_k=0$. Отсюда и из (10) следует, что $a_k=a_{k+1}+q_k$.

Тем самым утверждение доказано.

Из утверждения следует, что формулы (9) и (10) приобретают более простой вид:

$$\gamma_{k+1}=\vartheta_k, \qquad (14)$$

$$\begin{aligned}a_k&=a_{k+1}+q_k,\\ b_k&=E_P(b_{k+1}/F_k)-2q_kf_k,\\ c_k&=E_P(c_{k+1}/F_k)+\\ &+\vartheta_k^2a_{k+1}E_P((\Delta S_{k+1})^2/F_k)+\\ &+\vartheta_kE_P(b_{k+1}\Delta S_{k+1}/F_k)+q_k(f_k)^2,\end{aligned} \qquad (15)$$

где $\vartheta_k=-\frac{E_P(b_{k+1}\Delta S_{k+1}/F_k)}{2a_{k+1}E_P((\Delta S_{k+1})^2/F_k)}$.

Из этого вытекает, что, во-первых, γ_k не зависят от x; во-вторых, равенство нулю знаменателя приводит непосредственно к $E_P((\Delta S_{k+1})^2/F_k)=0$, следовательно, к $E_P(b_{k+1}\Delta S_{k+1}/F_k)=0$. Отсюда для мартингальной меры условие δ – отделимости смешанной остановки может быть снято.

Таким образом, для мартингальной меры вычисления существенно упрощаются.

Пример. Рассмотрим модель (B, S)-рынка Кокса–Росса–Рубинштейна (биномиальная модель). Базовый процесс эволюционирует по закону

$$S_n=S_{n-1}(1+a)\left(\frac{1+b}{1+a}\right)^{\delta_n},\ \delta_n\in\{0,1\}.$$

Безрисковый актив изменяется по закону $B_n\equiv 1$. Данный рынок является полным и безарбитражным при выполнении условия $-1<a<0<b$, то есть мартингальная мера существует и является единственной. Мартингальная мера определяется соотношением $p^*=P(\delta_n=1)=\frac{a}{a-b}$. Рассмотрим в качестве финансового обязательства Американский опцион call $f_n=(S_n-K)^+=\max\{S_n-K,0\}$. Заметим, что для биномиальной модели (B, S)-рынка Американский опцион call и Европейский опцион call совпадают [9]. Следовательно, справедливая цена Европейского опциона вычисляется по формуле

Кокса−Росса−Рубинштейна [9]:

$$C(N) = S_0 B(k_0, N; \tilde{p}) - KB(k_0, N; p^*),$$

где $\tilde{p} = \frac{1+b}{1+a} p^*$,

$$B(j, N; p) = \sum_{k=j}^{N} C_N^k p^k (1-p)^{N-k},$$

$$k_0 = 1 + \left[\ln \frac{K}{S_0 (1+a)^N} \Big/ \ln \frac{1+b}{1+a} \right].$$

Сравним результаты решения задачи определения цены хеджирования, используя метод решения задачи о рандомизированной остановке с формулой Кокса–Росса–Рубинштейна.

При начальных данных $S_0 = 3; K = 4; a = -0,7; b = 0,5; N = 10$ цена хеджирования, полученная по формуле Кокса–Росса–Рубинштейна $C(N) = 2,0739$, а при решении задачи о рандомизированной остановке: $C(N) = 1,9914$ (время работы программы 5,687 с).

Таким образом, цена, рассчитанная по методу рандомизированной остановки меньше, чем по формуле Кокса−Росса−Рубинштейна в данном примере. Это можно объяснить тем, что задача об оптимальной марковской остановке имеет следующий вид

$$\begin{gathered} \min X_0, \\ \text{при ограничениях} \\ \Delta X_t \le \gamma_t \Delta S \text{, для всех } t \text{ почти наверное,} \\ X_\tau \ge f_\tau \text{, для всех ограниченных марковских} \\ \text{моментов остановки } \tau. \end{gathered} \tag{16}$$

Следовательно, имеет более «жесткий» вид, чем задача об оптимальной рандомизированной остановке.

В статье представлен метод определения оптимальных стратегий как продавца, так и покупателя для динамических финансовых обязательств. В работах [1, 3] были предложены методы решения данной задачи только для опционов европейского типа, когда стратегия покупателя заранее известна, поэтому полученные результаты существенно обобщают работы [1, 3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bertsimas, D**. Hedging Derivative Securities and Incomplete Markets An Epsilon-Arbitrage Approach [Текст]/ D. Bertsimas, L. Kogan, A. W.Lo.// Operations Research. –2001. –Vol.49. –P. 372–397.

2. **Schweizer, M.** Hedging of Options in a General Semimartingale Model [Текст] / M. Schweizer// Diss. ETHZ. –1988. –№ 8615 .

3. **Schweizer, M.** Variance-Optimal Hedging in Discrete Time [Текст]/ M. Schweizer // Mathematics of Operations Research. –1995. –Vol. 20. –P. 1–32.

4. **Беллман, Р.** Динамическое программирование и уравнения в частных производных. [Текст]/ Р. Беллман, Э. Энджел; пер. С.П.Чеботарева. −М.: Мир, 1974.

5. **Партасарати К.** Введение в теорию вероятностей и теорию меры [Текст] / К. Партасарати; пер.А.В.Прохорова. –М.: Мир, 1983.

6. **Пшеничный, Б.Н.** Выпуклый анализ и экстремальные задачи [Текст]/ Б.Н. Пшеничный. –М.: Наука, 1980 .

7. **Треногин, В.А**. Функциональный анализ. [Текст]/ В. А. Треногин. –М.: Наука, 1980.

8. **Фон Нейман, Дж.** [Текст]/ Дж. Фон Нейман // Матричные игры. −М.: Физматгиз, 1961.

9. **Ширяев, А.Н.** Основы стохастической финансовой математики: Т. 2. Теория [Текст] / А.Н. Ширяев. –М.:ФАЗИС, 1998.

10. **Энгелькинг, Р**. Общая топология [Текст] / Р. Энгелькинг; пер. М.Я Антоновского, А.В. Архангельского. –М.: Мир, 1986.

11. **Юдович, В.И**. Математические модели естествознания: Курс лекций [Текст] / В.И. Юдович. –М.: Вузовская книга, 2009.

УДК 338.57

А.Ф. Зубков, К.Ю. Чех, И.А. Семенов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РЫНОЧНЫХ ЦЕН

Исследования рынка ценных бумаг показали, что в процессе изменения цены ее временная зависимость повторяется. Модель динамики цены (рис. 1) является частью более крупной модели

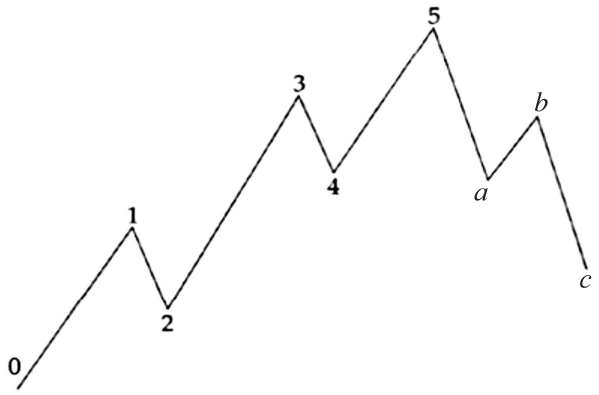


Рис. 1. Модель динамики цены
(общая форма развития волны Эллиотта)

и формируется из таких же более мелких моделей. При этом независимо от ценовых и временных размеров формирующихся моделей, все они имеют одинаковые закономерности: несимметричная ломаная 0-5-*c*, состоит из подобных ломаных 0-1-2, 2-3-4, 4-5-*a*, *a*-*b*-*c* [1].

Построение модели базируется на допущениях:

1. Для аппроксимации возьмем одиннадцать точек (девять в стандартной волне Эллиотта). Это необходимо для подтверждения одной из гипотез: один цикл сигнала состоит из одиннадцати точек, но определен только до девяти, а остальные отбрасываются, или один цикл сигнала состоит из девяти точек, а подъем правой части обеспечивают волны высших порядков.

2. Аппроксимацию проверим с помощью суммы трех синусоид, двух синусоид и сравним полученные результаты.

3. Значение x измеряется в единицах, кратных 0,0007. Одна минута соответствует значению $x = 0,0007$.

4. Волны Эллиотта представляем плавными кривыми синусоидами.

5. По оси ординат откладываем значение цены (для валюты цена – это ее курс). На этапе аппроксимации сигнала значение ординаты соответствует форме идеальной волны Эллиотта и измеряется в денежных единицах (д.е.).

Сигнал на рис. 1 представим в виде суммы синусоид:

$$y(x) = a_1 \sin(b_1 x + c_1) + a_2 \sin(b_2 x + c_2) + \\ + a_3 \sin(b_3 x + c_3). \quad (1)$$

Для моделирования сигнала волн Эллиотта определим коэффициенты уравнения (1), используя данные табл. 1.

Результат аппроксимации представлен на рис. 2.

Значения коэффициентов уравнения (1) приведены в табл. 2:

Форма слагаемых результирующего сигнала представлена на рис. 3.

Первое слагаемое задает общую форму, второе слагаемое образует ломаные меньшего по-

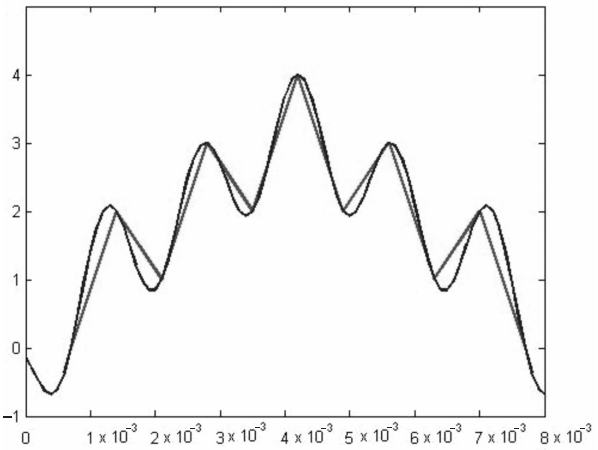


Рис. 2. Аппроксимация сигнала из одиннадцати точек

Таблица 1

Данные для проверки первой гипотезы

x	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035	0,0042	0,0049	0,0056	0,0063	0,007	0,0077
y	0	2	1	3	2	4	2	3	1	3	0

Таблица 2

Коэффициенты уравнения

	Первое слагаемое	Второе слагаемое	Третье слагаемое
a	2,906	1,8454	0,2483
b	810	4394	2876
c	–8,15072	–10,5917	5,884

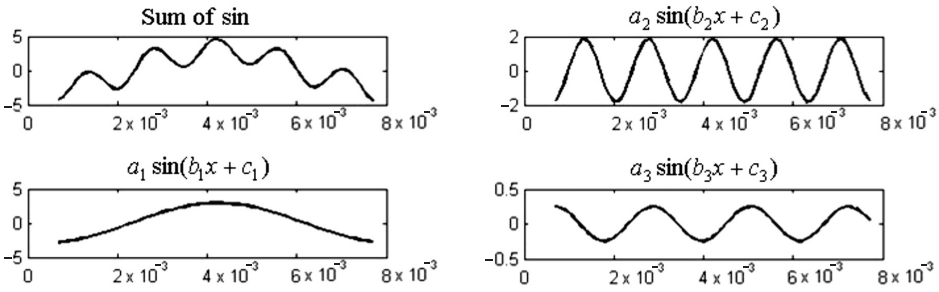


Рис. 3. Моделирование сигнала из одиннадцати точек с помощью трех синусоид

Таблица 3

Данные для проверки второй гипотезы

x	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035	0,0042	0,0049	0,0056	0,0063
y	0	2	1	3	2	4	2	3	1

рядка, третье вносит несимметричность в данную фигуру и подчеркивает форму, заданную предыдущими слагаемыми.

Рассмотрим вторую гипотезу: сигнал из девяти точек. Для этого определим коэффициенты уравнения (1), используя данные табл. 3.

Результат аппроксимации приведен на рис. 4.

Форма слагаемых результирующего сигнала представлена на рис. 5.

Для аппроксимации используется только верхняя часть волны первой синусоиды, если же рассмотреть результирующий сигнал от одного минимального значения до следующего минимального значения первой синусоиды, то количество волн с одной стороны больше пяти, что не соответствует первоначальной форме сигнала (см. рис. 1). Необходимо определить такие параметры синусоид, чтобы в сумме они составляли требуемый сигнал (пять волн вверх, три волны вниз). Период (расстояние между двумя минимумами $\left(-\pi/2\right)$ и $\left(3\pi/2\right)$ первого слагаемого синуса должен быть от 0,0007 до 0,0063. Ширину сигнала формирует коэффициент b_1, сдвиг по оси X –

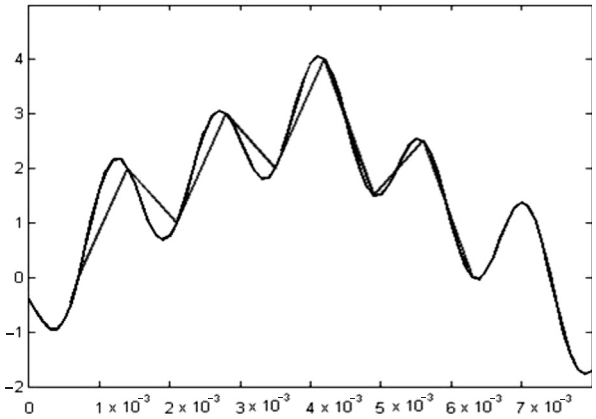


Рис. 4. Аппроксимация сигнала из девяти точек

коэффициент c_1 [2]. Таким образом, необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,0007b_1 + c_1 = -\dfrac{\pi}{2} \\ 0,0063b_1 + c_1 = \dfrac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (2)$$

Параметрами первой синусоиды являются корни системы уравнений (2),

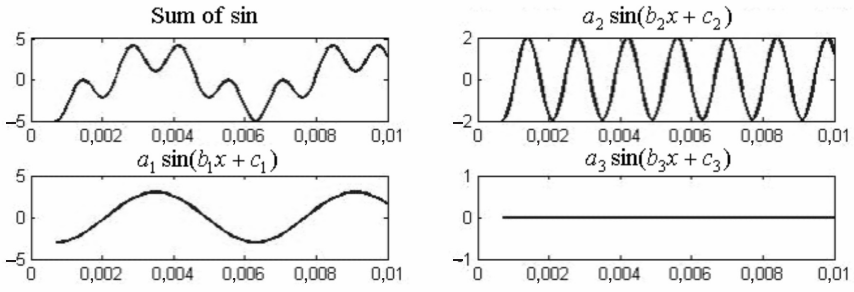


Рис. 5. Моделирование сигнала из девяти точек с помощью двух синусоид

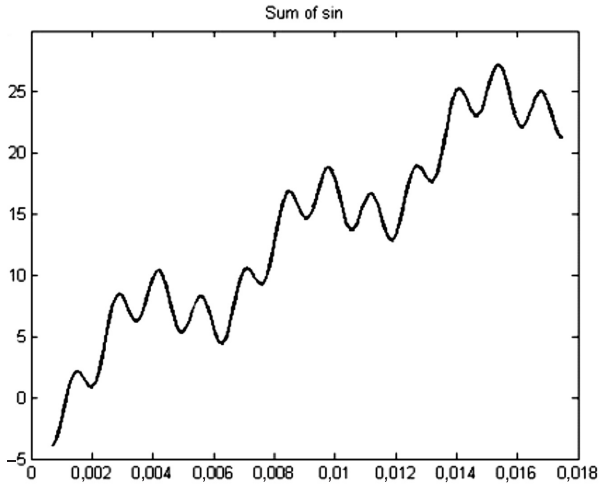


Рис. 6. Моделирование сигнала суммы двух синусоид и наклонной линии

$b_1 = \frac{\pi/4}{0,0007} = 1122$, $c_1 = -\frac{3\pi}{4} = -2,3562$. В соответствии с допущениями зададим начальное значение параметра a_1, например, $a_1 = 3$.

Частота второй синусоиды в четыре раза больше, чем у первой (по количеству волн в исходном сигнале), то есть $b_2 = 4 \cdot b_1 = \frac{\pi}{0,0007} = 4488$ и, подставив это значение в любое уравнение системы (2), получим $c_2 = -\frac{3\pi}{2} = -4,7124$.

Суммы двух синусоид и наклонной линии достаточно для получения аппроксимации требуемого сигнала (рис. 6).

Для моделирования реального сигнала изменения рыночных цен использование наклонной линии неприемлемо. Добавим синусоиду со следующими параметрами: $b_3 = \frac{b_2}{5} = \frac{\pi}{5 \cdot 0,0007} = 897,6$, $c_3 = -\frac{7\pi}{10} = -2,1991$. Результат представлен на рис. 7.

Данный результат более естественный, третья синусоида вносит отклонения от нормы, описанные у Эллиотта. В то же время, для построения идеальной волны Эллиотта достаточно двух синусоид.

Рассмотрим волны более высоких порядков. Из теории волн Эллиотта известно, что период волны самого нижнего уровня равен 2 мин, следующая волна с периодом в четыре раза больше, т. е. 8 мин, затем 32 мин и т. д. Параметры волн представлены в табл. 4.

В реальных котировках какой-либо валюты существует параметр Объем (Volume). Для рынка Форекс этот параметр показывает количество колебаний в единицу времени котировки. И для минутных котировок этот параметр отличается от единицы [3]. Следовательно, существуют волны ниже порядком (с большей частотой), чем волна первого порядка, описанная в табл. 4. Предположим, что существует еще как минимум один порядок ниже. Для идеальности волны Эллиотта его период должен быть в четыре раза меньше (а частота, соответственно, в четыре раза больше), чем у волны первого порядка, описанной в табл. 4, т. е. равен 30 с. В то же время период волны более низкого порядка составит 7,5 с (≈ 8 с.), что равно количеству отрезков ломаной волны Эллиотта. Два отрезка ломаной составляют одну волну Эллиотта, период которой равен 2 с (а частота, соответственно, 0,5 Гц). В результате целесообразно считать период минимальной волны Эллиотта 2 с. Таким образом, обновленная длительность волн Эллиотта представлена в табл. 5.

Данная таблица необходима для аппроксимации реального сигнала котировок валют с помощью суммы синусоид.

Приведенная модель соответствует четырем принципам циклов: суммирования, гармонизации, синхронизации и пропорциональности. Принцип пропорциональности заключается в

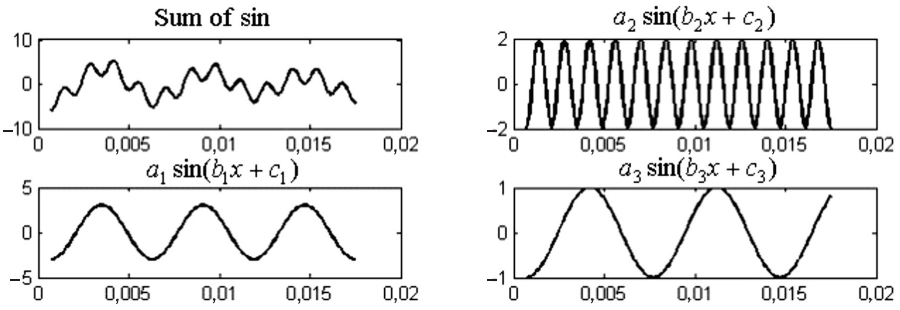


Рис. 7. Моделирование сигнала без наклона с помощью трех синусоид

Таблица 4

Длительность волн Эллиотта

Уровень	Минуты	Часы	Сутки	Месяцы	Годы	Частота, мГц
1	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,3333
2	8,0	0,1	0,0	0,0	0,0	2,0833
3	32,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5208
4	128,0	2,1	0,1	0,0	0,0	0,1302
5	512,0	8,5	0,4	0,0	0,0	0,0326
6	2 048,0	34,1	1,4	0,0	0,0	0,0081
7	8 192,0	136,5	5,7	0,2	0,0	0,0020
8	32 768,0	546,1	22,8	0,7	0,1	0,0005
9	131 072,0	2 184,5	91,0	3,0	0,2	0,0001
10	524 288,0	8 738,1	364,1	11,9	1,0	3,17891E-05
11	2 097 152,0	34 952,5	1 456,4	47,7	4,0	7,94729E-06
12	8 388 608,0	139 810,1	5 825,4	191,0	16,0	1,98682E-06
13	33 554 432,0	559 240,5	23 301,7	764,0	63,8	4,96705E-07
14	134 217 728,0	2 236 962,1	93 206,8	3 056,0	255,4	1,24176E-07
15	536 870 912,0	8 947 848,5	372 827,0	12 223,8	1 021,4	3,10441E-08

Таблица 5

Обновленная длительность волн Эллиотта

Уровень	Минуты	Часы	Сутки	Месяцы	Годы	Частота, мГц
1	0,03	0,0	0,0	0,0	0,0	500
2	0,13	0,0	0,0	0,0	0,0	125
3	0,53	0,0	0,0	0,0	0,0	31,25
4	2,13	0,0	0,0	0,0	0,0	7,8125
5	8,53	0,1	0,0	0,0	0,0	1,9531
6	34,1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,4883
7	136,5	2,3	0,1	0,0	0,0	0,1221
8	546,1	9,1	0,4	0,0	0,0	0,0305
9	2 184,5	36,4	1,5	0,0	0,0	0,0076
10	8 738,1	145,6	6,1	0,2	0,0	0,0019
11	34 952,5	582,5	24,3	0,8	0,1	0,0005
12	139 810,1	2 330,2	97,1	3,2	0,3	0,0001
13	559 240,5	9 320,7	388,4	12,7	1,1	2,98023E-05
14	2 236 962,1	37 282,7	1 553,4	50,9	4,2	7,45058E-06
15	8 947 848,5	149 130,8	6 213,8	203,7	17,0	1,86265E-06
16	35 791 394,1	596 523,2	24 855,1	814,9	67,9	4,65661E-07
17	143 165 576,5	2 386 092,9	99 420,5	3 259,7	271,6	1,16415E-07
18	572 662 306,1	9 544 371,8	397 682,2	13 038,8	1 086,6	2,91038E-08

том, чтобы период и амплитуду волны низшего порядка привести в соответствие с периодом и амплитудой волны более высокого порядка. Амплитуду возможно измерять в у. е., которым реальные котировки будут кратны. Таким образом, амплитуда второй синусоиды (коэффициент a_2) должна быть в четыре раза меньше амплитуды первой синусоиды (коэффициента a_1). При

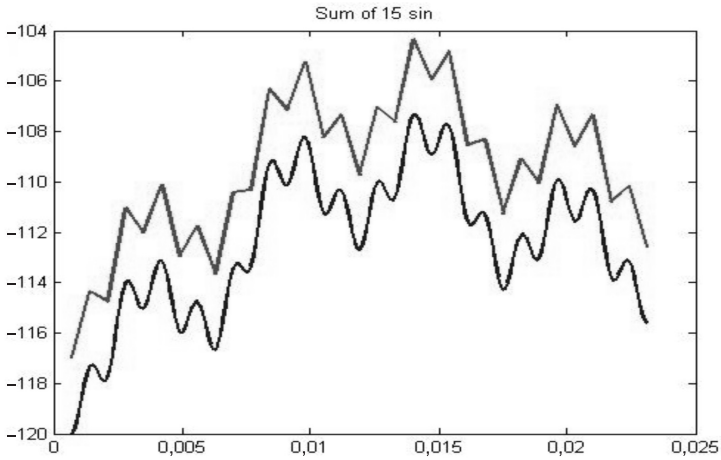


Рис. 8. Модель волны Эллиотта суммой пятнадцати синусов

такой зависимости коэффициентов *a*, колебания волн низших порядков станут малозаметными на высшей волне (у волны 15-го порядка амплитуда составит 1 073 741 824 у. е., а у волны первого порядка амплитуда 1 у. е.). В то же время, у волны 15-го порядка период ~1000 лет, а у волны первого порядка 2 с. Остальным принципам модель отвечает полностью. Принципу гармонизации отвечает идеальная волна Эллиотта. В реальности гармонизация волн маловероятна.

Сигнал, состоящий из сумы 15 синусоид, представлен на рис. 8.

Полученные результаты позволяют описывать реальные изменения цен.

Моделирование реальных изменений рыночных цен предлагается проводить по следующей схеме.

1. Простой перебор значений *a*, *b* и *c*. Можно применять любой метод: от метода наименьших квадратов, до генетических алгоритмов. Цель применения данного способа – в проверке гипотезы о том, что реальная цена состоит из цикличных составляющих и шума (не поддающегося аппроксимации сигнала), при установлении данного факта возможно предсказание движения цены с точностью до шума.

2. Для определения значений *a* и *b* использовать данные спектрограммы (например, с помощью анализа Фурье или вейвлетов). Цель такая же, как и в способе 1, отличается только способ поиска.

3. Использовать переменное значение, как минимум, параметра *b* (отвечающего за частоту сигнала) с течением времени. На вероятность правильности именно этого способа указывает различное значение параметра «Объем» котировок. Если частота составляющих сигналов была бы постоянной все время, то значения Объема также были бы постоянными. Разные значения Объема указывают именно на то, что в одно время количество колебаний больше, а в другое – меньше.

При первом способе аппроксимация котировок валют с помощью синусообразных сигналов будет сводиться к подбору таких коэффициентов *a*, *b* и *c*, при которых квадрат разности (или модуль разности) сигнала реальных котировок и аппроксимируемого сигнала будет минимален или равен нулю.

На текущем этапе проведенное исследование можно считать законченным.

В результате можно сделать следующие выводы.

Получены значения частоты двух синусоид, составляющих одну волну Эллиотта, с характеристиками 0,0021 Гц (одно колебание за 8 мин) и 0,0084 Гц (четыре колебания за 8 мин). Определены возможные частоты синусообразных сигналов до 15-го уровня

Для моделирования одной идеальной волны Эллиотта необходимо минимум два синусообразных сигнала с периодами, отличающимися в четыре раза.

Для моделирования идеальных волн Эллиотта с помощью суммы синусоид необходимо указать значения коэффициентов *a* для всех уровней и достаточно указать только один коэффициент *b* для начального уровня.

Определены потенциальные способы моделирования реального сигнала суммой синусоидальных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мастерство анализа волн Эллиотта [Текст]. –М.: ИК Аналитика, 2002. –348с.

2. Справочник по высшей математике [Текст]. –М.: АСТ, 2006. –992 с.

3. **Чех, К.Ю.** Волны Эллиотта в моделировании валютных рынков [Текст] / К.Ю. Чех, Л.П. Никитина // II Междунар. науч.-техн. конф. Аналитические и численные методы моделирования естественнонаучных и социальных проблем. Сб. статей. Секция 3: Математическое моделирование экономики. –Пенза. –2007 –С. 108–116.

УДК 004.021; 51.37

Л.А. Хворова

МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПОЧВЫ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Разработка математических моделей, корректно учитывающих процессы теплопереноса в почве, – сложная и актуальная задача. Соседствующие почвенные массивы (выделенные единицы управления в рамках одного поля) характеризуются различными теплофизическими величинами (параметрами), которые, в свою очередь, зависят от соотношения твердой, жидкой и газообразной составляющих, текстурных и структурных особенностей грунтов, состояния влаги и температуры.

Введение в технологию точного земледелия. Основные понятия

Точное (ориентированное) земледелие или локально специфическое – это эффективное, рациональное управление процессами роста растений в соответствии с их потребностями в питательных веществах и условиях произрастания с различной степенью дифференциации. Точное земледелие – это система хозяйствования на земле с использованием пространственно-дифференцированных технологий, опирающихся на применение новейших достижений в области информатики, моделирования и техники: компьютерных систем генерации агротехнологических решений, глобальных систем позиционирования (GPS), геоинформационных технологий (ГИС), новейших информационных технологий, современной сельскохозяйственной техники, управляемой бортовой ЭВМ, а также многофункционального программного обеспечения, позволяющего принимать оптимальные решения при управлении сельскохозяйственным предприятием [1, 2].

Урожайность сельскохозяйственной культуры на различных участках одного и того же поля, как правило, различна. На величину урожайности влияют: агрохимическое состояние почвы (обеспеченность растений элементами минерального питания в доступных формах, емкость почвенно-поглощающего комплекса, кислотно-щелочной баланс почвы и содержание в ней гумуса); гранулометрический состав и гидрофизические характеристики почвы; дозы и виды вносимых удобрений; рельеф местности; полезащитные лесополосы; качество семян (посадочного материала); технологии и сроки посева (посадки) и уборки урожая; защита растений от болезней и вредителей; погодные условия и многое др.

Сравнивая определенные характеристики полей с картами урожайности, можно выявить причины неравномерной урожайности сельскохозяйственной культуры на поле. Это связано в первую очередь с тем, что процесс получения продукции растениеводства реализуется в пространстве и во времени на конкретной территории, которая не является однородной даже в пределах одного поля. Ранее в практике отечественного земледелия сельскохозяйственное поле, как правило, принималось пространственно-однородным по большинству его характеристик. Передовые технологии точного земледелия предполагают динамическую оптимизацию при выполнении агротехнических операций для каждого однородного участка поля в зависимости от складывающихся агрохимических, агрофизических, фитосанитарных факторов. Другими словами, все технологи-

ческие операции, проводимые на поле, дифференцируются по участкам во времени с учетом погодных условий.

В этой связи одним из факторов, способствующих развитию производства продукции растениеводства, является использование информационных технологий, интеллектуальное ядро которых составляют динамические модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур, позволяющие учитывать пространственную неоднородность поля.

Модели в технологиях точного земледелия

В подавляющем большинстве современные модели, описывающие продукционный процесс сельскохозяйственных растений, рассматривают однородный фиктивный посев, а стратификация его характеристик производится в единственном вертикальном направлении. В подобных моделях расчет производится отдельно для каждой опорной точки поля с параметрами, характерными только для данного типа почвы. Все точки считаются независимыми друг от друга, но предполагается, что все окружение данной точки обладает теми же свойствами и, соответственно, никаких горизонтальных перетоков вещества и энергии не происходит [3].

Для целей точного земледелия горизонтальная неоднородность поля является важнейшим фактором, влияющим на выбор агротехники и определяющим результат хозяйствования. Учет взаимодействия динамики продукционного процесса на соседних участках неоднородного поля требует построения принципиально иной, более сложной многомерной модели агроландшафта. «Подобные разработки, несомненно, имеют огромную важность, однако вряд ли стоит ожидать в ближайшее время радикального прорыва в этом направлении, связанного с появлением конечных пользовательских программных продуктов широкого применения» [4].

Один из упрощенных вариантов решения данной проблемы предложен в [4]. Влияние разных участков посева друг на друга предполагается осуществлять в рамках системы поливариантных расчетов при условии поддержки ею механизма параллельных вычислений нескольких сценариев для одномерного случая. Общий принцип осуществления расчетов представлен на рис. 1 (заимствован из [4]).

Проблема состоит в том, что в плане расчета должны быть заранее определены точки схода, т. е. те значения общей для всех потоков динамической переменной – времени, в которые осуществляется информационный обмен между параллельными сценариями вычислений. В [4] рассмотрен простейший вариант определения точек схода – суточный шаг модели (обмен данными в модели между единицами управления также осуществляется раз в сутки). В момент достижения всеми потоками точки схода осуществляется обмен информацией между ними через сегмент общих данных.

Многомерная модель теплового режима почвы

Основная роль информационных технологий в системах точного (так же, как и традиционного) земледелия заключается в обосновании вида, параметров и сроков проведения технологических мероприятий по обработке почвы и уходу за посевами. Ясно, что решение о проведении очередного мероприятия должно приниматься на основе текущей информации о состоянии почвы и растительного покрова, а также учитывать его последствия на рост и развитие растений и, в ко-

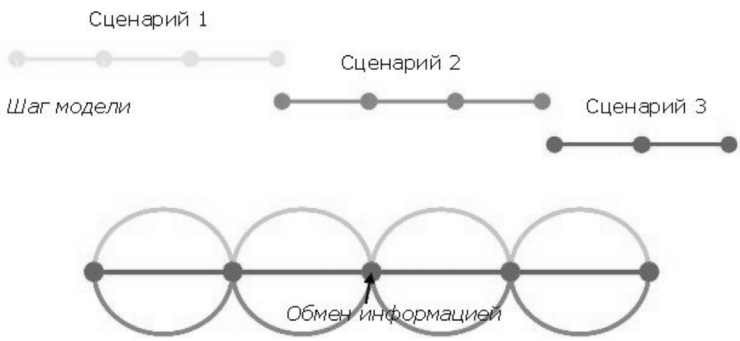


Рис. 1. Эмуляция многомерной модели агроландшафта в системе поливариантного анализа

нечном счете, на урожай. Существуют два принципиально различных способа получения такой информации: измерения и наблюдения, проводимые непосредственно на поле, и расчет с использованием той или иной модели. Очевидно, что измерение может быть источником данных только о текущем и прошлом состояниях управляемой системы, а для прогнозирования ее будущего поведения необходимо использовать те или иные математические модели.

Колебания температуры – важный компонент почвенного микроклимата. Температура почвы существенно влияет на многие протекающие в ней процессы [5]. С тепловым режимом почв тесно связаны начало и конец вегетационного периода, пространственное размещение растений, характер распространения корневых систем, скорость поступления к корням питательных веществ.

В рамках концепции пространственно-дифференцированных технологий точного земледелия рассмотрим трехмерную модель теплового режима почвы.

Математические модели, связанные с описанием явления теплопереноса в пределах почвенного компартмента, основаны на нестационарных трехмерных уравнениях параболического типа. Теплота, поступающая на поверхность почвы, под действием создаваемого градиента температур перераспределяется в объеме почвенного компартмента Ω.

Пусть $P = P(x, y, z)$ – точка почвенного компартмента Ω, $P \in \Omega \subset R^3$, $T(P,t)$ – температура в точке P почвенного компартмента в момент времени t, $t \in [0,T]$. Тогда уравнение теплопереноса в почвенном компартменте Ω можно записать в виде:

$$\rho\, c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\chi \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\chi \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\chi \frac{\partial T}{\partial z}\right) + f(x,y,z,t), \quad (1)$$

где $\rho(x,y,z)$ – плотность почвы; $c(w(x,y,z))$ – теплоемкость; χ – коэффициент теплопроводности, зависящий от влажности почвы w: $\chi = \chi(w(x,y,z))$. Теплоперенос осуществляется вдоль координатных осей O*x,* O*y,* O*z*; а $f(x,y,z,t)$ – функция источника тепла. Заметим, что влажность почвы w считается здесь заданной функцией.

Экспериментальные исследования показывают, что теплопроводность почвы возрастает с ростом влажности, достигая максимума при больших значениях влажности. В частности, связь теплопроводности и влажности почвы хорошо аппроксимируется квадратичной зависимостью вида [3]:

$$\chi(w) = c(w) \cdot (\lambda_1 (w - \lambda_4)^2 + \lambda_2 \rho + \lambda_3).$$

Коэффициенты $\lambda_i (i = \overline{1,4})$ в квадратичной зависимости для некоторых почв приведены, например, в [3].

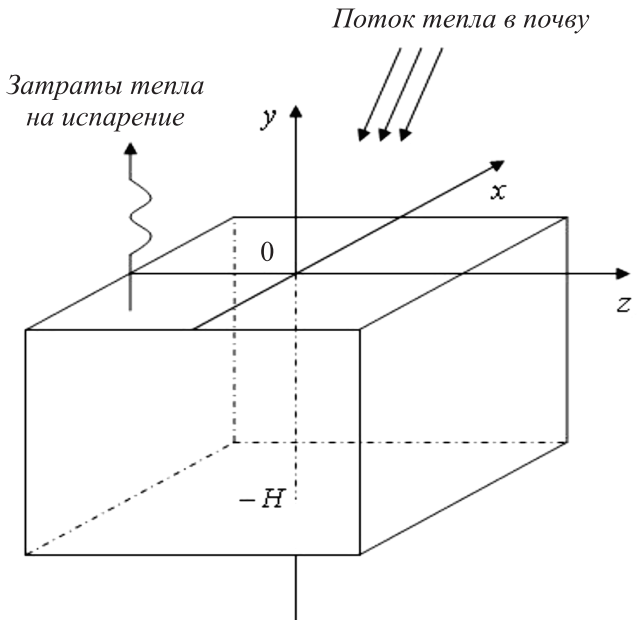


Рис. 2. Почвенный компартмент Ω

Искомая функция $T(P,t)$ должна удовлетворять начальным условиям

$$T(P,t)|_{t=0} = T(P,0) \text{ для } P \in \Omega \qquad (2)$$

и некоторым граничным условиям.

Нижняя граница помещается, как правило, на глубине, на которой температура полагается либо постоянной, либо зависящей от времени и точек границы известным образом. Следовательно, при $y = -H$ (на нижней плоскости почвенного компартмента Ω (рис. 2)) выполняется

$$T(-H,t) = \varphi_H(t). \qquad (3)$$

В качестве верхнего граничного условия следует записать соотношение, обеспечивающее «сшивание» решений задачи в почве и в приземном воздухе. Наиболее корректным представляется условие теплового баланса на поверхности почвы вида (условие третьего рода):

$$\chi \frac{\partial T}{\partial n} + \beta(T - T_a) = q(x,t). \qquad (4)$$

Здесь T – температура поверхности почвы; T_a – температура воздуха; $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$ – вектор внешней нормали к верхней границе деятельной поверхности почвы; $\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial x} n_1 + \frac{\partial T}{\partial y} n_2 + \frac{\partial T}{\partial z} n_3$; функция q задает тепловой поток в почву, затраты тепла на турбулентный перенос в атмосферу и на испарение и т. д.; β – коэффициент теплообмена с внешней средой.

Общее условие теплового баланса (4) на границе двух сред, в частности, на поверхности почвы, записанное в виде [3]:

$$\begin{aligned}(1 - A_s)\cdot Q(0) + \Delta F(0) = \\ = \rho_a c_p D^T_{\text{soil}}(T_0 - T_a(NL)) + \\ + \rho_a \theta \cdot D^q_{\text{soil}}(q_0 - q_a(NL)) + \\ + \frac{2}{h_0 + h_1}\chi_{0,1}(T_0 - T_1),\end{aligned} \qquad (4^*)$$

представляет собой разностный аналог соотношения (4). В его левую часть входят приходные статьи теплового баланса: баланс коротковолновой ($(1 - A_s)\cdot Q(0)$) и длинноволновой ($\Delta F(0)$) радиации; A_s – альбедо почвы. Слагаемые в правой части (4*) характеризуют затраты тепла на турбулентный перенос в атмосферу и на испарение (первое и второе слагаемые), а также поток тепла в почву (третье слагаемое). Здесь ρ_a – плотность воздуха; c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; D^T_{soil}, D^q_{soil} – коэффициенты проводимости тепла и паров воды; T_0, T_1 – температура верхних слоев почвы; $T_a(NL)$ – температура нижнего яруса посева, номер которого равен NL; θ – скрытая теплота парообразования; q_0 – концентрация паров воды в поровом пространстве почвы у поверхности; $q_a(NL)$ – удельная влажность воздуха; h_0, h_1 – высоты верхних слоев почвы; $\chi_{0,1}$ – теплопроводность верхнего слоя почвы. Заметим, что последнее слагаемое в (4*) представляет собой разностный аналог величины потока тепла на границе.

Численное решение задачи (1)–(4) можно найти при помощи метода стабилизирующей поправки [6, 7]. Разностная схема второго порядка аппроксимации для решения уравнения (1) может быть представлена в следующем общем виде:

$$\begin{aligned}\frac{T^{k+1/3} - T^k}{\Delta t} &= \Lambda_1 T^{k+1/3} + \Lambda_2 T^k + \Lambda_3 T^k + F^k, \\ \frac{T^{k+2/3} - T^{k+1/3}}{\Delta t} &= \Lambda_2 (T^{k+2/3} - T^k), \\ \frac{T^{k+1} - T^{k+2/3}}{\Delta t} &= \Lambda_3 (T^{k+1} - T^k),\end{aligned}$$

где Λ_i, $(i = 1, 2, 3)$ есть разностные аналоги соответствующих дифференциальных операторов ($\Lambda_i \sim \frac{\partial}{\partial x_i}(K \frac{\partial}{\partial x_i})$, $x_i = x, y, z$ для $i = 1, 2, 3$, соответственно). Правая часть F сформирована здесь после введения коэффициента температуропроводности K и последующего приведения (1) к дивергентному виду (см. следующую главу). Не останавливаясь подробно на реализации метода стабилизирующей поправки для решения трехмерной задачи, перейдем к изучению двумерной аппроксимации задачи о распределении температуры в массивах почвы, имеющих вертикальную (относительно направления силы тяжести) границу раздела, связанную с неоднородностью структурных пластов почвы.

Двумерная задача

Рассмотрим следующий вариант задачи (1)–(4). Пусть неоднородный почвенный компартмент Ω состоит из двух участков (рис. 3), значительно отличающихся по влиянию характеристик поля на продукционный процесс посева и на движение почвенных растворов (в действительности свойства почвы меняются от точки к точке непрерывно и случайным об-

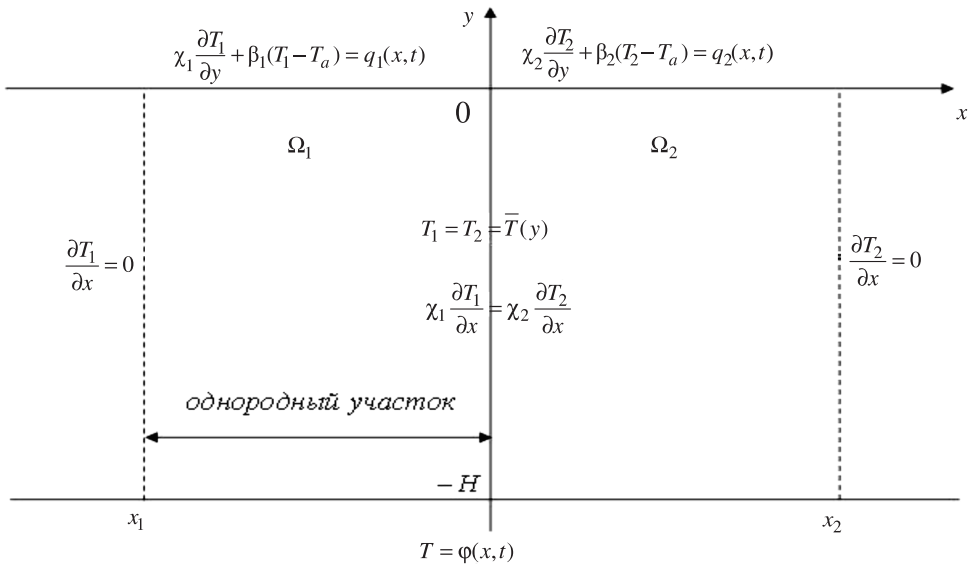


Рис. 3. Почвенный компартмент $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$

разом). Цель «размежевания» поля на единицы управления – уменьшение теоретически бесконечной вариабельности условий произрастания к ограниченному набору вариантов. Тогда $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$, где $\Omega_1 = \{-x_1 \le x \le 0; -H \le y \le 0\}$, $\Omega_2 = \{0 \le x \le x_2; -H \le y \le 0\}$. Здесь полагается, что границы участков Ω_1 и Ω_2 являются известными и прямолинейными. В случае криволинейных границ областей Ω_1 и Ω_2 задача также может быть сформулирована и успешно решена.

Пусть система координат выбрана таким образом, что ось $0y$ проходит по границе раздела областей Ω_1 и Ω_2. Функция T_1 определяет температуру почвы в области Ω_1, а T_2 – температуру почвы в области Ω_2. Тогда в силу почвенной однородности областей Ω_1 и Ω_2 можно записать условия:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = 0 \text{ при } x = -x_1; \qquad (5)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} = 0 \text{ при } x = x_2. \qquad (6)$$

На границе раздела компартментов Ω_1 и Ω_2 $(x = 0)$ должны выполняться условия непрерывности температур и тепловых потоков:

$$T_1 = T_2 \text{ и } \chi_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \chi_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \text{ при } x = 0. \qquad (7)$$

Уравнение (1) в двумерном случае будет иметь вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\chi \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\chi \frac{\partial T}{\partial y}\right) + f(x,y,t). \quad (8)$$

Численное исследование задачи о распределении температуры в областях Ω_1 и Ω_2 будет производиться с использованием конечно-разностных методов.

Введем коэффициент температуропроводности K: $K = \frac{\chi}{\rho c}$, который также будет функцией пространственных координат x, y, и перепишем уравнение (8) в следующем дивергентном виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \qquad (9)$$
$$+ \frac{K}{\rho c}\left[\frac{\partial(\rho c)}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c)}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right] + \frac{1}{\rho c} f(x,y,t).$$

Для численного решения уравнения (9), описывающего процесс теплопереноса, применяется численный метод, разработанный в [8, 9], с использованием продольно-поперечной конечно-разностной схемы (метод переменных направлений), формально имеющей второй порядок аппроксимации. Схема расчета записывается в следующем общем виде:

$$\frac{T^{k+\frac{1}{2}} - T^k}{0,5 \cdot \Delta t} = [K\,T_x]_x^k + [K\,T_y]_y^{k+1/2} + F^k, \qquad (10)$$
$$\frac{T^{k+1} - T^{k+\frac{1}{2}}}{0,5 \cdot \Delta t} = [K\,T_x]_x^{k+1} + [K\,T_y]_y^{k+1/2} + F^k.$$

Здесь

$$F = \frac{K}{\rho c}\left[\frac{\partial(\rho c)}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c)}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right] + \frac{1}{\rho c} f(x,y,t),$$

Δt – шаг по времени, $T^k = T(t_k)$, $t_k = k \cdot \Delta t$, $k = 1, 2, \ldots$.

Для реализации представленной схемы вводится равномерная разностная сетка (x_n, y_m) для каждой области Ω_i, $i = 1, 2$, следующим образом:

для области Ω_1 : (x_n, y_m), где

$$x_n = -x_1 + (n-1)h_1,\ n = 1, 2, \ldots, N_1,\ h_1 = \frac{x_1}{N_1};$$

$$y_m = -H + (m-1)h_y,\ m = 1, 2, \ldots, M,\ h_y = \frac{H}{M};$$

для области Ω_2 : (x_n, y_m), где

$$x_n = (n-1)h_2,\ n = 1, 2, \ldots, N_2,\ h_2 = \frac{x_2}{N_2};$$

$$y_m = -H + (m-1)h_y,\ m = 1, 2, \ldots, M,\ h_y = \frac{H}{M}.$$

Значение сеточной функции $T(x, y, t)$ в узлах сетки обозначим $T^k_{n,m} = T(x_n, y_m, t^k)$. При этом используется следующая разностная аппроксимация для входящих в (10) слагаемых:

$$[KT_x]_x \approx \overline{K}_{n+1}\frac{T_{n+1,m} - T_{n,m}}{h_x^2} - \overline{K}_n\frac{T_{n,m} - T_{n-1,m}}{h_x^2}.$$

Здесь

$$\overline{K}_{n+1} = K_{n+1/2,m},\ K_{n+1/2,m} = K(x_{n+1/2}, y_m),$$

$$x_{n+1/2} = x_n + 0{,}5h_x,\ h_x = h_1 \text{ или } h_x = h_2.$$

В результате требуется решить системы линейных алгебраических уравнений

$$-a_{n,m}T^{k+1/2}_{n,m-1} + b_{n,m}T^{k+1/2}_{n,m} - c_{n,m}T^{k+1/2}_{n,m+1} = d_{n,m},$$

$$-a_{n,m}T^{k+1}_{n-1,m} + b_{n,m}T^{k+1}_{n,m} - c_{n,m}T^{k+1}_{n+1,m} = d_{n,m},$$

соответствующие (10). Данные системы решаются методом прогонки. При этом в направлении y используется обычный вариант данного метода [10].

Граничные значения температуры T_1 и T_2 следуют из (3), (4).

Для определения T_1 и T_2 на слое $(k+1)$ мы используем условия непрерывности температур и тепловых потоков на границе раздела (7) и представление решения (т. е. температуры в каждой из областей) в таком виде, когда $(T_1)_{n,m}$ и $(T_2)_{n,m}$ выражаются через неизвестные значения температуры $(T_1)_{N_1+1,m} = (T_2)_{1,m}$ на границе раздела $x = 0$. Представления вида

$$T_{1n,m} = \beta^1_{n,m} + \gamma^1_{n,m} \cdot \overline{T}_m,$$

$$T_{2n,m} = \beta^2_{n,m} + \gamma^2_{n,m} \cdot \overline{T}_m,$$

где $\overline{T}_m$ – температура на границе раздела областей Ω_1 и Ω_2, позволяют организовать своеобразную прогонку с параметрами, которыми являются граничные значения температуры $\overline{T}_m$, и найти сначала сами эти значения, а затем и распределение температуры в областях Ω_1 и Ω_2.

Первые производные, входящие в (7), внутри расчетной области аппроксимируются традиционно симметричными конечно-разностными аналогами со вторым порядком. Первые производные на границах расчетной области аппроксимируются несимметричными конечно-разностными аналогами также второго порядка.

Общая схема численного решения задачи состоит в осуществлении следующих этапов.

1. Переход на новый временной слой t^{k+1} начинается с расчета температуры $T_1^{k+\frac{1}{2}}$ и $T_2^{k+\frac{1}{2}}$ на промежуточном временном слое $t^{k+\frac{1}{2}}$. Расчет производится в каждой из областей Ω_1 и Ω_2.

2. Затем, с помощью прогонки с параметрами вычисляются значения температур $T_i^{k+1}, i = 1, 2$, на слое (k+1) одновременно в обеих областях Ω_1 и Ω_2.

Отметим, что с использованием схемы (10) и введения итерационного параметра, может быть осуществлено вычисление распределения температуры в стационарном случае.

Создатели идеологии и техники «точного земледелия» исходили из широко известного постулата: на любом поле нет абсолютно похожих друг на друга квадратных метров. Они отличаются по твердости, влажности, содержанию микроэлементов и микроорганизмов. И в принципе, если мы хотим получить от поля максимальную отдачу и при этом сохранить уровень его плодородия и экологические показатели на многие годы, то и каждый квадратный метр нужно обрабатывать по особой технологии, с применением своего, сугубо индивидуального количества удобрений и индивидуальных агротехнических приемов. Большая роль в создании пространственно-дифференцированных технологий точного земледелия отводится информационным технологиям и точным динамическим имитационным моделям [1, 2]. Дальнейшее математическое и численное моделирование двумерных задач следует проводить с учетом криволинейности границ раздела, а также подвижных границ раздела двух фаз и постановки на этих границах условий сопряжения и обобщенных условий Стефана.

Работа выполнена в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (НИР 2.2.2.4/4278).

Автор выражает благодарность доктору физико-математических наук, профессору математического факультета Алтайского государственного университета Ольге Николаевне Гончаровой за плодотворные дискуссии по вопросам математического моделирования и численного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Якушев, В.П.** На пути к точному земледелию [Текст] / В.П. Якушев. –СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2002. –458 с.

2**. Якушев, В.П**. Оценка технологий точного земледелия: аналитический обзор [Текст] / В.П. Якушев, Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр [и др.] // Агрохим. вестник. –2002. –№ 3. –С. 36–40.

3. **Полуэктов, Р.А.** Динамические модели агроэкосистемы [Текст] / Р.А. Полуэктов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. –312 с.

4. **Полуэктов, Р.А.** Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур [Текст] / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев [и др.]. –СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2006. –396 с.

5. **Шеин, Е.В.** Курс физики почв [Текст] / Е.В. Шеин. –М.: Изд-во МГУ, 2005. –432 с.

6. **Марчук, Г.И.** Методы расщепления [Текст] / Г.И. Марчук. –М.: Наука, 1988. –264 с.

7. **Гончарова, О.Н.** Метод расщепления по физическим процессам для расчета трехмерных задач конвекции [Текст] / О.Н. Гончарова // Изв. АлтГУ. –2007. –№ 1(53). –С. 39–44.

8. **Самарский, А.А.** Разностные схемы с операторными множителями [Текст] / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич, П.П. Матус. –Минск: Изд-во ЗАО «ЦОТЖ», 1998. –442 с.

9. **Яненко, Н.Н.** Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики [Текст] / Н.Н. Яненко. –Новосибирск: Наука, 1967. –196 с.

10. **Самарский, А.А.** Методы решения сеточных уравнений [Текст] / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. –М.: Наука, 1978. –590 с.

УДК 004.942

С.В. Поршнев, М.К. Гребенкин

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТЕВОГО ТРАФИКА МАГИСТРАЛЬНОГО ИНТЕРНЕТ-КАНАЛА

Большинство исследовательских групп в области телекоммуникаций сходятся во мнении о самоподобии сетевого трафика. Эти свойства достаточно подробно изучены в ряде работ, выполненных в 90-х гг. XX в., например, в [1]. Однако с тех пор произошло радикальное изменение технических характеристик оборудования сети Интернет и предоставляемых сетевых сервисов. Во-первых, на несколько порядков увеличилась скорость передачи данных в магистральных каналах (от единиц Мбит/с до сотен Гбит/с). Во-вторых, качественно изменилась структура трафика: если раньше поток формировался за счет листания веб-страниц (неравномерная загрузка каналов), то сейчас основной вклад в объем трафика дают почти непрерывные потоки, такие, как P2P и просмотр видеоконтента [2]. Оба указанных фактора приводят к уменьшению бурстности трафика. Отметим также, что сегодня необходимо учитывать устанавливаемые провайдерами режимы ограничения скорости (теперь нет необходимости платить за скаченные объемы, и каждый пользователь имеет строго определенную верхнюю границу скорости), которые также приводят к сглаживанию суммарного потока [3]. Известен ряд современных работ, посвященных исследованию особенностей магистральных Интернет-каналов, авторам которых не удалось обнаружить самоподобные свойства сетевого трафика. Например, в работе [2] показано, что на больших отсчетах порядка нескольких секунд самоподобные свойства проявляются, а на более малых окнах агрегации данные свойства не наблюдаются и распределение сетевого трафика близко к распределению Пуассона.

Цель данного исследования – изучить актуальные (датированные текущим годом) образцы трафика, действующего магистрального Интернет-канала, а также изучить самоподобные свойства данного трафика, в т. ч. их зависимость

от величины окна агрегирования исходных временных рядов.

Постановка задачи

В настоящее время опубликовано достаточно большое количество работ, посвященных исследованию свойств Интернет-трафика, например, [4]. Однако при анализе временных рядов становится очевидным, что «качество» имеющихся у исследователей данных оказывает влияние на получаемые количественные оценки. Здесь одним из наиболее важных параметров является степень агрегирования исследуемых данных. Отметим, что современное сетевое оборудование ориентировано на получение усредненных отчетов за длительные временные периоды с минимальными затратами вычислительных ресурсов. В связи с этим многим исследователям приходится иметь дело с достаточно крупными временными отсчетами (десятки и сотни минут).

Необходимо решить задачу повышения детализации получаемых данных за счет отказа от использования стандартных отчетов о загрузке канала и перехвата реального трафика целиком с его последующей обработкой. Очевидно, что получить такие данные сложнее, т. к. необходимо обрабатывать значительные массивы данных (десятки и сотни гигабайт), передаваемых по современным высокоскоростным Интернет-каналам, и обеспечивать при этом сокрытие персональных данных конкретных пользователей, участвующих в процессе передачи данных.

В ходе проводимых исследований анализировались дампы сетевого трафика магистрального канала передачи между США и Японией, выложенные для свободного скачивания и изучения [5]. Дампы содержит информацию о пакетах, переданных в течение 15 мин в рассматриваемом Интернет-канале. Отметим, что данные образцы трафика не содержат сведений о пользователях сети Интернет, поскольку здесь реальные IP-адреса, первоначальное содержимое предаваемых пакетов, а также вся личная информация были заменены на случайным образом разыгранные данные. Однако структура трафика (размеры пакетов, их направление, протокол передачи) полностью сохранена и соответствует реальному трафику.

Анализ данных показал, что основная доля информации передается по протоколам TCP (≈ 90 %) и UDP(≈10 %). Это позволяет предположить, что свойства современного трафика обусловлены главным образом именно алгоритмами работы протокола TCP. Следовательно, можно ожидать, что полученные результаты позволят лучше понять работу основного протокола сети Интернет.

Методика

Для анализа данных использована методика, реализующаяся следующей последовательностью действий.

1. Разделение исходного дампа трафика с помощью утилиты tcpdump на файлы объемом 300 Мб каждый (разбиение исходных файлов размером 2–3 Гб вынужденное, связанное с тем, что дальнейшая обработка требует значительных объемов используемой оперативной памяти).

2. Выделение в исходном трафике входящего потока данных на маршрутизатор и исходящего потока данных из маршрутизатора. В таблице при-

Примеры данных о входящих и исходящих пакетах

Входящий пакет	Ethernet II, Src: Cisco_7c:b0:00 (00:16:9c:7c:b0:00), Dst: Cisco_e3:34:00 (**00:0e:39:e3:34:00**) Internet Protocol, Src: 20.37.84.141 (20.37.84.141), Dst: 205.37.159.220 (205.37.159.220) Transmission Control Protocol, Src Port: http (80), Dst Port: 31142 (31142), Seq: 1, Ack: 1, Len: **1448**
Исходящий пакет	Ethernet II, Src: Cisco_e3:34:00 (00:0e:39:e3:34:00), Dst: Cisco_7c:b0:00 (**00:16:9c:7c:b0:00**) Internet Protocol, Src: 204.45.100.103 (204.45.100.103), Dst: 147.114.12.197 (147.114.12.197) Transmission Control Protocol, Src Port: 51632 (51632), Dst Port: http (80), Seq: 1, Ack: 1, Len: **1460**

веден фрагмент данных из заголовков перехваченных пакетов. Из приведенного дампа видно, что несмотря на проведенную процедуру обезличивания трафика, в дампе присутствуют MAC-адреса магистральных маршрутизаторов (00:0e:39:e3:34:00 и 00:16:9c:7c:b0:00). Проверяя адреса назначения в каждом из пакетов, становится возможным разделение входящего и исходящего потока трафика.

3. Анализ с помощью пакета Wireshark полученных образцов трафика, формирование данных о размерах поступивших пакетов и времени их прибытия.

4. Перенос данных в математический пакет MATLAB и объединение полученных данных

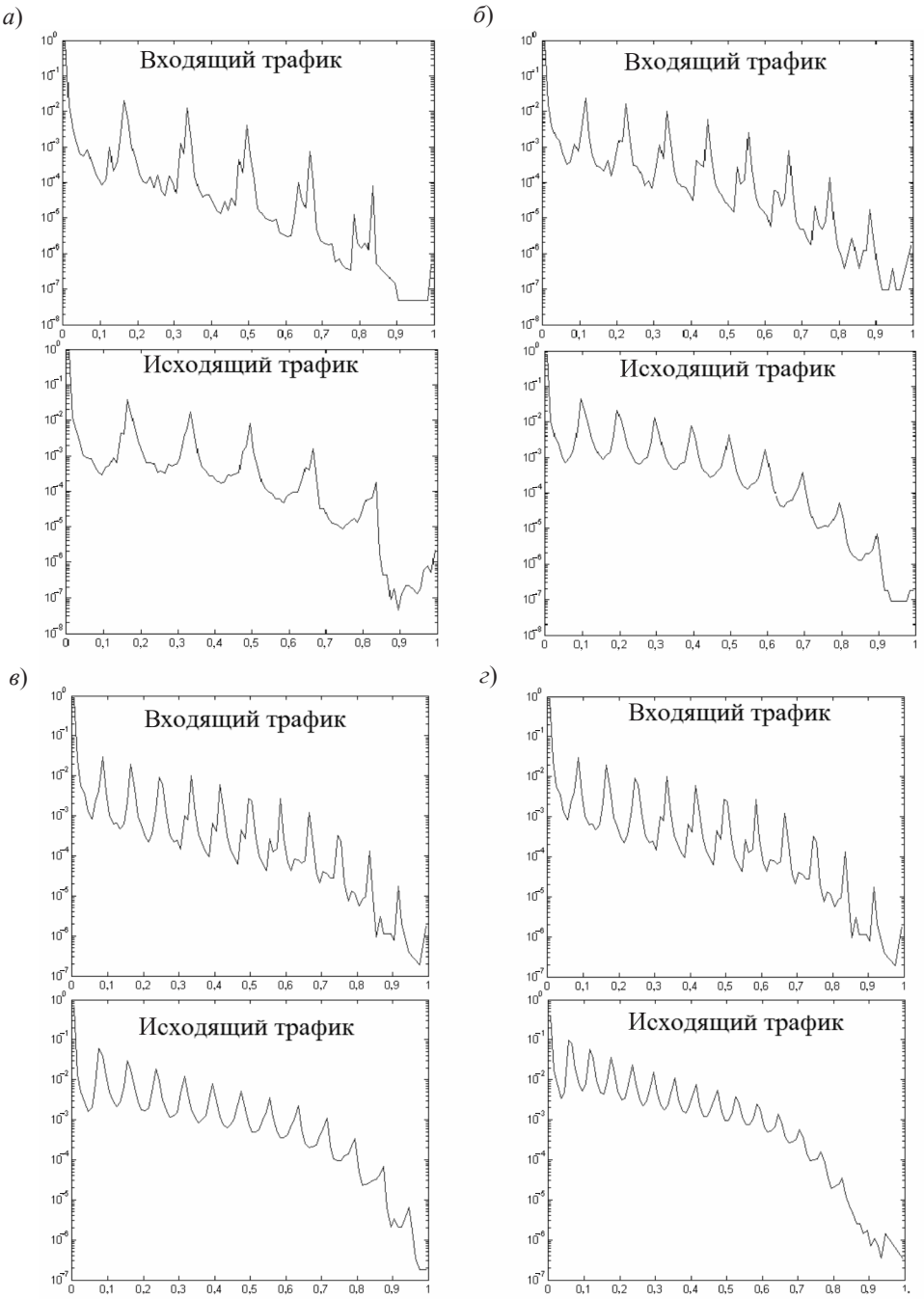


Рис. 1. Логарифм функции распределения нормированных временных рядов при различных размерах окна агрегации по времени:
а – 10 мкс; *б* – 20 мкс; *в* – 40 мкс; *г* –80 мкс

в два больших массива, содержащих информацию о мгновенных значениях объемов передаваемых данных в течение 900 с в каждом из двух направлений (дискретность отсчетов 10 мкс).

5. Агрегирование, т. е. усреднение данных по блокам заданной длины [6], содержащих значения объемов переданной информации в определенные интервалы времени (10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 и 1280 мкс).

6. Исследование статистических свойств и, в частности, выраженности самоподобия для каждого из полученных временных рядов.

Результаты расчетов

В ходе исследования были проанализированы дампы сетевого трафика, зарегистрированные 5–7 марта 2011 г. [5]. Аналогичные результаты получены для каждого из трех исследуемых дам-

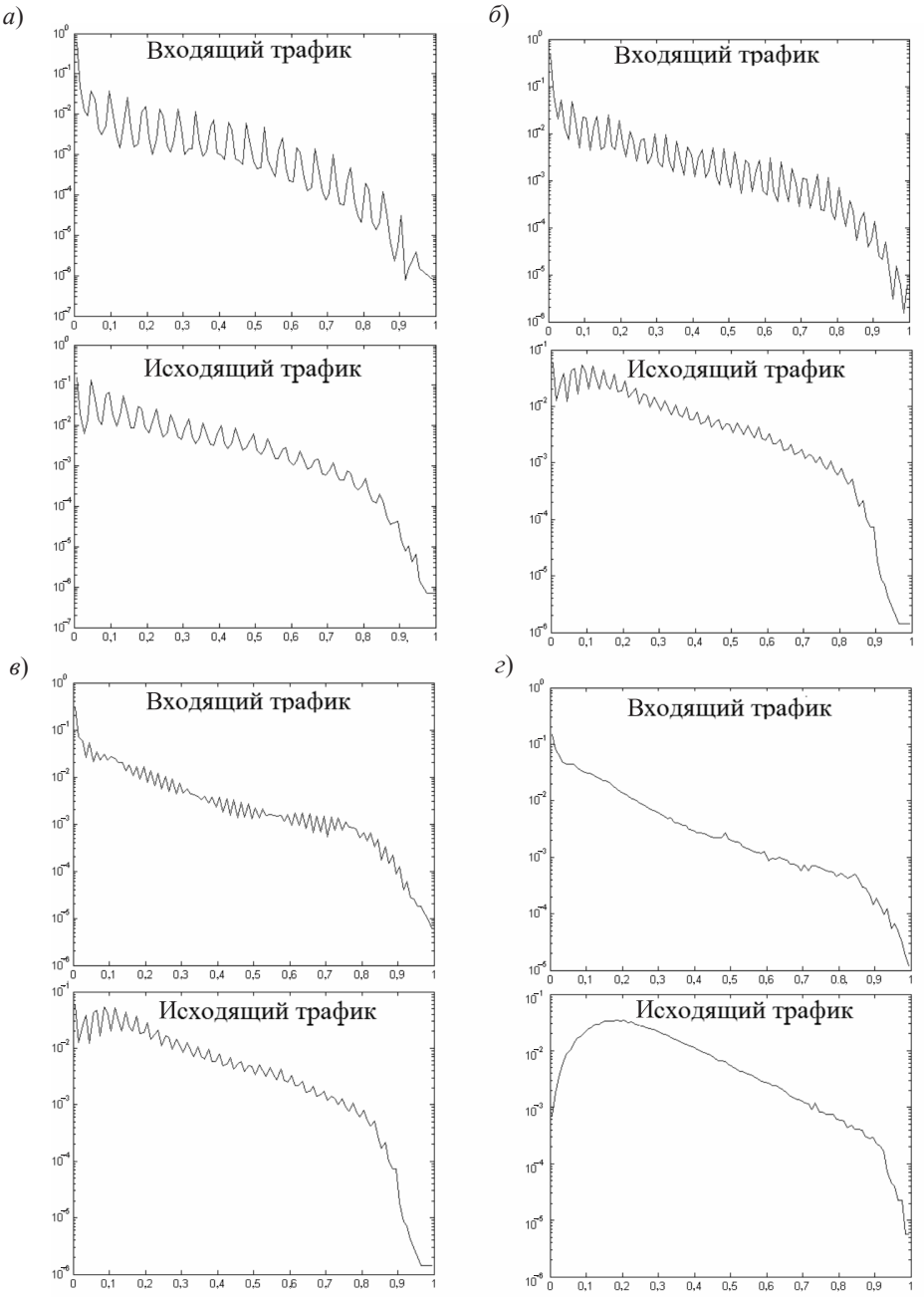


Рис. 2. Логарифм функции распределения нормированных временных рядов при различных размерах окна агрегации по времени:
а – 160 мкс; *б* – 320 мкс; *в* – 640 мкс; *г* – 1280 мкс

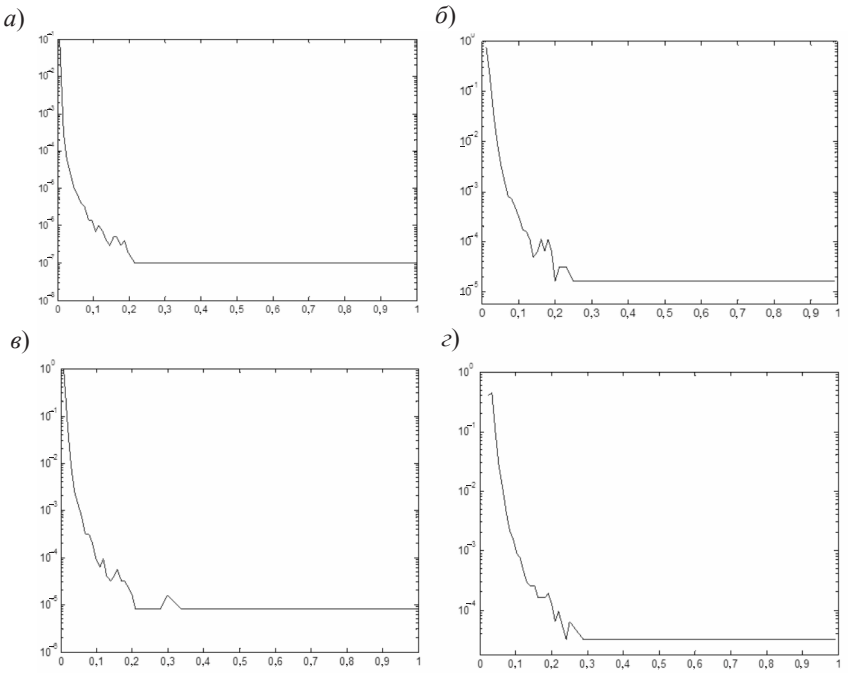


Рис. 3. Логарифм функций распределения случайного временного ряда с распределением Парето:
а – не агрегированный временной ряд; *б* – временной ряд с окном агрегации 10 отсчетов; *в* – временной ряд с окном агрегации 20 отсчетов; *г* – временной ряд с окном агрегации 40 отсчетов

пов трафика (длительности 15 мин, 900 000 отсчетов каждый).

Также были проанализированы временные ряды, содержащие информацию о мгновенных значениях объемов переданных данных, длительностью равной 1/10 от длительностей полных дампов (90 с, 90 000 отсчетов). Типичные реализации анализа функций распределения рассматриваемых временных рядов представлены на рис. 1 и 2.

Из рис. 1 и 2 видно, что функции распределения оказываются зависящими от размера окна агрегации. При увеличении размера окна агрегации происходит уменьшение вариаций функции распределения.

Функции распределения входящего и исходящего потоков трафика в целом подобны. Это подтверждает, в т. ч., правомерность работ [7–9], в которых авторы предложили выявлять возникновение сетевых аномалий Интернет-трафика на основе сравнения ряда количественных характеристик входящего и исходящего потоков (использование автокорреляционных функции, вейвлет-спектров и т. д.).

Чтобы определить, при каком окне агрегирования функция распределения принимает наиболее стабильную форму, использовались стандартные методы оценки [10]. Для количественного описания зависимостей, приведенных на рис. 1 и 2, было проведено исследование возможности аппроксимации данных полиномами 2–7 степеней. При этом оказалось, что наименьшую дисперсию остатков имеют полиномы 5 степени. Из рис. 1 и 2 видно, что флуктуации логарифма функции распределения (среднеквадратические отклонения остатков полинома 7 степени) уменьшаются при увеличении размера окна агрегации. При окне агрегации равном 1280 мкс отношение СКО остатков к общей энергии временного ряда (для исходящего потока трафика) оказывается равным $3{,}9 \cdot 10^{-3}$. Видно, что при задании параметров источника Интернет-трафика в ходе его моделирования на временных интервалах более 1 мс наблюдаемые флуктуации функции распределения можно не учитывать.

Проведено сравнение статистических свойств временного ряда, описывающего передачу реального Интернет-трафика, и случайного временного ряда, имеющего распределение Парето (рис. 3).

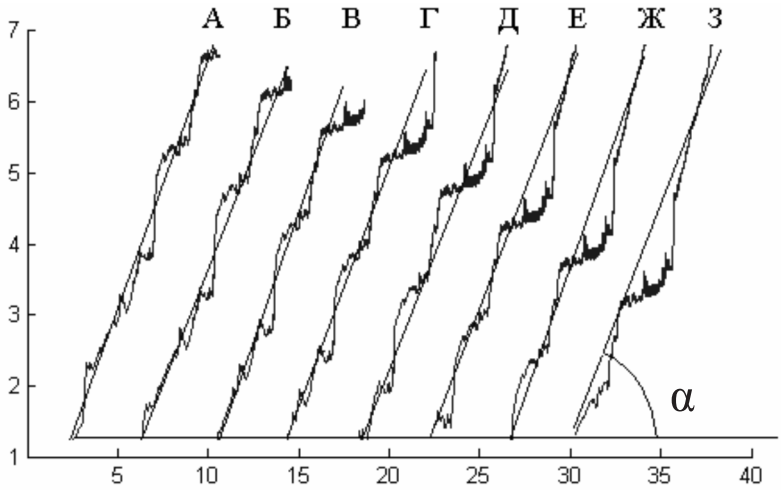


Рис. 4. Зависимость $\log\delta(\Delta X) = f(\log|\Delta t|)$, вычисленная по всей длине каждого из анализируемых временных рядов
Варианты окна агрегации: А – 10 мкс, Б – 20 мкс, В – 40 мкс, Г – 80 мкс, Д – 160 мкс, Е – 320 мкс, Ж – 640 мкс, З – 1280 мкс

Из сравнения рис. 1 и 2 с данными, представленными на рис. 3, можно сделать вывод о том, что свойства функций распределения рассматриваемых временных рядов оказываются существенно отличными друг от друга.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующий важный вывод: Интернет-трафик магистрального канала имеет распределение отличное от распределения Парето. Следовательно, для описания современных высокоскоростных каналов передачи данных требуется привлечение новых математических моделей (например, жидкостной модели [11]), а также идентификация этих моделей и оценка их адекватности на основе экспериментальных данных.

Наличие временных реализаций реального Интернет-трафика позволили провести проверку распространенной гипотезы о возможности описания Интернет-трафика в рамках нелинейной динамики [6]. Для этого, используя зависимости $\log\delta(\Delta X) = f(\log|\Delta t|)$ (рис. 4), были получены оценки значений показателя Херста для различных размеров окна агрегации. (Значение показателя Херста здесь определялось как тангенс угла наклона прямой, аппроксимирующей зависимость $\log\delta(\Delta X) = f(\log|\Delta t|)$. Оказалось, что полученные значения показателя Херста, изменяющиеся в диапазоне 0,7÷0,8, не зависят от окна агрегации. Следовательно, анализируемые временные ряды являются самоподобными.

Таким образом, проведенный анализ статистических свойств реального трафика магистрального Интернет-канала (США–Япония) позволил сделать следующие выводы.

Статистические свойства входящего и исходящего трафиков оказываются подобными.

Распределение значений объемов переданной информации в заданный интервал времени описывается функциями, отличными от распределения Парето.

Самоподобные свойства сетевого трафика магистральных Интернет-каналов сохраняются при различных размерах окна агрегации данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Городецкий, А.Я.** Фрактальные процессы в компьютерных сетях: Учеб. пособие. [Текст] / А.Я. Городецкий, В.С. Заборовский. –СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. –102 с.

2. **Gupta, H.** Modeling, Analysis & Simulation of Computer and Telecommunication Systems [Текст] / H. Gupta, A. Mahanti, V.J. Ribeiro // IEEE International Symp. – London ACM, 2009.– P. 1–10.

3. **Поршнев, С.В.** К выбору допустимого размера всплеска в режиме обеспечения гарантированной скорости доступа к сети Интернет [Текст] / С.В Поршнев, М.К. Гребенкин // Естественные и технические науки. –М.: Спутник-Плюс, 2010. –№ 6. –С. 475–480.

4. **Гуда, А.Н.** Модели оценки параметров телекоммуникационного трафика в автоматизированных информационно-управляющих системах [Текст] / А.Н.

Гуда, М.А. Бутакова, Н.А. Москат // Вопросы современной науки и практики. –М.:Ун-т имени В.И. Вернадского, 2010. –№ 4–6(29). –С. 71–87.

5. MAWI Working Group Traffic Archive [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://mawi.wide.ad.jp/mawi/

6. **Шелухин, О.И.** Моделирование информационных систем [Текст] / О.И. Шелухин, А.М. Тенякшев, А.В. Осин. –М.: Радиотехника, 2005. –368 с.

7. **Афонцев, Э.В.** Опыт построения методик обнаружения вирусной сетевой активности [Текст] / Э.В. Афонцев, С.В. Поршнев // Вестник УГТУ-УПИ. 50-летие радиотехнического образования на Урале. Сер. Радиотехническая. –Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. –№20 (50). –С. 215–217.

8. **Афонцев, Э.В.** Изучение свойств самоподобия временных рядов в задаче обнаружения аномального сетевого трафика [Текст] / Э.В. Афонцев, С.В. Поршнев // Науч. тр. VIII отч. конф. ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. Сб. статей. –Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. –Ч.1. –С. 381–382.

9. **Афонцев, Э.В.** Спектральные свойства аномального Интернет-трафика [Текст] / Э.В. Афонцев, С.В. Поршнев // Информационные технологии. –2006. –№12. –С. 66–69.

10. **Поршнев, С.В.** Компьютерный анализ и интерпретация эмпирических зависимостей: Учебник [Текст] / С.В. Поршнев, Е.В. Овечкина, М.В. Мащенко [и др.] // –М.:ООО «Бином-Пресс», 2009.–336 с.

11. **Liu, Y.** Fluid Models and Solutions for Large-Scale IP Networks [Текст] / Y. Liu [etc.] // SIGMETRICS. Performance Evaluation Review. –NY: ACM, 2003.– Vol. 31. –Iss. 1. –P. 91–101.

УДК 519.876.5

С.Б. Коныгин

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ВЕРОЯТНОСТНОГО КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ

В связи с бурным развитием вычислительной техники в последнее время все большее внимание привлекают к себе методы прямого имитационного моделирования различных процессов на атомно-молекулярном уровне. Сюда можно отнести, например, известные методы ab initio или молекулярной динамики, позволяющие решить ряд важных практических задач, недоступных традиционным подходам статистической физики [1]. Однако здесь существует проблема одновременного учета в модели разнородных физико-химических процессов (ФХП) (например, проблема учета химических реакций в методе молекулярной динамики). Для решения указанной проблемы предложен новый вариант метода вероятностного клеточного автомата (ВКА) [2], моделирующего физико-химические процессы путем прямой имитации элементарных актов перестройки атомно-молекулярной структуры конденсированных сред [3–5].

Согласно базовому принципу предложенного метода микроструктуре моделируемой системы ставится в соответствие сетка ячеек ВКА. Частицам ставятся в соответствие состояния ячеек $\boldsymbol{S}$, а случайным процессам перестройки – переходы $\boldsymbol{J}$ ячеек между состояниями [3]:

$$\boldsymbol{S} = \{\hat{Z}, \hat{A}, \hat{B}, ...\}\,, \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{J} = \{(\hat{Z}, \hat{A}), (\hat{Z}, \hat{B}), (\hat{A}, \hat{B}), ...\}\,. \qquad (2)$$

Случайные переходы на каждом шаге моделирования реализуются с вероятностями $\boldsymbol{W}$, определяемыми на основании базовых физических принципов (например, термоактивационные, квантовомеханические) [3]:

$$\boldsymbol{W} = \{w_{ZA}, w_{ZB}, w_{AB}, ...\}\,. \qquad (3)$$

Прямое имитационное моделирование переходов осуществляется с помощью генератора случайных чисел. Интегральные параметры системы, необходимые для дальнейшего использования, определяются путем статистической обработки состояний ячеек ВКА [3].

В связи с тем, что моделирование проводится на атомно-молекулярном уровне рассмотрения, неизбежно возникает вопрос о возможностях и ограничениях данного метода. Поэтому настоящая статья посвящена краткому рассмотрению

некоторых основных возможностей и ограничений предлагаемого варианта метода ВКА. Сводные данные по ним представлены в табл. 1.

Обзор возможностей предлагаемого метода ВКА начнем с пространственно-временных характеристик моделируемых систем. Ограничение сверху размеров системы и временного интервала моделирования накладывается только быстродействием компьютера. Оценка временных затрат на моделирование дается выражением

$$\tau \sim N_x N_y N_z N_\tau N_{\text{комп}} N_{\text{фхп}} N_{\text{св}}^2, \qquad (4)$$

где N – количество; индексы: x, y, z – ячеек ВКА в соответствующих измерениях, τ – шагов ВКА, комп – химических компонентов, св – возможных взаимовлияний между компонентами.

В качестве примера в табл. 2 представлены результаты тестирования скорости моделирования для некоторых физико-химических систем. Тестирование проводилось с помощью разработанного программного продукта на компьютере Pentium Core 2 Duo 2,67 ГГц с 2 Гб ОЗУ. Разброс представленных скоростей моделирования связан с особенностями реализации программного продукта и статистической обработкой результатов в режиме реального времени. Также на рис. 1 приведен пример зависимости скорости моделирования от размеров системы.

Таблица 1

Основные возможности и ограничения предлагаемого метода ВКА

Параметры моделируемого объекта	Возможности	Ограничения
Пространственный масштаб	Микроскопические объекты или фрагменты макрообъектов с размерами порядка 1 мкм	Накладываются временными затратами на процесс моделирования и флуктуациями параметров системы
Временной масштаб	Быстропротекающие процессы с временами порядка 10^7 шагов ВКА	
Компонентный состав	Молекулы, атомы, ионы, радикалы	Сложность представления макромолекул и полимеров
Представительство физико-химических процессов	Любые атомно-молекулярные процессы перестройки структуры и изменения химического состава	Невозможность моделирования молекулярно-кинетических явлений, теплообмена, конвекции, деформаций, движения тела как целого
Агрегатное состояние	Твердое тело, жидкость	Газовая фаза представляется как единый объект, обменивающийся частицами с ячейками ВКА
Гетерогенность	Межфазные границы микроскопического масштаба, в т. ч. микропористые	Невозможность анализа макроскопического движения границ или их частей, поверхностного натяжения
Наличие дефектов	Вакансии, междоузельные атомы, дислокации, границы зерен	Невозможность описания макроскопических трещин, включений, пустот, пор
Наличие силовых полей	Внешние и внутренние электрические, механические	Характерное время изменения параметров полей должно быть существенно больше шага ВКА

Таблица 2

Результаты тестирования скорости моделирования некоторых физико-химических систем методом ВКА

Решаемая задача	Характерный размер системы	Количество		Средняя скорость, шаг/с
		Компонентов	Процессов	
Двухкомпонентная адсорбция	0,038 мкм	2	2	700–1000
Газовая коррозия металлов		3	4	
Диффузионное легирование		2	1	

Практика моделирования показывает, что пространственно-временных возможностей метода ВКА вполне достаточно для решения многих практических задач (например, вычисление параметров фазовых равновесий, оценка скорости коррозионных процессов и т. д.).

При рассмотрении систем на микроскопическом уровне также имеется ограничение размера снизу. Оно обусловлено тем, что при уменьшении размеров системы и, следовательно, количества частиц $N_ч$, в ней возрастают флуктуации параметров системы. Оценка флуктуаций физической величины a дается статистической физикой в виде [6]:

$$\delta a \sim \frac{1}{\sqrt{N_ч}}. \qquad (5)$$

Это означает, что в случае очень малых размеров системы уровень флуктуаций возрастает настолько, что говорить об определенных значениях интегральных параметров не представляется возможным. В качестве примера на рис. 2 представлена зависимость флуктуаций от количества частиц для конкретной системы.

Так как в предлагаемом методе моделируются случайные перестройки атомно-молекулярной структуры, то одновременно может учитываться достаточно широкий спектр компонентов (включая ионы, радикалы и т. п.) и элементарных процессов. Существенные сложности здесь могут возникнуть при необходимости одновременного моделирования частиц, сильно различающихся по размерам. Ограничения химического состава X_i системы определяются флуктуациями термодинамических параметров (5) и погрешностями оценки мольных долей:

$$\delta X_i \sim \frac{1}{N_i}, \qquad (6)$$

где i – номер химического компонента.

В рамках метода могут моделироваться ФХП, которые можно формально описать в терминах элементарных атомно-молекулярных перестроек. К ним, прежде всего, можно отнести адсорбцию, десорбцию, испарение, конденсацию, диффузию, химические реакции, ионизацию и т. д. Указанные элементарные ФХП являются основой многих практически важных процессов (например, технологических процессов создания микроэлектронных устройств, химической технологии, коррозионных процессов и т. д.). Однако из рассмотрения выпадают большие группы процессов,

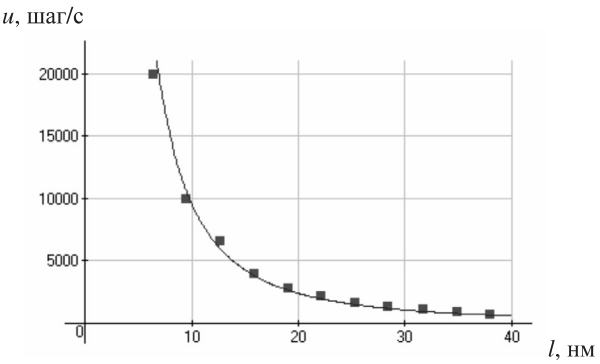


Рис. 1. Зависимость скорости моделирования процессов двухкомпонентной адсорбции от характерных размеров системы

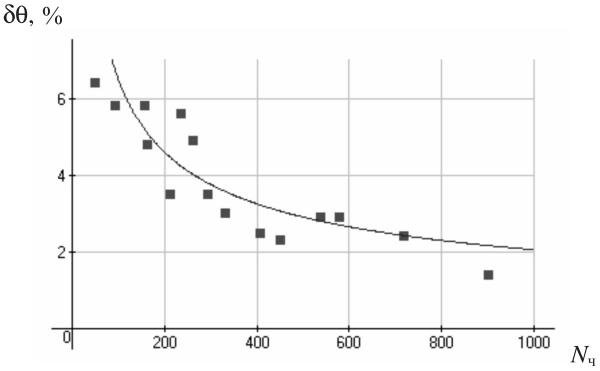


Рис. 2. Зависимость флуктуаций степени заполнения поверхности от количества частиц в системе для серии вычислительных экспериментов для однокомпонентных адсорбционных процессов
Точки – метод ВКА, линия – уравнение (1)

связанных с тепловым движением частиц (без выхода из потенциальных ям), конвекцией, упругими деформациями, движением тел как единого целого, т. к. они не могут быть сведены к элементарным атомно-молекулярным перестройкам.

В силу заложенного базового принципа случайных перестроек непосредственному моделированию доступны только конденсированные фазы и межфазные границы. Газовая фаза рассматривается как бесконечный резервуар, являющийся источником изменений микроструктуры объекта за счет процессов адсорбции-десорбции (испарения-конденсации). Ее параметры входят в исходные данные для расчета вероятностей указанных процессов.

При моделировании ФХП методом ВКА естественным образом может быть учтен ряд дефектов кристаллической структуры. Вакансиям соответствуют пустые ячейки ВКА, а для учета междоузельных атомов необходимо введение второй подсетки ячеек. Кроме того, дефекты могут быть учтены путем локальных изменений энергий активации ФХП (например, изменением локального значения энергии активации для диффузии по границам межкристаллитных зерен).

С помощью предлагаемого метода ВКА можно проанализировать влияние силовых полей различной природы на кинетику ФХП. Как правило, их учет сводится к внесению поправок к энергии активации элементарных актов перестройки структуры. Это полезно, например, при моделировании электрохимических процессов.

Предлагаемый вариант метода ВКА может использоваться для моделирования ФХП, являющихся результатом протекания большого количества элементарных актов перестройки атомно-молекулярной структуры.

Возможности метода позволяют решать с его помощью ряд практически важных задач, связанных с определением равновесных и кинетических параметров для гомогенных и гетерогенных систем.

В статье также очерчен круг задач, решение которых в рамках предлагаемого метода ВКА не представляется возможным из-за принципиальных или технических ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Метод молекулярной динамики в физической химии. –М.: Наука, 1996. –334 с.

2. **Ванаг, В.К.** Исследование пространственно распределенных динамических систем методами вероятностного клеточного автомата [Текст] / В.К. Ванаг //Успехи физических наук. –1999. –Т. 169. –№ 5. –С.481–504.

3. **Агафонов, А.Н.** Разработка физических принципов и алгоритмов моделирования базовых процессов формирования микроструктур методами вероятностного клеточного автомата [Текст] / А.Н. Агафонов, А.В. Волков, С.Б. Коныгин [и др.] // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. –2007. –№ 1. –С.99–107.

4. **Коныгин, С.Б.** Стохастическая модель окисления металлов в газовой среде [Текст] / С.Б. Коныгин, С.П. Лесухин // Изв. Самарского научного центра РАН. –2010. –Т. 12. –№ 1 (2). –С.377–380.

5. **Коныгин, С.Б.** Моделирование двумерных фазовых переходов в адсорбционных слоях [Текст] / С.Б. Коныгин // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. –2011. –№ 1 (29). –С.238–241.

6. **Ландау, Л.Д.** Статистическая физика. Ч.1. [Текст]/ Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. –М.: Наука, 1976. –584 с.

УДК 004.942

Е.М. Лазарев, К.А. Аксёнов

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЕЙ

Усложнение задач управления развитием территории города, хозяйственными процессами и комплексами объектов привело к необходимости обеспечения в городах сбора и обработки достоверной информации об объектах, размещенных на территории, в совместимых и взаимосвязан-

ных базах данных. Так, актуальными являются задачи информационного обеспечения процессов эксплуатации зданий и инженерных коммуникаций, процессов строительства и реконструкции кварталов, обеспечения рынка объектов недвижимости достоверной информацией об условиях использования земельных участков и их состоянии, состояния системы жизнеобеспечения города. Без привлечения информационных технологий эти и другие задачи повышения эффективности управления городской территорией становятся неразрешимыми. Трудно обеспечить информацией и перспективные технологии оформления документов в городе по принципу «одного окна».

Во многих городах городские службы овладели основами геоинформационных технологий. Созданы цифровые карты разных масштабов. Однако вследствие большого объема данных, отображаемых на этих картах, процесс их ввода в компьютеры и дежурства является весьма затратным как по времени, так и по финансам и неосуществим силами одной организации. Некоторая важная информация вообще не требует своего геодезически точного отображения на карте, что позволяет вводить ее даже нелицензированным организациям (например, маршруты городского транспорта).

Очень сильно усложняют процессы доступа разных организаций к единым картографическим ресурсам требования секретности картографической информации, что не позволяет в обозримом будущем надеяться, что все заинтересованные организации города смогут работать с цифровой картой в рамках единой компьютерной сети [1].

Но растущие объемы географических данных становятся бесполезными без наличия возможности качественного анализа. Именно анализ позволяет получить новые данные, которые сложно получить без его использования. В проведенном обследовании задач аналитической обработки пространственных данных выявился ряд схожих задач более низкого уровня, которые могут быть решены отдельно, и композиция которых может дать решение задачи более высокого уровня, на котором и ставится для системы задача от пользователя.

Базовый случай. Для начала рассмотрим базовый случай аналитического поиска. Используя результаты обследования органов администрации города, было выделено несколько базовых задач аналитической обработки пространственных данных. В таблице приведено соответствие базовых задач используемым пространственным операциям, определенным стандартами OGC [2].

Видно, что фактически круг используемых алгоритмов невелик для решения базового набора задач и, следовательно, можно спроектировать реализацию, способную обеспечить решение обозначенного круга задач.

Создание прототипа. Для проектирования прототипа проведено обследование существующих открытых проектов с целью выявления возможности повторного использования подходов и методов для реализации прототипа системы аналитического поиска пространственной информации. Использование уже существующих открытых проектов позволит снизить время и стоимость разработки, а также избежать возможных ошибок и недоработок. Среди фаворитов геопространственной обработки данных было выделено несколько продуктов:

Geoserver;
GeoTools;
Google Earth;
PostGIS;
OpenStreetMap;
QuantumGIS.

Архитектура. При проектировании системы нельзя обойти вниманием такой сильный продукт, как OpenStreetMap (OSM). В своей функциональности он способен решать множество аналитических и повседневных задач.

Одно из наиболее продвигаемых направлений – навигация. На сегодняшний день множество производителей навигационных устройств используют данные OSM. Созданы конверторы в популярные форматы хранения и обработки пространственных данных [3]. Отличительная особенность OSM – собственная структура хранения данных, отличная от принятой рекомендации Then Open Geospatial Consortium (OGC). Атомарными данными приняты вершины, ребра, связи, таблица семантических данных и др. [4]. В результате обеспечивается топология объектов (пространственные отношения объектов) и оптимизируется хранение данных, т. к. вершины и ребра смежных объектов не дублируются. Но использовать данные OSM необходимо с осторожностью, поскольку они могут быть ложными, а верификация производится при помощи заданных шаблонов автоматизированными программными роботами и пользователями системы. Нужно внимательно подбирать используемые источники данных, чтобы полученные данные удовлетворяли критериям точности. Так, скорее всего, для задач, связанных с анализом маршрутов передвижений и дорожной сети, данные, полученные из OSM, вполне пригодны, т. к. по-

Декомпозиция задач пространственного анализа данных

Задачи	Атомарные задачи									
	Сложение	Вычитание	Пересечение	Содержит	Содержится в	Касание	Буферная зона	Выпуклая оболочка	Расстояние до точки	Площадь фигуры
Расчет минимального расстояния от заданных объектов учета до объектов инфраструктуры города	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-
Поиск объектов учета, удовлетворяющих заданным критериям пространственных отношений	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Поиск объектов учета, нарушающих заданные нормы пространственных отношений	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-
Визуализация статистических данных	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
Расчет пространственных зон	+	+	+	-	-	-	+	+	-	+
Расчет оптимальных маршрутов	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Расчет нагрузки на транспортную инфраструктуру	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+
Расчет показателей по территории города	+	+	+	-	-	-	+	+	-	+
Расчет зон распределения показателя по территории города	+	+	+	-	-	-	+	+	-	+

лучены на основании загруженных маршрутов из навигационных устройств, записанных в автоматическом режиме, и возможные погрешности и ошибки не столь существенные, как, например, для задач расчета площадей и проектирования строительства. Поэтому для комплексного анализа пространственных данных необходимо комбинировать источники данных, выбирая более подходящие для конкретных задач.

Второй тип источников пространственных данных основан на реализации стандартов OGC. Это достаточно широкий круг источников, т. к. данные стандарты приняты на международном уровне и существуют редакции International Organization for Standardization (ISO). Стандарты рекомендуют хранить данные, используя реляционную структуру, в которой пространственные данные делятся на слои, каждый слой представлен реляционной таблицей, а запись в такой таблице представляет пространственный объект. В СУБД вводятся новые типы данных Geometry и Geography и реализуются функции и методы для их обработки. В результате создается как бы расширение реляционной модели данных и появляется возможность использования уже созданных методов обработки табличных данных для обработки пространственных данных.

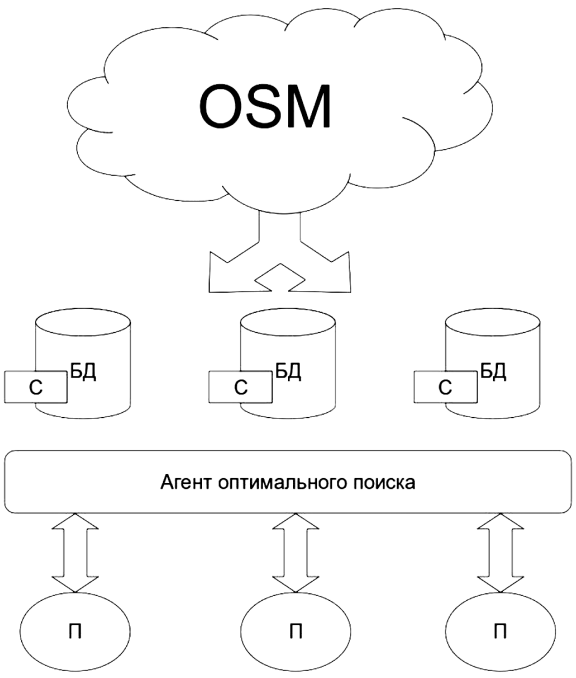
В разрабатываемом методе предлагается приводить все распространенные типы источников пространственных данных в единое представление по стандартам OGC. Тем самым получим гибкость использования всего объема накопленных данных и реализацию стандартов ISO. Для предоставления данных OSM в формате Web Feature Service и Web Map Service [5, 6] предлагается использовать OpenStreetMap-in-a-Box 3. Локальные базы данных дежурных планов городов предлагается также реализовывать по станадртам OGC.

После подготовки для работы источников данных необходимо разработать блок обработки этих данных. Блок должен уметь работать с ис-

точниками данных по протоколам OGC, в него должны быть заложены описанные принципы обработки пространственных данных, введенных специалистом. Для взаимодействия пользователя с блоком интеллектуальной обработки данных необходим интерфейс взаимодействия. Так как предполагается ввод пространственных ограничений и условий, то необходимо чтобы такой интерфейс представлял собой расширение географической информационной системы (ГИС). Через такой интерфейс удобно отображать результаты обработки.

Предлагаемая архитектура системы аналитической обработки данных представлена на рисунке. «Облаком» OSM изображен источник данных OpenStreetMap как один из наиболее вероятных в использовании пространственной информации разнопланового характера. Цилиндры БД представляют либо существующие базы данных в формате OGC, либо репрезентативные базы данных OSM. Блоком С представлены программные структуры, предоставляющие доступ к базам данных и взаимодействующие по протоколам стандартов OGC. Овалы П – специалисты, взаимодействующие с системой обработки информации.

Интеллектуальная обработка данных. Рассмотрим методику выполнения интеллектуальной обработки данных. Она заключается в последовательном выполнении трех действий:



Архитектура системы

подготовка используемых данных;

использование численных методов для поиска решений;

представление результатов.

Этот набор действий самодостаточен для получения результата, но также позволяет декомпозировать задачу на более мелкие, удобные для анализа и реализации, и распараллеливать выполнение задачи.

Итак, все необходимые источники данных приведены к единому виду WFS источников данных. С такими источниками легче работать. Для использования данных в обработке следует определить содержание для них. То есть необходимо иметь каталог источников данных с описательной метаинформацией о том, какого рода информация в них содержится, чтобы выбрать подходящие источники данных для анализа. Такие каталоги принято называть *каталогами метаинформации*. Если использовать собственные источники данных, то желательно заполнить их описательную часть, чтобы поисковые системы могли проиндексировать их, либо самостоятельно добавить источники в соответствующие каталоги.

В зависимости от поставленной задачи выбираем методики и средства анализа исходной информации. Проанализировав существующую необходимость в аналитической обработке пространственной информации и проводимые обработки, выявлено что используются в основном самые примитивные методы пространственной алгебры. Более менее комплексные подходы не используются. Так, выявлено, что такие необходимые задачи, как построение поверхностей по облаку исходных точек, разбиение объектов на классы, поиск оптимальных маршрутов и прогнозирование не решаются. Для этого реализованы основные методы решения данных задач.

Для построения поверхностей, например, для построения модели поверхности Земли или аппроксимации распределения показателей, можно использовать метод построения сплайнов. Этот метод достаточно распространенный и эффективный для построения поверхностей. Используется очень часто в играх и 3D-моделировании для визуализации и анализа полей точек.

Для поиска закономерностей в исследуемых явлениях и разбиения их на классы может применяться линейный дискриминантный анализ, метод ближайших соседей и гипотеза компактности.

В связи с особенностью результатов пространственного анализа необходимо использовать визуальные средства представления данных.

Например, данные в масштабах мира можно отображать как на проекции, так и на глобусе. Так, результаты прогнозирования движения воздушных масс более наглядно можно представить на глобусе с возможностью развертывания результатов во времени, а для представления анализа экологической ситуации на локальной территории муниципального образования предпочтительней использовать проекцию земной поверхности, также для некоторых задач необходимо видеть рельеф поверхности, поэтому рационально для таких случаев использовать проекцию с выдавленным рельефом, так называемый 2.5D, на котором можно увидеть реалистичный рельеф и одновременно отобразить плоские данные.

Реализация. В результате исследования выполнена система интеллектуального анализа пространственных данных, предназначенная для сбора, классификации и обработки пространственной информации, для получения статистических данных и использования в процессе принятия решений по управлению объектами территории. В нее входят следующие компоненты:

система управления базами пространственных данных PostGIS;

система конвертации данных проекта OpenStreetMap в реляционный формат хранения OGC OpenStreetMap-in-a-Box;

сервис обработки пространственных данных GeoServer;

пользовательская географическая информационная система QuantumGIS.

Данный перечень программного обеспечения представляет базовый набор инструментария, необходимый для выполнения обозначенных задач. Для более расширенного функционала пространственной обработки данных использованы следующие компоненты:

инструменты анализа и управления пространственными данными fTools;

интерфейс взаимодействия с инструментарием анализа R-статистики managerR.

Анализ частых задач пространственной аналитики выявил, что некоторые типы задач не имеют заданного алгоритма решения, поэтому были разработаны алгоритмы решения обозначенных задач в рамках используемых программных средств. В данной статье рассмотрено применение алгоритмов для построения поверхности решений, разбиения множеств на классы, поиска оптимального маршрута и прогнозирования.

Для решения задач построения поверхностей применен наиболее распространенный метод сплайнов, для разбиения множеств на классы – методы ближайших соседей и фишера, для поиска оптимального маршрута использовано математическое решение задачи коммивояжера, а для задач прогнозирования – методы марковских процессов как наиболее универсальный и простой способ, подходящий для множества задач.

В качестве исходных данных служат базы данных дежурных планов, снимков дистанционного зондирования и OSM. При необходимости возможно произвести предобработку данных для приведения к виду, пригодному для основных вычислений. Для визуализации использованы технологии WorldWind от Microsoft и Google Earth от Google.

Результаты разработки. Применение описанного подхода к организации аналитической обработки данных и использование обозначенных технологий позволит существенно расширить круг автоматизируемых задач и упростить работу специалиста.

Пространственная аналитика на сегодняшний день является достаточно перспективным направлением развития геоинформационных технологий, т. к. позволяет получать дифференциальную информацию о данных и улучшать процессы принятия решений в управлении территорией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Власов, М.** Распределенная ГИС [Электронный ресурс] / М. Власов. –Режим доступа: http://www.integro.ru/news/rgis.htm

2. Simple Feature Access (SFS) Implementation Specification for Geographic information [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.opengeospatial.org/standards/sfs

3. OSM in a Box Project [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://dev.ifs.hsr.ch/redmine/projects/osminabox/wiki

4. Database OpenStreetMap Model [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Database

5. OpenGIS Web Map Service (WMS) Implementation Specification [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.opengeospatial.org/standards/wms

6. OpenGIS Web Feature Service (WFS) Implementation Specification [Электронный ресурс]/ Режим доступа: http://www.opengeospatial.org/standards/wfs

УДК 621.37 + 615.814.1

Е.А. Степанов, А.Д. Юхнев

ПРИЕМНИК ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ СИСТЕМЫ С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ РЕГИСТРИРУЕМЫХ СКОРОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦЕРЕБРАЛЬНОГО КРОВОТОКА

Современная комплексная диагностика сосудистых заболеваний головного мозга базируется на совместном использовании методов лучевой и ультразвуковой диагностики. Однако ультразвуковая доплеровская оценка кровотока в мозговых артериях занимает ведущее место как наиболее мобильный метод скрининга, динамического наблюдения и мониторинга у пациентов с высоким риском недостаточности кровоснабжения мозга или при состоявшейся цереброваскулярной катастрофе.

При всем разнообразии патогенетических вариантов повреждения сосудистого русла головного мозга (стенозы церебральных и магистральных артерий головы, артериальный спазм, гиперперфузионный синдром, острая церебральная ишемия и тромбоз, ремоделирование мозгового кровообращения при синдромах коллатерализации и обкрадывании и др.) имеется несколько диагностически важных параметров доплеровского сигнала, изменения которых являются универсальными и, безусловно, воспроизводимыми: направление потока по отношению к источнику УЗ излучения, вид спектра, величина максимальной систолической и минимальной диастолической скорости. Наименее динамичный параметр – направленность потоков, т. к. мозговое кровообращение возможно только в пределах анатомического расположения мозговых артериальных образований, имеющих эфферентное по отношению к сердцу распределение потоков и определенные, близкие к «постоянным», характеристики – диаметр и глубину залегания. В связи с чем при локации основной массив спектрального сигнала расположен по одну из сторон от изолинии (над или под ней). Крайнюю важность абсолютные значения скорости кровотока имеют при расчетах резерва коллатерального кровообращения, индекса Lindegaard (отношения скоростей в экстра- и интракраниальном сегментах артерий каротидного бассейна) при вазоспазме, при стенозах мозговых и магистральных артерий различной степени. Кроме того, все суждения о тонической составляющей лоцируемого сосуда, состоянии резистивного сегмента церебрального артериального бассейна и реактивных изменениях в период функционального напряжения также являются производными анализа параметров скорости.

В случае очевидной проблемы, при закупорке или грубом стенозировании, предпочтение в оценке доплерограмм, как правило, отдается искажению спектрального профиля (турбулентность, заполнение спектрального окна, деформация систоло-диастолического комплекса) или феномену «патологического перетока». В диагностике стенозирующих поражений артерий мозга при сужении просвета в диапазоне от 20 до 70 % главенствующее значение имеет показатель скорости кровотока.

В связи с тем, что доказана тесная взаимосвязь между нарастанием степени стенозирования мозговой артерии (появление градиента скорости) и риском развития инсульта, максимально достоверное значение линейной скорости кровотока становится основным диагностическим и прогностическим аргументом. К сожалению, современная инструментальная база доплеровских анализаторов имеет значительную погрешность измерений максимальных систолических скоро-

стей кровотока – разброс в измерениях на различной аппаратуре достигает 40 %. Особенно явно это сказывается при малых стенозах (до 50 %), когда ламинарность потока еще не нарушена и измеренные значения скорости остаются единственным патологическим признаком.

Таким образом, цель данного исследования – разработка устройства, которое увеличит диапазон регистрируемых скоростей, что позволит повысить «чувствительность» доплеровской регистрации артериальных стенозов малой степени и более полноценно выделить группу так называемого «сосудистого риска».

Исходные предпосылки

Точное знание основных характеристик объекта, который предстоит изучать с помощью локационной установки, работающей в импульсном режиме, позволит максимально оптимизировать ее конструкцию и получить наивысшие характеристики системы в целом.

Применительно к ультразвуковой диагностике сосудов к таким характеристикам следует отнести глубину залегания сосуда от точки локации, диаметр сосуда, угол, под которым лоцируется сосуд, характеристики потока крови в сосуде в норме и при различных видах патологий. Для разработки системы также необходимо знать и другие свойства принимаемых сигналов, связанные со свойствами рассеяния ультразвука

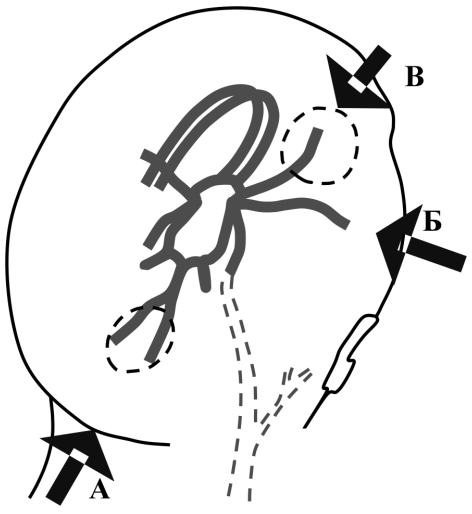


Рис. 1. Топология интракраниальных артерий и точки их локации

А – трансокципитальный доступ; Б – трансгемпоральный доступ чрез переднее, среднее или заднее окно; В – трансорбитальный доступ

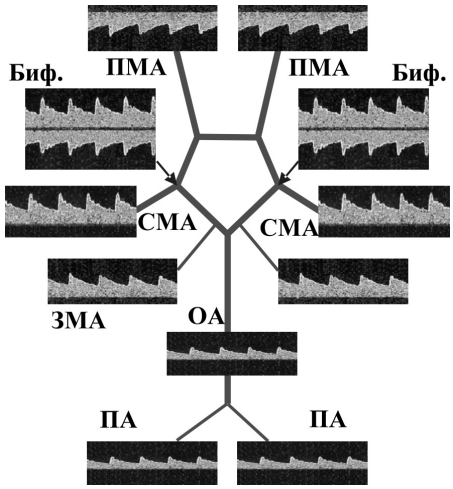


Рис. 2. Схема строения артерий основания мозга и спектрограммы нормального кровотока по ним

на тканях, через которые он проходит, и, в особенности, с рассеянием на сосудистой стенке, совершающей колебания с частотами порядка 0,5÷2 Гц. К сожалению, эти вопросы не могут быть рассмотрены в рамках данной статьи из-за ее ограниченного объема.

Известно, что для получения доплеровских сигналов от внутричерепных сосудов используются краниальные проходы или «окна» (рис. 1). При этом расстояния до различных участков сосудов оказываются различными, но укладываются в диапазон 34÷100 мм. В наиболее значимой точке исследования кровотока – средней мозговой артерии на уровне сегмента М1 течение крови является однонаправленным, а спектрограмма – асимметричной. На рис. 2 приведено схематичное изображение брахиоцефальных артерий и наиболее специфичные спектрограммы доплеровских сигналов кровотока.

Поток крови в сосуде является нестационарным и меняется в зависимости от фазы сердечного цикла и конкретного сосуда. Фактически профили потоков меняются от параболических до поршневых [1–3]. Наиболее важными для разработки системы можно считать две упрощенные характеристики потока – максимальную скорость крови в потоке в момент систолы и минимальную скорость в момент диастолы.

Сосуды, интересующие врачей, расположены в нескольких узких диапазонах глубин. По данным различных литературных источников границы этих диапазонов незначительно варьируются. Численные значения максимально возможных

Таблица интракраниальных артерий и их показателей

Сосуд	СМА	ПМА	ЗМА	ОА	Сиф.	ПА	ГА	ЗСА
Глубина минимальная, мм	45	65	60	80	50	45	40	60
Глубина максимальная, мм	65	75	70	100	70	80	60	65
Скорость максимальная, см/с	250	150	150	150	100	70	60	80
Направление потока	+	-	+	+	+ -	+	+ -	+

интервалов глубин и предельно максимальных скоростей при значимых патологических потоках, полученные в нашем эксперименте и в других исследованиях [4–6], представлены в таблице.

Кроме того, следует учитывать, что положение датчика относительно исследуемого объекта (сосуда) существенно влияет на получаемый спектр, что показано на рис. 3.

Для разделения сигналов с разных глубин требуется ультразвуковая локационная установка, работающая в импульсном режиме. Один из наиболее важных параметров такой установки – частота повторения зондирующих импульсов (Pulse Repetition Frequency – PRF) F_{PRF}. Рациональный и обоснованный выбор этого параметра определяет реализационные возможности аппаратуры и обеспечивает эффективный и достоверный анализ параметров кровотока.

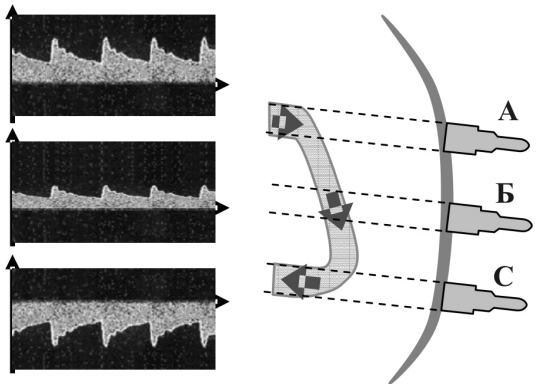


Рис. 3. Вид спектров в зависимости от положения датчика относительно потока крови в исследуемом сосуде

В общем случае структуру приемника доплеровского спектроанализатора кровотока можно представить как последовательное соединение аналоговой и цифровой части. Аналоговая часть осуществляет предварительную обработку сигнала, в т. ч. интегрирование принимаемого импульса. При этом полоса спектра сигнала с выхода интегратора примерно соответствует F_{PRF}.

В этой связи выбор F_{PRF} определяет параметры амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) приемного тракта, поскольку она должна пропускать максимальную частоту доплеровского сдвига F_m, присутствующую в спектре сигнала кровотока, которая соответствует максимальной скорости кровотока. Также на F_m накладываются ограничения, вытекающие из теоремы Найквиста, согласно которой $F_{PRF} > 2F_m$ [7–9].

Величина F_{PRF}, равная удвоенной величине доплеровского сдвига частот, называется *пределом Найквиста*, превышение его влечет за собой возникновение эффекта наложения, когда часть сигнала, не попавшая в основной частотный канал приема, оказывается в следующем (эффект наложения, в медицинской и переводной литературе это явление часто называют «aliasing-эффект») или нескольких следующих побочных каналах [10–12]. Очевидно, что частота повторения зондирующих импульсов не должна превышать отношения скорости распространения ультразвука (c) к удвоенному значению максимальной глубины (L) $F_{PRF} < \frac{c}{2L}$. Используя формулу, описывающую эффект Доплера, получим

связь $V_{\max} = \dfrac{F_m \cdot c}{2 f_0 \cdot \cos\alpha}$ (f_0 – частота излучаемого ультразвука, α – угол между осью датчика и осью сосуда в области локации). Учитывая изложенные выше ограничения можно вывести зависимость максимальной скорости от глубины [8, 17]

$$V_{\max} = \frac{c^2}{8 f_0 \cdot L \cdot \cos\alpha}.$$

Таким образом, в импульсном доплеровском режиме существует ограничение для измерения больших скоростей на больших глубинах.

Но данное ограничение справедливо для сигналов с симметричным спектром, что хорошо иллюстрирует рис. 4. На рис. 4 *а* приведен спектр сигнала для случая дискретизации (частоты повторения импульсов зондирования) с частотой $F_{PRF} = 2F_m$. На рис. 4 *б* – спектр сигнала при $F_{PRF} < 2F_{m1}$, а на рис. 4 *в* – спектр сигнала с сегмента Ml средней мозговой артерии при $F_{PRF} < F_{m3}$. Приведенные на рис. 4 графики иллюстрируют теорему Шеннона (Котельникова). В случае, когда $F_{PRF} < 2F_m$, происходит эффект наложения. Рис. 4 *в* иллюстрирует случай однонаправленного кровотока (несимметричного спектра), например, для СМА. Обратный кровоток в этом сосуде создает спектр с максимальной доплеровской частотой F_{m2}, а прямой – с частотой F_{m3}.

Для выделения сигналов доплеровской частоты в приемных каналах сигнала прямого и обратного кровотоков (далее – прямой и обратный канал) используются фильтры нижних частот (ФНЧ). На рис. 4 *в* пунктиром показана идеализированная АЧХ ФНЧ, одинаковая для прямого и обратного каналов от $-F_{fl}$ до F_{fl} ($F_{fl} = F_c/2$). С учетом условий $F_{m2} < F_{PRF}/2$ и $F_{m3} > F_{PRF}/2$ возникает эффект наложения. При этом сигналы кровотока будут искажаться в прямом канале за счет «обрезания» части спектра, а в обратном канале – за счет «заворачивания», т. е. появления высоких (превышающих $F_{PRF}/2$) частотных составляющих сигнала прямого кровотока.

Для устранения эффекта наложения предлагается применить раздельную (по каналам) регулировку полосы пропускания ФНЧ. Из рис. 4 *в* видно, что при использовании полосы от $-F_{f2}$ до нуля в канале обратного кровотока и от нуля до

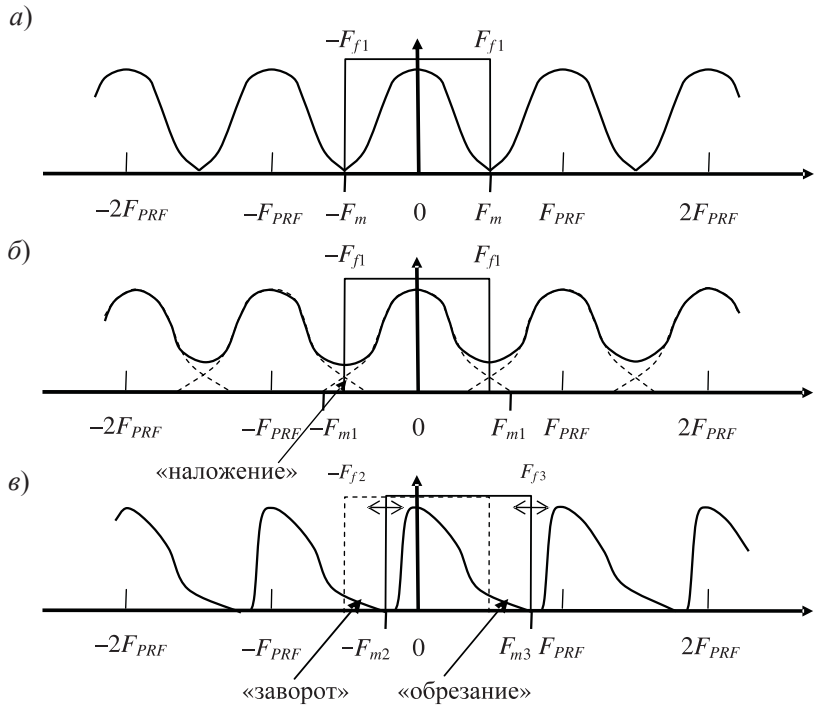


Рис. 4. Спектры сигналов от потоков крови с различными максимальными прямыми и обратными скоростями (частотами: $-F_m \div F_m$, $-F_{m1} \div F_{m1}$, $-F_{m2} \div F_{m3}$) и одной частоте повторения импульсов F_{PRF} (дискретизаций):
а – Бифуркация. Симметричный спектр, дискретизация с частотой $F_{PRF} > 2F_m$; *б* – Бифуркация. Симметричный спектр, дискретизация с частотой $F_{PRF} < 2F_{m1}$. Эффект наложения (маскировки) спектров; *в* – Сегмент СМА-М1. Асимметричный спектр, дискретизации с частотой $F_{PRF} < 2F_{m3}$. Эффект «заворота» и «обрезания» спектров без их наложения

F_{f3} в канале прямого кровотока искажений спектров сигналов не происходит. То есть в предельном случае

$$V_{\max} = \frac{c^2}{4 f_0 \cdot L \cdot \cos\alpha} \text{ при } F_{f2} = 0,\ F_{f3} = F_{PRF}.$$

Сохраняя постоянной суммарную полосу фильтров в обоих каналах (от $-F_{f2}$ до F_{f3} равную F_{PRF}), можно ввести коэффициент использования полосы K:

$$K = \frac{F_{f3}}{F_{PRF}} \text{ при } F_{f3} \geq \frac{F_{f3}}{2} \text{ и } K = \frac{F_{f2}}{F_{PRF}} \text{ при } F_{f3} < \frac{F_{f3}}{2}.$$

Регулировка полос пропускания по каналам может осуществляться врачом по аудиальным или визуальным критериям появления искажений.

В реальных системах F_{PRF} изменяется в достаточно широких пределах. Так, например, в системе «Сономед 300» F_{PRF} может изменяться с шагом, близким к мс, а общее количество наборов таких частот превышает 100. Данное решение оказалось настолько непрактичным для конечного пользователя, что приборы этой серии работают фактически с одним значением F_{PRF}, предустановленным производителем, что в значительной степени понижает ее возможности.

На рис. 5 приведены кривые зависимости максимальной наблюдаемой скорости кровотока от глубины залегания сосудов L, полученные в результате анализа литературы и проведенного эксперимента. А – максимальные скорости, регистрируемые в реальных сосудах; Б – коэффициент исп. полосы – 0,5 F_{PRF}; В – коэффициент исп. полосы – 0,7 F_{PRF}; Г – коэффициент исп. полосы – 1,0 F_{PRF}. Частота повторения импульсов F_{PRF} =10 кГц до глубины (L) 66 мм, F_{PRF} = 7 кГц до глубины 110 мм. Окно – 10 мм.

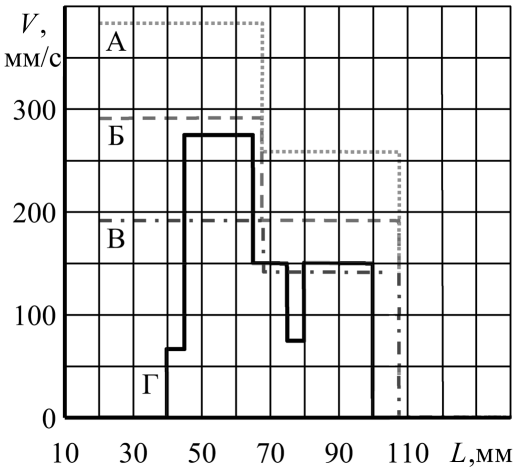


Рис. 5. Зависимость максимальной регистрируемой скорости от глубины зондирования при симметричной и асимметричной фильтрации.

Из рисунка видно, что при использовании F_{PRF} (7кГц, 10кГц) с коэффициентом использования 0,7 перекрывается весь практически значимый диапазон скоростей кровотока.

Применение ФНЧ с регулируемыми полосами пропускания АЧХ и различными частотами срезов ФНЧ в прямом и обратном канале позволяет реализовать приемопередатчик с помощью двух F_{PRF} (7кГц, 10кГц), такое решение позволяет создать программное обеспечение таким образом, что при регулировке пределов диапазонов просмотра система автоматически выбирает нужный F_{PRF}.

Предлагаемая блок-схема приемной части импульсного тракта системы ультразвуковой диагностики, реализующей квадратурный прием и использующей ФНЧ с раздельно регулируемыми полосами пропускания, обозначенными как рег. ФНЧ А и рег.ФНЧ Б, приведена на рис. 6 и 7.

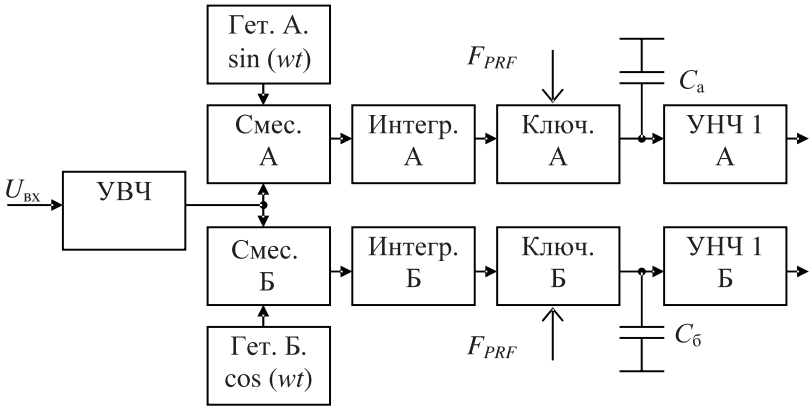


Рис. 6. Функциональная схема высокочастотной части приемника импульсной системы

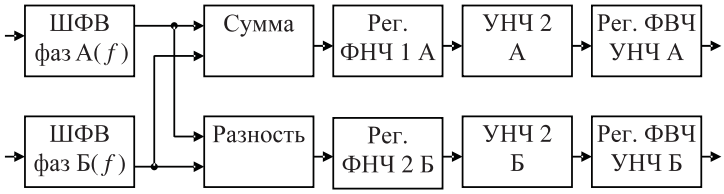


Рис. 7. Функциональная схема высокочастотной части приемника импульсной системы

Входной высокочастотный сигнал *U*вх с приемной антенны (ультразвукового датчика) системы поступает на усилитель высокой частоты (УВЧ), выполненный в виде однокаскадного усилителя с эмитерным повторителем для согласования с симметрирующим трансформатором, подающим сигналы на два смесителя квадратурных каналов А и Б. В качестве смесителей (перемножителей) используются симметричные низкоомные интегральные ключи с внутренним сопротивлением 5 Ом.

Интегрирование низкочастотных сигналов осуществляется с помощью RC-цепочек, при этом в качестве их сопротивлений используются выходные сопротивления перемножителей. Сигналы с интеграторов записываются с помощью ключей на онденсаторы Са и Сб на входах предварительных усилителей низкой частоты (УНЧ 1) квадратурных каналов. Управление ключами производится видеосигналом с частотой F_{PRF}.

Усиленные сигналы низкой частоты поступают на широкополосные фазовращатели ШФВ А и ШФВ Б, фазочастотные характеристики которых различаются на 90º с погрешностью, не превышающей 20 угловых мин в полосе 65÷17 000 Гц.

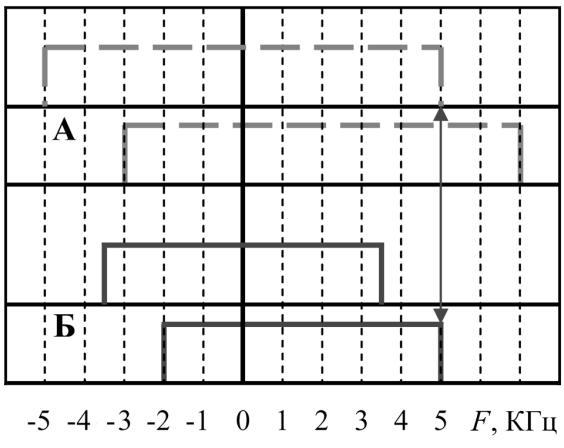


Рис. 8. Схематичное изображение реализуемых асимметричных полос пропускания системы (– – –) F_{PRF} 10 кГц; (———) F_{PRF} 7 кГц

Прошедшие ШФВ сигналы получают дополнительный взаимный фазовый сдвиг 90º, благодаря которому на выходах суммарно-разностных схем формируются сигналы прямого и обратного каналов, которые определяются знаком разности частот по отношению к сигналу гетеродина. Если принимаемая частота превышает 2 МГц, то это свидетельствует о наличии рассеивающих частиц, движущихся в сторону датчика, в противном случае движение происходит от датчика.

Данные сигналы проходят рег. ФНЧ А и рег. ФНЧ Б, реализованные как активные RC-фильтры с изменямой частотой среза, обеспечивающие режекцию частоты F_{PRF} (7 или 10 КГц) и имеющие коммутируемые частоты среза: 2, 3, 3,5, 5 и 7 КГц.

Схематичное представление реализуемых идеальных полос пропускания системы приведено на рис. 8.

На рисунке представлены четыре основные используемые полосы пропускания. Стандартная (– 5 кГц ÷ + 5 кГц) и «асимметричная» полоса (– 3 кГц ÷ + 7 кГц) для F_{PRF} 10 кГц. Стандартная (– 3,5 кГц ÷ + 3,5 кГц) и «асимметричная» полоса (– 2 кГц ÷ + 5 кГц) для F_{PRF} 7 кГц.

В качестве базовых структур для реализации регулируемых фильтров выбраны фильтры Кауэра пятого порядка. Результаты моделирования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) предлагаемых фильтров для двух частот повторения зондирующих импульсов и нескольких частот среза приведены на рис. 9 и 10. Следует отметить, что реализация указанных фильтров возможна с применением серийно выпускаемых компонентов.

Оконечные каскады приемника обеспечивают регулировку коэффициентов усиления в пределах 62 дБ, коммутируемую перестройку полосы пропускания в низкочастотной области обеспечивают фильтры верхних частот (ФВЧ) с регулируемыми полосами пропускания: 80, 160, 320 и 640 Гц. В медицинской практике данные фильтры обычно называют фильтрами «стенки».

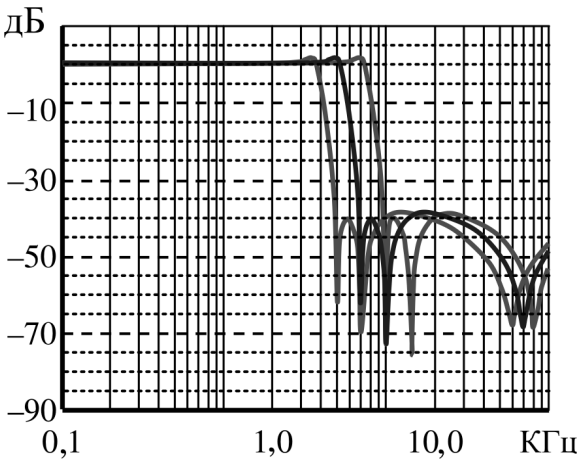


Рис. 9. Расчетные АЧХ ФНЧ с возможной регулировкой асимметрии по каналам: верхний график – коэффициент использования полосы – 0,7. Частоты среза: 3,5; 5,0; 5,0 КГц

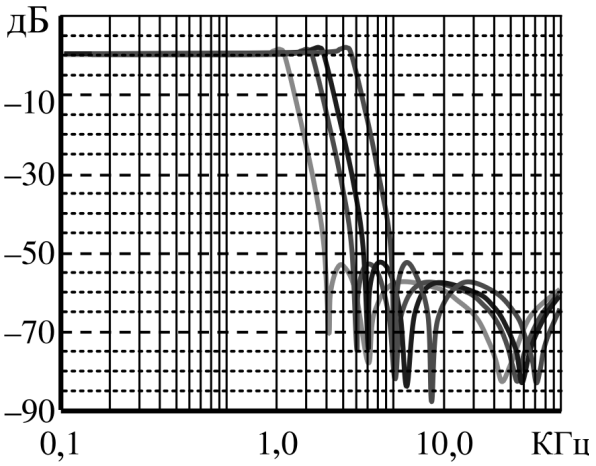


Рис. 10. Расчетные АЧХ ФНЧ с возможной регулировкой асимметрии по каналам: верхний график – коэффициент использования полосы – 0,5. Частоты среза: 2,0; 3,0; 3,0; 5,0 КГц

Общий максимальный коэффициент усиления приемника составляет ≈ 800 000. В зависимости от режима работы спектральная плотность средней мощности шумов напряжения, приведенного ко входу, составляет 6÷8 нВ/$\sqrt{\text{Гц}}$.

Далее сигналы поступают на ПК, где происходит их окончательная обработка и визуализация в виде спектрограмм, по которым осуществляется расчет всех диагностических параметров и индексов: частоты пульса, систолической, диастолической и средней скоростей, индекса Пурсело, Гослинга и т. д. Обработка, расчеты и визуализация осуществляется на ПК в режиме реального времени.

Для оценки работоспособности предложенного технического решения, на базе клиники нервных болезней Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова были проведены сравнительные испытания трех приборов, выпускаемых в настоящее время ведущими российскими предприятиями. В качестве эталона (тест-объекта) использовался фантом кровотока с моделью стенозированного участка сосуда. Регистрировались систолическая и средняя скорости течения эквивалента крови в сосуде. Датчик перемещался под углом к оси модели сосуда. Значения средней скорости эквивалента крови в фантоме предварительно измерялись с помощью электромагнитного расходомера на кафедре гидроаэродинамики Санкт-Петербургского государственного университета.

Рис. 11 иллюстрирует вид спектра скорости в зависимости от положения датчика в области стеноза. На рис. 12 приведены нормированные систолические и средние скорости, зарегистрированные в области стеноза с помощью трех доплеровских систем, в зависимости от места расположения датчика. Для проведения измерений с помощью фантома кровотока создавался пульсирующий поток со среднерасходной скоростью V_{to}.

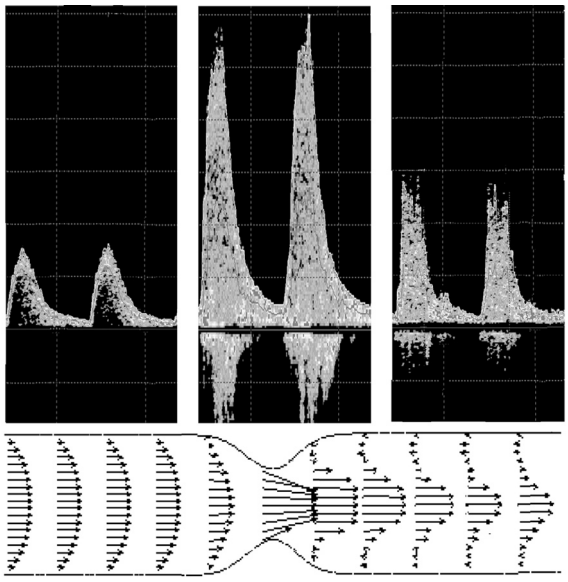


Рис. 11. Профили систолической и средней скорости вдоль оси имитатора в зоне стеноза
V_{to} – скорость потока создаваемого фантомом кровотока; V_d – скорость, измеренная приборами

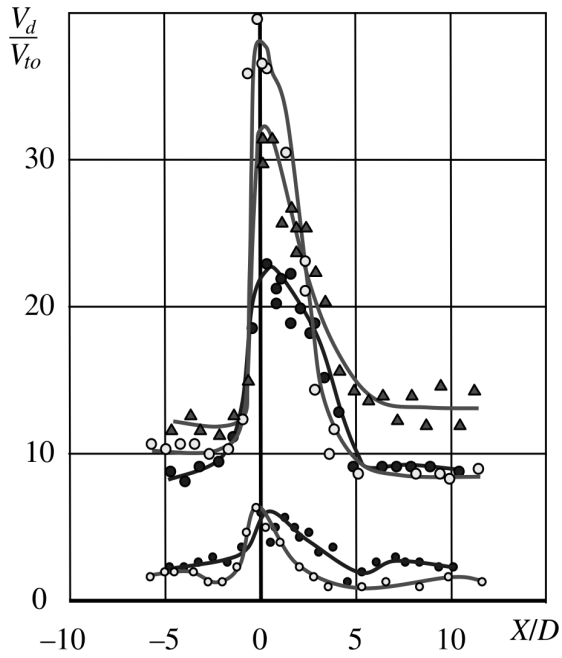


Рис. 12. Профили систолической и средней скорости вдоль оси имитатора в зоне стеноза
V_{to} – скорость потока, создаваемого фантомом кровотока;
V_d – скорость, измеренная приборами
(—○—) $V_{макс}$, (– ○ –)$V_{ср}$ «Спектра»;
(—▲—)$V_{макс}$, «Ангиодин»; (—●—) $V_{макс}$,
(– ● –)$V_{ср}$ «Сономед»

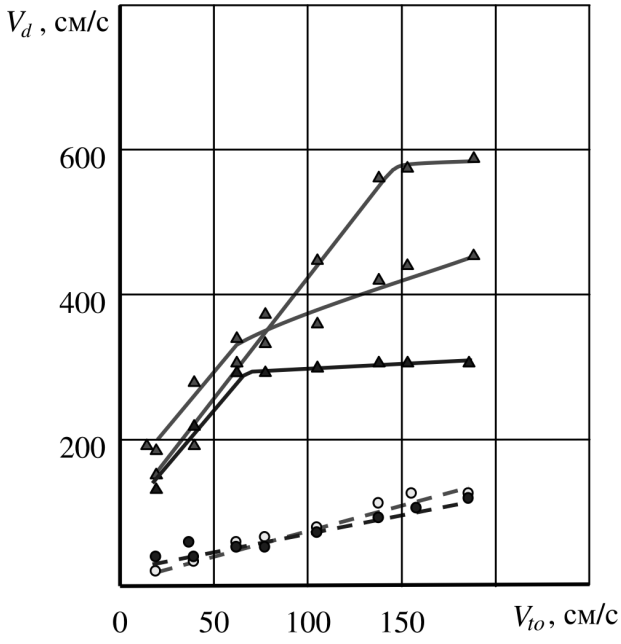


Рис. 13. Графики доступных для наблюдения скоростей кровотока
V_{to} – скорость потока, создаваемого фантомом кровотока;
V_d – скорость, измеренная приборами
(—○—) $V_{макс}$, (– ○ –)$V_{ср}$ «Спектра»;
(—▲—)$V_{макс}$, «Ангиодин»; (—●—) $V_{макс}$,
(– ● –)$V_{ср}$ «Сономед»

Видно, что доплеровский анализатор кровотока, в котором применено предложенное техническое решение, показывает наибольшие значения максимальной скорости в зоне стеноза.

Основное сравнение приборов было проведено следующим образом. С помощью фантома кровотока задавались различные среднерасходные скорости V_{to}. С помощью доплеровских приборов измерялись скорости в зоне стеноза. Эксперименты показали, что средние скорости кровотока V_d линейно зависят от задаваемой среднерасходной сороости V_{to}. В том же диапазоне изменений среднерасходной скорости V_{to} линейные зависимости между ней и максимальными скоростями, измеренными с помощью доплеровских приборов, отсутствуют. Зависимости имеют изломы, свидетельствующие о невозможности корректного измерения их превышающих максимальных скоростей (рис. 13).

Разработанная система (коэффициент использования полосы 0,7) в эксперименте, результаты которого приведены на рис. 13, должна была обеспечить корректное измерение максимальной скорости кровотока до значений порядка 560 м/с. Это значение фактически совпадает со значением, полученным в эксперименте, даже несмотря на то, что погрешности, возникающие из-за особенностей распространения ультразвука, в рамках данной статьи не рассматриваются и не учитываются.

Приведенные результаты показали, что разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет регистрировать максимальные систолические скорости кровотока на 18 и 45 % большие, по сравнению с известными системами «Ангиодин» и «Сономед» соответственно. Разработанный комплекс превосходит имеющиеся и по чувствительности к изменению максимальной скорости в зоне стеноза (см. рис. 12).

Учитывая, что мозговое кровообращение возможно только в пределах анатомического расположения артериальных образований, имеющих эфферентное по отношению к сердцу распределение потоков, возможно точно определить требования к характеристикам доплеровского анализатора кровотока и, за счет этого, оптимизировать его структуру в целом.

Использование принципа поканальной фильтрации позволяет повысить диапазон измеряемых максимальных скоростей кровотока.

Разработанный на базе данных принципов комплекс аппаратно-программного анализа сигналов кровотока показал свою эффективность в тестовых экспериментах и клинической практике.

Предложенное техническое решение защищено патентами РФ [13, 14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение ультразвука в медицине: Физические основы [Текст] / Пер. с англ; Под ред. К.Хилла. –М.: Мир, 1989. –568 с.

2. Doppler Ultrasound [Текст] / Ed. by D. Evans, W.N. McDicken. –NY, 1985.

3. **Лелюк, В.Г.** Ультразвуковая ангиология [Текст]/ В.Г. Лелюк, С.Э. Лелюк. –М.: Реальное время, 2003. –324 с.

4. **Цвибель, В.** Ультразвуковое исследование сосудов [Текст]/ В. Цвибель, Дж. Пеллерито. –М.: Видар, 2008. –646 с.

5. Ультразвуковая доплеровская диагностика в клинике [Текст] / Под ред. Ю.М. Никитина, А.И. Труханова. –Иваново: Изд-во МИК, 2004. –496 с.

6. **Jurgen, Faust.** Die Doppler-Sonographie in der Gefassdiagnostik [Текст] / Faust Jurgen. –Kranzbuhler, 1992.

7. **Лайонс, Ричард.** Цифровая обработка сигналов [Текст] / Ричард Лайонс; Пер. с англ; 2-е изд. –М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. –656 с.

8. **Котельников, В.А.** О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи [Текст] / В.А. Котельников // Успехи физических наук. –2006. –№ 7. –С. 762–770.

9. **Woodcock, J.P.** Principles and applications of Doppler ultrasound [Текст] / J.P. Woodcock, R. Skidmore //Clin. Diagn. Ultrasound. –1980. –№ 5. –P. 166–185.

10. **Mitchell, D.G.** Color Doppler imaging: principles, limitations, and artifacts [Текст] / D.G. Mitchell // Radiology. –1990. –Vol. 177. –P. l–10.

11. **Kremkau, F.W.** Artifacts in ultrasound imaging [Текст] / F.W. Kremkau, K.J.W. Taylor // J. Ultrasound Med. –1986. –№5. –P. 227–237.

12. **Reading, C.C.** Color and spectral Doppler mirror-image artifact of the subclavian artery [Текст] / C.C. Reading, J.W. Charboneau, J.W. Allison [et al.] // Radiology. –1990. –Vol. 174. –P. 41–42.

13. **Монаков, А.Г.** Устройство для регистрации кровотока [Текст] / А.Г. Монаков, А.Б. Степанов, Е.А. Степанов. –Патент № 51852. –10.03.2006.

14. **Монаков, А.Г.** Способ регистрации кровотока [Текст] / А.Г. Монаков, А.Б. Степанов, Е.А. Степанов. –Патент № 2311870. –10.12.2007.

УДК 519.688

К.К. Семенов

ОБЪЕДИНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА НЕЧЕТКИХ ПЕРЕМЕННЫХ И АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАСЛЕДСТВЕННОЙ ПОГРЕШНОСТИ

В практике прикладного программирования часто возникает ситуация, когда в качестве исходных данных для математических вычислений по алгоритму $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, который требуется реализовать программой, выступают неточные данные. Например, вместо точечных значений аргументов $x_1, x_2, ..., x_n$ для них известны только интервалы $[x_1 - \Delta x_1, x_1 + \Delta x_1], [x_2 - \Delta x_2, x_2 + \Delta x_2], ..., [x_n - \Delta x_n, x_n + \Delta x_n]$ допускаемых значений. В таком случае имеет смысл говорить не о точечном значении результата вычислений y, а об интервале $[y - \Delta y, y + \Delta y]$ его возможных значений. Погрешность результата вычислений y, вызванная неточностью исходных данных расчета, принято называть *наследственной* [1] или *трансформированной* [2] погрешностью вычислений.

Ситуация, когда вычисления производятся в условиях неточных исходных данных, частое явление в практике современного приборостроения.

Компьютер и программное обеспечение стали неотъемлемыми элементами современных средств измерений [3], а цифровая обработка, выполняемая микроконтроллерами, микропроцессорами и т. д., – непременной составной частью преобразования сигналов измерительной информации. При этом любые данные из аналоговых измерительных каналов, поступающие после аналого-цифрового преобразования в вычислительный модуль, искажены погрешностью, носящей систематический, случайный или смешанный характер.

Поскольку в большинстве случаев именно результаты математической обработки декларируются как результаты измерений, то характеристики их погрешности должны быть оценены и представлены пользователю в соответствии с Законом РФ «Об обеспечении единства измерений» [4]. Задача оценки наследственной погрешности – одна из главных задач при аттестации программного обеспечения, используемого в метрологии [2]. Схожие с ней задачи возникают при численном моделировании, в расчетах технико-экономических показателей и других областях.

Широко известны такие методы оценки характеристик наследственной погрешности, как те или иные модификации интервальной арифметики, оценка с помощью частных производных, имитационное моделирование (методы Монте-Карло), метод на основе теории нечетких переменных. Данные методы обладают как преимуществами, так и недостатками, препятствующими их повсеместному применению. Однако возможна такая комбинация нескольких методов [5], при которой удается сочетать их полезные свойства и минимизировать влияние их недостатков.

Общая постановка задачи, решаемой упомянутыми методами, может быть сформулирована следующим образом. Пусть $x_1, x_2, ..., x_n$ – входные аргументы программы математической обработки, для которых известны характеристики погрешности (например, x_i являются результатами измерений значений сигналов измерительной информации с известными характеристиками погрешности). Результат вычислений y (например, результат косвенных измерений) определяется в общем случае по алгоритму произвольной сложности $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, представленному программным кодом [6]. Зачастую явный вид функции $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$ даже неизвестен, и аналитический разбор исходного кода программы, реализующей данные вычисления, сильно затруднен для исследователя. Требуется определить характеристики погрешности результата обработки y, если известны характеристики погрешности аргументов $x_1, x_2, ..., x_n$.

В настоящей статье предлагается комбинация известных методов, основанная на классическом способе учета наследственной погрешности, когда оценка характеристик погрешности осуществляется с помощью частных производных от алгоритма $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$ по входным аргументам. В ее рамках предлагается объединить математические аппараты нечетких переменных и автоматического дифференцирования.

Гладкую функцию $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, которая реализована алгоритмом и связывает результат y математической обработки с исходными данными, можно разложить в ряд Тейлора около точки $(x_1, x_2, ..., x_n) \in R^n$ и получить точное соотношение для погрешности Δy результата через известные отклонения аргументов Δx_i. Вследствие малости погрешности Δx_i метод линеаризации, заключающийся в отбрасывании всех членов ряда, за исключением линейного, широко распространен. В этом случае имеет место приближенное равенство $\Delta y \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, x_2, ..., x_n) \cdot \Delta x_i$.

На основе данного соотношения получаются оценки наследственной погрешности для разных случаев характера погрешности:

$$\Delta_y \approx \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, x_2, ..., x_n) \right| \cdot \Delta_{x_i}, \qquad (1)$$

где $[-\Delta_{x_i}, +\Delta_{x_i}]$ – пределы допускаемых значений для погрешностей исходных данных, носящих систематический характер; $[-\Delta_y, +\Delta_y]$ – оценка пределов допускаемой погрешности результата вычислений и

$$\sigma_y^2 \approx \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, x_2, ..., x_n) \right)^2 \cdot \sigma_{x_i}^2, \qquad (2)$$

где $\sigma_{x_i}^2$ – оценка дисперсии погрешности исходных данных, имеющей случайный характер; σ_y^2 – оценка дисперсии случайной погрешности результата вычислений.

Вид оценки меняется в зависимости от характера проявления погрешности исходных данных. Обобщенную формулу, объединяющую в себе представленные оценки как частные случаи, можно получить на основе формализации погрешности как нечеткой переменной [7]:

$$\xi_y \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, x_2, ..., x_n) \cdot \xi_{x_i}, \qquad (3)$$

где ξ_{x_i} – нечеткая переменная, описывающая характеристики погрешности исходных данных; ξ_y – нечеткая переменная, характеризующая погрешность результата вычислений. Используя определенный [8] аппарат работы с нечеткими переменными, можно получать характеристику погрешности y в форме $[-\Delta_y - k\cdot\sigma_y, \Delta_y + k\cdot\sigma_y]$, где коэффициент k может быть назначен пользователем. Как правило, k следует выбирать равным 2,0 [9], либо в соответствии с правилом П.В. Новицкого равным 1,6 [10]. При этом:

1) характеристики систематической и случайной составляющих погрешности могут быть легко отделены друг от друга;

2) все действия с характеристиками погрешности выполняются унифицированным образом вне зависимости от характера погрешности (систематического или случайного);

3) результатом применения данного аппарата являются общепринятые в метрологии характеристики погрешности – интервал, описывающий пределы допускаемых значений той или иной составляющей погрешности.

Правила работы с нечеткими переменными, характеризующими погрешность, могут быть редуцированы до правил (1)–(2) и, таким образом, выступать их обобщением.

Важным обстоятельством в пользу применения метода нечетких переменных служит необходимость привлечения в ряде задач трудно формализуемой информации. Например, в измерительных задачах использование априорной информации экспериментатора об исследуемом им объекте позволяет повысить точность результатов измерений [11]. Однако формализовать эти сведения в терминах теории вероятностей или интервальной арифметики не представляется возможным. Теория нечетких переменных позволяет учесть плохо формализуемые априорные сведения [11].

Для того чтобы воспользоваться формулой (3) необходимо указать, каким образом требуется выполнять операцию сложения нечетких переменных и операцию умножения нечеткой переменной на постоянный коэффициент. Данные операции представлены в работе [8].

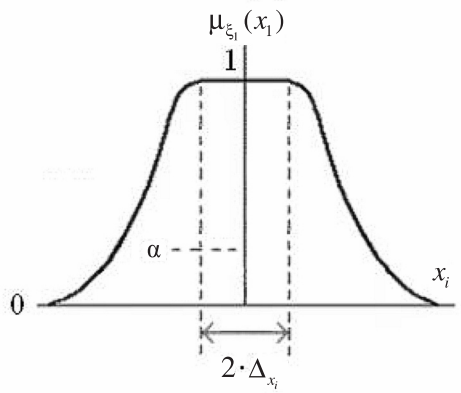
Основной характеристикой нечеткой переменной ξ_i, отражающей сведения о величине x_i, является ее функция принадлежности $\alpha = \mu_{\xi_i}(x_i)$, сопоставляющая каждому возможному значению x_i значение меры α, называемой *уровнем доверия*, и в какой-то степени являющаяся субъективным аналогом вероятности. В [12] отмечается, что значение $\alpha = \mu_{\xi_i}(x_i)$ может быть интерпретировано как вероятность того, что лицо, принимающее решение, отнесет значение x_i к множеству значений ξ_i.

Для рассматриваемого применения теории нечетких переменных необходимо, чтобы для всех аргументов ξ_i расчета соответствующие им функции принадлежности $\mu_{\xi_i}(x_i)$ имели вид

$$\mu_{\xi_i}(x_i) = \begin{cases} \exp\left[-\dfrac{\left(x_i + \Delta_{x_i}\right)^2}{2\cdot s^2}\right], & \text{при } x_i \le -\Delta_{x_i} \\ 1, & \text{при } -\Delta_{x_i} \le x_i \le \Delta_{x_i} \\ \exp\left[-\dfrac{\left(x_i - \Delta_{x_i}\right)^2}{2\cdot s^2}\right], & \text{при } x_i \ge \Delta_{x_i} \end{cases},$$

как это показано на рисунке, а арифметические операции выполнялись по алгебраическому правилу работы с нечеткими переменными: если $\eta = \xi_1 \circ \xi_2$, где знак «$\circ$» обозначает произвольную арифметическую операцию (сложение, вычитание, умножение, деление), то нечеткой переменной η должна быть поставлена в соответствие функция принадлежности $\mu_\eta(y) = \sup\limits_{x_1 \circ x_2 = y} \{\mu_{\xi_1}(x_1)\cdot\mu_{\xi_2}(x_2)\}$.

При выполнении данных требований достигаются заявленные выше свойства. Функция $\mu_{\xi_i}(x_i)$ полностью описывается двумя параметрами: величинами Δ_{x_i} и s, которые при конструировании функции принадлежности определяются по имеющимся сведениям о характеристиках погрешности величины x_i. В качестве Δ_{x_i}



Необходимый вид функции принадлежности $\mu_{\xi_i}(x_i)$ для выраженной нечеткой переменной ξ_i погрешности исходных данных x_i

необходимо брать предел допускаемых значений для систематической составляющей погрешности x_i, а величина s выбирается таким образом, чтобы интервал, образуемый пересечением прямой $\alpha = \alpha_0$ с функцией $\mu_{\xi_i}(x_i)$, имел ширину $[-\Delta_{x_i} - k \cdot \sigma_{x_i}, \Delta_{x_i} + k \cdot \sigma_{x_i}]$, где k и α_0 задаются (например, соответственно 2,0 и 0,05).

В формуле (3) осталось нераскрытым, каким образом получать значения частных производных $\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, x_2, ..., x_n)$ от функции $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, представленной программным кодом.

Чаще всего в этом случае прибегают к методу конечных разностей. Однако его результаты всегда носят приближенный характер и требуют проверки адекватности полученных результатов.

Так как функция $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$ выражена программным кодом, то подразумевает аналитическую запись и, соответственно, аналитическую запись для любой частной производной. Однако соответствующее исследование, доставляющее точное значение производной, весьма трудоемко. Желательно по возможности выполнить его автоматически. Это достигается с помощью следующего метода [13], позволяющего вместе со значением функции одновременно получать точные значения любой ее частной производной.

На практике работа компьютерных программ, выполняющих математическую обработку исходных данных $x_1, x_2, ..., x_n$, сводится к последовательному выполнению элементарных арифметических операций (сложение, вычитание, умножение и деление) и вызовам элементарных функций – математических примитивов из подключаемых стандартных библиотек. Та или иная последовательность перечисленных математических действий может быть выбрана в программе адаптивно: на основе логических операций сравнения начальных данных либо промежуточных результатов с известными константами.

Таким образом, фактическое выполнение расчетов сводится к вычислению значения сложной функции $y = f(g_1(g_2(...g_n(x_1, x_2, ..., x_n)...), x_1, x_2, ..., x_n), x_1, x_2, ..., x_n)$, начинающемуся вычислением значения $y_n = g_n(x_1, x_2, ..., x_n)$ и продолжающемуся вычислениями $y_{n-1} = g_{n-1}(y_n, x_1, x_2, ..., x_n)$, $y_{n-2} = g_{n-2}(y_{n-1}, x_1, x_2, ..., x_n)$ и т. д. В то же время значение частной производной $\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, x_2, ..., x_n)$ этой сложной функции может быть вычислено следующим образом:

$$\frac{dg_n}{dx_i}(x_1, x_2, ..., x_n) = \frac{\partial g_n}{\partial x_i}(x_1, x_2, ..., x_n),$$

$$\frac{dg_{n-1}}{dx_i}(y_n, x_1, x_2, ..., x_n) = \frac{\partial g_{n-1}}{\partial y_n}(y_n, x_1, x_2, ..., x_n) \times$$

$$\times \frac{dg_n}{dx_i}(x_1, x_2, ..., x_n) + \frac{\partial g_{n-1}}{\partial x_i}(y_n, x_1, x_2, ..., x_n),$$

$$\frac{dg_{n-2}}{dx_i}(y_{n-1}, x_1, x_2, ..., x_n) =$$

$$= \frac{\partial g_{n-2}}{\partial y_{n-1}}(y_{n-1}, x_1, x_2, ..., x_n) \cdot \frac{dg_{n-1}}{dx_i}(x_1, x_2, ..., x_n) +$$

$$+ \frac{\partial g_{n-2}}{\partial x_i}(y_{n-1}, x_1, x_2, ..., x_n)$$

и т. д. Здесь символом $\frac{d}{dx_i}$ обозначена полная частная производная по аргументу x_i. На каждом шаге текущая функция $y_j = g_j(y_{j-1}, x_1, x_2, ..., x_n)$ зависит от интересующей нас переменной x_i непосредственно и опосредованным образом через вычисленное на предыдущем шаге значение y_{j-1}. Существует возможность сопроводить j-й шаг вычисления сложной функции вычислением значения частной производной функции g_{n-j} по заранее маркированной переменной x_i. Для этого требуется лишь формально указать, как вычислять производную при арифметических действиях (сложение, вычитание, умножение и деление) и при вычислении элементарных функций одной переменной (синус, косинус, экспонента и т. д.):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(f_1(x_i) \pm f_2(x_i)) = \frac{\partial f_1}{\partial x_i}(x_i) \pm \frac{\partial f_2}{\partial x_i}(x_i),$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(f_1(x_i) \cdot f_2(x_i)) = \frac{\partial f_1}{\partial x_i}(x_i) \cdot f_2(x_i) + f_1(x_i) \cdot \frac{\partial f_2}{\partial x_i}(x_i),$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{f_1(x_i)}{f_2(x_i)}\right) = \frac{\frac{\partial f_1}{\partial x_i}(x_i) \cdot f_2(x_i) - f_1(x_i) \cdot \frac{\partial f_2}{\partial x_i}(x_i)}{f_2^2(x_i)},$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\sin(x_i)) = \cos(x_i), \quad \frac{\partial}{\partial x_i}(\cos(x_i)) = -\sin(x_i),$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\exp(x_i)) = \exp(x_i) \text{ и т. д.}$$

В качестве иллюстрации рассмотрим пример. Пусть $y = f(x_1, x_2) = x_1 \cdot \cos(x_1 + x_2) - x_2$. Требуется автоматически вычислить значение производной $\frac{df}{dx_1}(x_1, x_2)$. Тогда в соответствии с приведенными выше формулами:

$$y_4 = g_4(x_1, x_2) = x_1 + x_2, \quad \rightarrow \quad \frac{dg_4}{dx_1}(x_1, x_2) = 1 + 0,$$

$$y_3 = g_3(y_4, x_1, x_2) = \cos(y_4), \quad \rightarrow \quad \frac{dg_3}{dx_1}(x_1, x_2) = -\sin(y_4) + 0,$$

$$y_2 = g_2(y_3, x_1, x_2) = x_1 \cdot y_3 \quad \rightarrow \quad \frac{dg_2}{dx_1}(x_1, x_2) = x_1 \cdot \frac{dg_3}{dx_1}(x_1, x_2) + y_3 \cdot 1,$$

$$y_1 = g_1(y_2, x_1, x_2) = y_2 - x_2 \quad \rightarrow \quad \frac{dg_1}{dx_1}(x_1, x_2) = \frac{dg_2}{dx_1}(x_1, x_2) + 0.$$

По завершению расчетов получаем $y = x_1 \cdot \cos(x_1 + x_2) - x_2$ и $\frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1, x_2) = x_1 \times$ $\times(-\sin(x_1 + x_2)) + \cos(x_1 + x_2)$.

Из изложенного выше видно, что для автоматического дифференцирования программ в их исходный код необходимо внести изменения, заключающиеся в замене необходимых вычислений с числами с плавающей точкой на такие же вычисления, но с новым типом данных, хранящих как промежуточное значение текущей операции, так и промежуточное значение частной производной этой операции. Изменения в исходном коде программы заключаются лишь в подключении программной библиотеки, содержащей правила работы с указанным новым типом, и в смене типов данных при объявлении переменных. Метод автоматического дифференцирования реализуется без изменений порядка вычислений в программе.

Случай, когда анализируемая функция $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$ реализована программой, содержащей условные переходы, является особым. В его рамках метод автоматического дифференцирования позволяет находить только односторонние производные по ту или иную сторону от точки разрыва. В некоторых ситуациях этого достаточно, но в целом вопрос, связанный с условными переходами в программах вычислений, требует отдельного исследования.

Подводя итог, отметим, что за счет дифференцирования выполняется линеаризация алгоритма в точках, соответствующих исходным данным. Эта линеаризация позволяет выполнять простые преобразования нечетких переменных и их функций принадлежности. В конечном итоге за счет этой комбинации автоматического дифференцирования и аппарата нечетких переменных на выходе программы получается не только результат вычислений, но и интервальная оценка погрешности этого результата. Тем самым предлагаемый комбинированный метод удачно сочетает в себе достоинства используемых в его составе приемов и минимизирует влияние их недостатков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Желнов, Ю.А.** Точностные характеристики управляющих вычислительных машин [Текст] / Ю.А. Желнов. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

2. **Слаев, В.А.** Аттестация программного обеспечения, используемого в метрологии: Справочная книга [Текст] / В.А. Слаев, А.Г. Чуновкина. –СПб.: Профессионал, 2009.

3. **Солопченко, Г.Н.** Принципы метрологического автосопровождения вычислений в компьютерных измерительных информационных технологиях [Текст]/ Г.Н. Солопченко // SCM'99: Сб. докл. II Междунар. конф. Т. 1. –СПб.: СПбГЭТУ, 1999.

4. **Солопченко, Г.Н.** Обязательные требования к программному обеспечению компьютерных измерительных информационных технологий [Текст] / Г.Н. Солопченко // SCM-2000: Сб. докл. Междунар. конф. –СПб.: СПбГЭТУ, 2000.

5. **Семенов, К.К.** Теоретические предпосылки реализации метрологического автосопровождения программ обработки результатов измерений [Текст] / К.К. Семенов, Г.Н. Солопченко // Измерительная техника. –2010. –№ 6. –С. 9–14.

6. **Крейнович, В.Я.** Оценка погрешности результата косвенных измерений с помощью вычислительного эксперимента [Текст] / В.Я. Крейнович, М.И. Павлович// Измерительная техника. –1985. –№ 3. –С. 11.

7. **Солопченко, Г.Н.** Представление измеряемых величин и погрешностей измерений как нечетких переменных [Текст] / Г.Н. Солопченко // Измерительная техника. –2007. –№ 2. –С. 3.

8. **Семенов, К.К.** Аппарат нечетких переменных в задаче метрологического автосопровождения вычислений [Текст] / К.К. Семенов // XXXVIII неделя науки СПбГПУ: Матер. Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. студентов

и аспирантов. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.

9. **Nguen, H.T**. Why two sigma? A theoretical justification [Текст] / Hung T. Nguen [et al.] // Soft Computing in Measurement and Information Acquisition; Ed. L. Reznik, V. Kreinovich. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. –P. 10–22.

10. **Новицкий, П.В.** Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф – Л.: Энергоатомиздат, 1991.

11. **Резник, Л.К.** Математическое обеспечение обработки нечеткой информации экспериментатора в ИВК [Текст] / Л.К. Резник // Архитектура, модели и программное обеспечение ИИС и ИВК: Тр. ВНИИЭП. –Л.: ВНИИЭП, 1983.

12. **Борисов, А.Н.** Обработка нечеткой информации в системах принятия решений [Текст] / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьев [и др.]. –М.: Радио и связь, 1989.

13. **Griewank, A.** On Automatic Differentiation [Текст] / A. Griewank // Mathematical Programming: Recent Developments and Applications; Ed. M. Iri, K. Tanabe. –Kluwer Academic Publisher, 1989. –P. 83–108.

Управление в социальных и экономических системах

УДК 351.713

Н.А. Руденко, М.П. Комаров

ОПТИМИЗАЦИЯ НАЛОГОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ

Многие организации обратились к теме оптимизации своей деятельности с помощью проектов по описанию и анализу бизнес-процессов, продуктов (услуг), организационной структуры. Важность и преимущества качественно выстроенных бизнес-процессов отмечаются во многих работах, посвященных реинжинирингу бизнес-процессов. Сегодня уже можно говорить о накоплении как положительного, так и отрицательного практического опыта специалистами данной сферы в бизнесе, а, значит, и о появлении пространства для обсуждения. Вместе с тем, в российских органах государственного управления процессный подход практически не применяется. Однако оценка деятельности государственных органов по определенным показателям, применение в практике государственных органов моделей организационного проектирования, взаимодействие органов исполнительной власти как бизнес-подразделений уже известны в мире.

В настоящей статье будем исходить из того, что процессный подход к управлению предпринимательскими компаниями может быть распространен и на органы государственного управления, конкретно, на налоговые органы. С точки зрения системного подхода, налоговые органы можно рассматривать как сложную общественно-экономическую систему с множеством прямых и обратных связей, в которой деятельность (налоговое администрирование) трактуется как процесс, преобразующий ресурсы в заданные результаты. Однако некоторые процессы налогового администрирования оказываются недостаточно организованы и низкоэффективны. Так, например, на современном этапе развития налоговых органов существует ряд системных проблем, к ним относятся: непрерывное увеличение налогового документооборота, усложнение и постоянное изменение процедур налогового законодательства, огромные трудозатраты на обработку налоговых документов, низкая эффективность контрольной работы и др.

Обеспечить качество организации процессов и управлять невозможно в условиях их непрозрачности и неопределенности обязанностей участников процессов и лимитов принятия решений. Вместе с тем необходимо иметь четкое представление о целях, которые должны быть достигнуты в результате реализации процессов, т. е. должна быть описана структура целей, степень достижения которых может быть количественно измерена. Следовательно, необходимыми становятся исследование и оптимизация процессов. В ходе исследования определяется текущее состояние процессов и выявляются проблемы их организации. Далее следует оптимизация процессов, требующая продуманного системного подхода.

Ниже представлена методика, обобщающая и систематизирующая теоретические знания, необходимые для оптимизации процессов.

Оптимизация процессов предполагает последовательно-параллельное выполнение следующих этапов (рис. 1):

1) формулирование целей оптимизации процессов;

2) выделение и идентификация процессов;

3) моделирование процессов;

4) определение критериев оптимизации процессов;

5) проектирование и оптимизация процессов;

6) регламентация процессов.

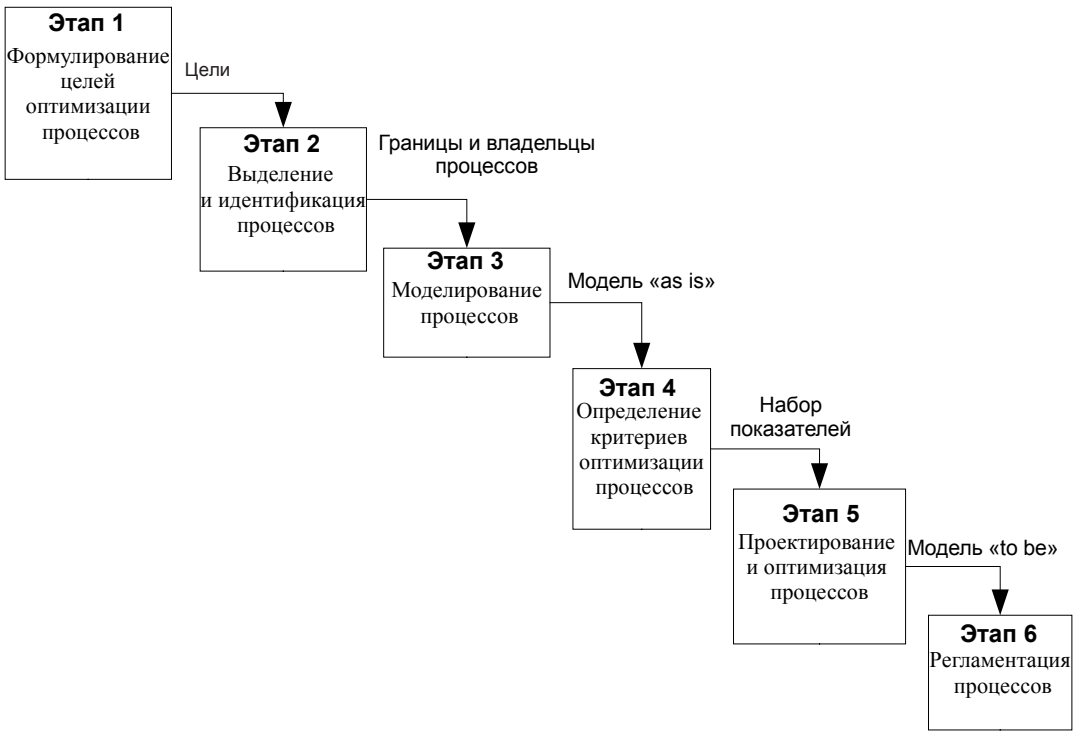


Рис. 1. Этапы оптимизации процессов налогового администрирования

Этап 1. Формулирование целей оптимизации процессов.

Перед началом проведения оптимизации процессов необходимо четко определить цели, задать основные параметры, которым должны соответствовать процессы «как должно быть» (to be). При проведении оптимизации процессов налогового администрирования могут быть поставлены следующие цели:

ориентация процессов на налоговую политику государства (соответствие реализуемых процессов поставленным целям);

разработка оптимальной схемы распределения полномочий и ответственности;

повышение эффективности организации процессов в налоговом органе (с точки зрения использования трудовых и информационных ресурсов, эффективности вовлечения государственных служащих и т. п.).

Указанные цели могут дополняться специфическими целями, выражающими особенности текущей ситуации.

От целей оптимизации процессов зависят выбор методов и баланс их применения при формировании новых схем процессов.

Этап 2. Выделение и идентификация процессов.

Все процессы организации можно подразделить на две группы: процессы подразделений и сквозные процессы.

Процесс подразделения – это процесс, ограниченный рамками одного структурного подразделения организации. А все ресурсы, необходимые для выполнения процесса, находятся под управлением руководителя структурного подразделения, при этом он же является владельцем процессов подразделения. Сквозной процесс – процесс, полностью или частично включающий деятельность, выполняемую структурными подразделениями организации, имеющими различную функциональную подчиненность [5]. Очевидно, что должны исследоваться обе группы процессов в зависимости от поставленных целей и особенностей организации.

Важно не пытаться поменять все процессы (все виды деятельности) сразу, а распределить их по группам важности. Первоочередной оптимизации подлежат ключевые процессы, изменения в которых принесут наибольшую пользу. Критерием для выделения ключевых процессов (областей деятельности) может служить следующее.

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

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

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

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

Определение владельца – это основа процессного управления и необходимое условие его успешной реализации. Без лица, ответственного за процесс в целом, невозможно успешно осуществлять управление им. Владелец процесса отвечает за ход и результат всего процесса. Учитывая, что процессы пронизывают всю организацию, это предполагает ответственность за работу различных функциональных подразделений. Владелец процесса должен также обеспечивать эффективность, производительность и адаптируемость как процесса в целом, так и его составных частей, для этого владелец процесса должен использовать показатели эффективности процесса.

Обеспечение эффективности процесса на внешнем к процессу уровне включает в себя четкое представление о потребностях конечного потребителя, об их обоснованности и способах их обеспечения. Внутри процесса обеспечение эффективности включает понимание промежуточных потребностей, всесторонний анализ этих потребностей с учетом возможностей их удовлетворения наилучшим способом.

Обеспечение производительности означает разрешение проблем главным образом на стыке между разными подразделениями, а также обеспечение использования на стыке подразделений единых показателей для оценки работы.

Обеспечение адаптируемости означает постоянное обеспечение соответствия между целями организации и процессами ее достижения. Это подразумевает проведение постоянного анализа данного соответствия и корректировку процесса или подпроцессов, составляющих его.

Определение границ процесса необходимо для того, чтобы четко отделить функции и исполнителей одного процесса от других. Деятельность налогового органа представляет собой сложный набор пересекающихся процессов, поэтому необходимо однозначно определить, что включается в процесс, а что остается за его границами. Границы определяют начало и конец процесса. Для каждого процесса существуют границы входа и выхода [4].

Наиболее часто проблемы возникают именно при реализации сквозных процессов. Для устранения подобных проблем необходимо разработать инструкции взаимодействия на основе требований, предъявляемых к выполнению процесса.

Этап 3. Моделирование процессов.

Важное средство, используемое при оптимизации процессов, – представление в виде схем и моделей, позволяющих увидеть все части процесса и проанализировать, насколько эти части соответствуют друг другу. Схемы и модели дают возможность увидеть слабые стороны процессов, излишние сложности, а также их сильные стороны, которые необходимо сохранить в новом процессе. Также они позволяют рассматривать разные альтернативные варианты и сравнивать их, решая, какой из них выбрать. Схемы формируются по принципу «сверху–вниз», т. е. выделенные процессы последовательно декомпозируются на составляющие [3].

Этап 4. Определение критериев оптимизации процесса.

Для каждого процесса необходимо определить направления его оптимизации и составить перечень показателей его эффективности. Для этого следует уточнить:

какие из целей деятельности органа поддерживает данный процесс;

к какому блоку деятельности он относится;

на достижение каких показателей налогового органа в ФНС он влияет.

Таким образом, можно получить перечень основных показателей процесса. Основные показатели могут быть дополнены операционными, такими, как длительность процесса и/или отдельных подпроцессов, равномерность использования ресурсов, количество ошибок, возникающих на различных этапах процесса, и др.

Вместе перечень основных и операционных показателей составляет набор показателей процесса.

Описав владельца процесса, его границы, создав модель «как есть» (as is) и определив критерии оптимизации, следует перейти к проектированию схемы процесса, соответствующего всем требованиям, процесса «как должно быть» (to be).

Этап 5. Проектирование и оптимизация процессов.

Создание новой схемы процесса «как должно быть» (to be) производится на базе структурного анализа существующих процессов «как есть» (as is).

Ниже приведены основные методы, используемые при создании схемы процесса «как должно быть» (to be). Частично описание этих методов встречается в литературе у российских [2] и зарубежных авторов [1]. При использовании этих методов необходимо постоянно помнить о целях и направлениях совершенствования, о показателях процессов, сформулированных на предыдущих этапах. Поставленные цели определяют выбор методов оптимизации и баланс при их применении.

Методы оптимизации процессов налогового администрирования можно разделить на четыре группы по направлениям их влияния (рис. 2):

оптимизация функционального состава;

оптимизация затрат информационных ресурсов;

оптимизация затрат трудовых ресурсов;

оптимизация затрат времени.

Рассмотрим приведенные выше методы более подробно.

1. Оптимизация функционального состава.

• Устранение дублирования функций. Ответственность за реализацию всех составляющих процесса должна быть четко обозначена. У каждой функции, входящей в его состав, должен быть определен исполнитель, т. е. лицо, выполняющее эту функцию, или группа лиц, отвечающая за нее совместно. Дублирование возникает, когда функцию выполняют различные сотрудники по одним и тем же правилам независимо друг от друга.

• Устранение «точек безответственности». Под «точкой безответственности» понимается функция, ответственность за которую не несет ни один из исполнителей.

• Организация «точек контроля». При создании новой схемы процесса «как должно быть» (to be) необходимо предусмотреть точки контроля, позволяющие вносить изменения в результат внутри самого процесса его создания. Точка контроля – это работа, цель которой – проверка соответствия результатов определенной работы в процессе сформулированным требованиям к ее результату. В случае обнаружения несоответствия организуется обратная связь, в рамках которой результат должен быть скорректирован. Если процесс не имеет обратной связи, то он неуправляем. Следовательно, в точке контроля процесс может быть заблокирован для дальнейшего исполнения, а также может быть возвращен на одну из предыдущих стадий.

2. Оптимизация затрат информационных ресурсов.

• Оптимизация количества входов и выходов процесса. Для каждого входа необходимо проанализировать его востребованность в процессе. Например, информация из одного документа дублируется в других документах. Часть входных/выходных потоков может быть сгруппирована (объединена в пакеты).

• Минимизация устной информации. Особенность устной информации – ее искажение при передаче от одного участника процесса к другому. Это свойство особенно остро проявляется при передаче сложной информации управленческого характера. Статистика утверждает, что при передаче устной информации в два этапа ее искажение достигает 50 %. Необходимо, чтобы в рамках процессов информация документировалась. С одной стороны, это приводит к увеличению бюрократии

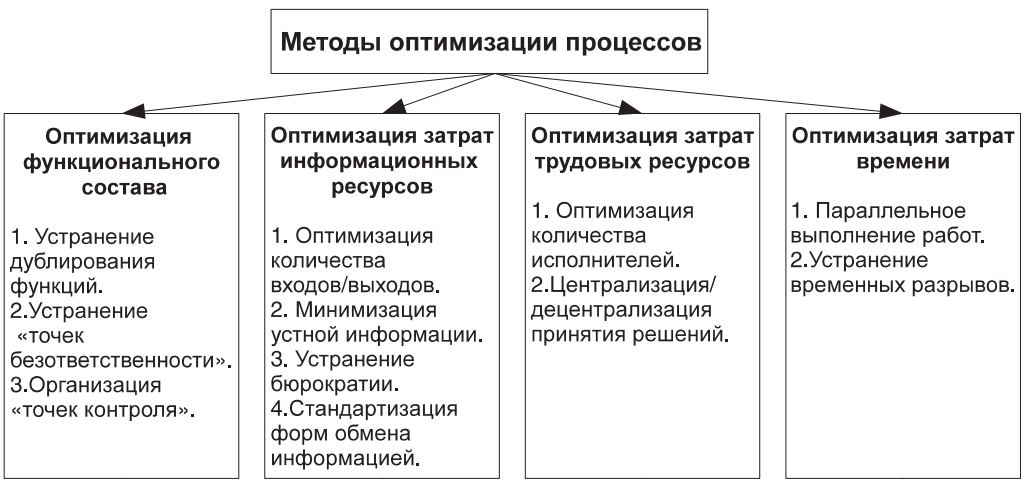


Рис. 2. Методы оптимизации процессов налогового администрирования

и замедляет темп выполнения процессов, но, с другой, позволяет повысить ответственность всех участников процесса, т. к. их деятельность фиксируется, и в случае возникновения нежелательных результатов и последствий существует информационная база для анализа и выявления причин и ответственных. Чем большее число участников задействованы в процессе, тем актуальнее необходимость документирования информации.

• Устранение бюрократии. Бюрократические этапы процесса – это проверки, разрешения, хранения, ведение реестров, копирование, утверждения. Зачастую в налоговом органе эти этапы регламентированы, однако может быть поставлена под вопрос необходимость и ценность таких этапов и может быть доказано, что процесс эффективен и без них. Ликвидация излишней бюрократии должна сочетаться с разработкой эффективных схем делегирования полномочий и принятия решений в рамках выделенных лимитов ответственности.

• Стандартизация форм обмена информацией. Представление информации в удобном для анализа виде влияет на скорость оценки ситуации и, следовательно, повышает качество (т. к. в форме собраны все необходимые параметры для принятия решения) и оперативность при принятии решений. При разработке форм представления информации необходимо учитывать интересы всех заинтересованных групп лиц.

3. Оптимизация затрат трудовых ресурсов.

• Оптимизация количества исполнителей процесса. С одной стороны, чем меньше исполнителей участвует в процессе, тем легче координировать их работу. Но, с другой, встает вопрос об их квалификации и способности выполнить весь процесс от начала до конца, а также об эффективности такого исполнения. Современный подход к организации процессов говорит о важности участия в процессах специалистов широкого профиля, способных выполнить большой круг задач, но при этом не должно снижаться качество выполнения каждой из них. Поэтому оценка возможности совмещения функций нескольких исполнителей одним человеком базируется на анализе требований к исполнителям для реализации их функциональных обязанностей в процессе и прогнозируемой пользе такого совмещения. Совмещение функций может означать, что потребуется дополнительная подготовка или переориентация специалистов.

• Централизация и децентрализация принятия решений. Степень централизации/децентрализации принятия решений в налоговых органах не только зависит от важности и частоты принятия решений, но и жестко регламентирована ФНС. Необходимо найти компромисс между централизацией и децентрализацией принятия решений, между сосредоточением и рассредоточением регулирующих центров.

4. Оптимизация затрат времени.

• Параллельное выполнение работ. В современном мире длительность процессов играет решающую роль, метод параллельного выполнения работ позволяет сократить общее время выполнения процесса. Преимущество последовательной цепочки выполнения работ – простота управления. Все работы могут выполняться одним исполнителем, который будет полностью в курсе всех результатов и особенностей реализации функций. Параллельное выполнение работ позволяет сократить длительность, но требует одновременного вовлечения большего количества исполнителей. Для оценки обоснованности последовательного выполнения работ необходимо проанализировать востребованность результатов выполнения предыдущей функции для реализации последующей.

• Метод устранения временных разрывов. Общее время выполнения процесса складывается из времени, затрачиваемого собственно на выполнение функций, и времени на простои между функциями. В некоторых случаях соотношение времени выполнения функций и простоев может достигать 20 % к 80 %. Простои или временные разрывы выполнения процессов должны быть идентифицированы, и для каждого из них должен быть разработан метод его преодоления.

Этап 6. Регламентация процессов.

После завершения этапа оптимизации можно выпускать документацию по процессу, т. е. переходить к его регламентации. Результатом этого этапа может быть административный регламент или другая документация, установленная внутренними приказами налогового органа.

Само наличие точной и прослеживаемой документации на процесс способствует его эффективному исполнению и возможности контроля. Внедрение стандартов государственных услуг и административных регламентов предполагает совершенствование существующих и создание новых эффективных механизмов деятельности налогового органа.

Таким образом, процессный подход может быть положен в основу построения эффективной модели налогового администрирования. При этом эффективность процессов можно рассматривать с двух сторон. С одной стороны, – это результативность, т. е. способность процесса давать запланированный результат на выходе с теми требованиями, которые к нему были предъявлены. Именно ориентация на результат, который можно оценить и за который кто-то несет ответственность, должна стать основой процессной группировки функций, критерием выделения границ процесса. С другой стороны, – минимизация затрат ресурсов, используемых для достижения этого результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ван Нимвеген, Х.** Оптимизация бизнес-процессов (документирование, анализ, управление, оптимизация) [Текст] / Х. Ван Нимвеген, Д. Харрингтон, К.С. Эсселинг. –СПб.: Азбука, 2002. –С. 43–45.

2. **Ковалев, С.М.** Методы анализа и оптимизации бизнес-процессов [Текст] / С.М. Ковалев, В.М. Ковалев// Консультант директора. –2005. –№ 7 (234).

3. Методология функционального моделирования [Текст] / Р50.1.028-2001. –М.: Госстандарт России, 2000. –С. 17.

4. **Ефимов, В.В.** Описание и улучшение бизнес-процессов: Учеб. пособие [Текст] / В.В. Ефимов. –Ульяновск: УлГТУ, 2005. –С. 37–44.

5. **Репин, В.В.** Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов [Текст] / В.В. Репин, В.Г. Елиферов. –М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. –С. 208.

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

УДК 004.4'236

А.С. Кузенкова, А.О. Дерипаска, К.С. Таран, А.В. Подкопаев, Ю.В. Литвинов, Т.А. Брыксин

СРЕДСТВА БЫСТРОЙ РАЗРАБОТКИ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ РЕШЕНИЙ В METACASE-СРЕДСТВЕ QREAL

Парадигма предметно-ориентированного моделирования основывается на том факте, что создание нового специального языка и решение с его помощью поставленной практической задачи можно во многих случаях осуществить быстрее, чем решать ту же задачу с помощью языков общего назначения (подробнее про преимущества и ограничения, появляющиеся при использовании DSM-подхода см. [1]). Имея соответствующую инструментальную поддержку, данный подход позволяет значительно повысить уровень абстракции, на котором работают проектировщики, и увеличить производительность их труда в несколько раз [2].

Создание инструментальных средств поддержки для нового языка вручную по трудоемкости превосходит сложность решения типичных задач. В этом случае применение предметно-ориентированного моделирования было бы экономически нецелесообразно. Однако существуют технологии, позволяющие создавать визуальные языки автоматизированно, быстро и эффективно. Наиболее распространенными примерами таких средств являются Miscrosoft DSL Tools, Eclipse GMF, MetaEdit+.

Инструментарий Microsoft DSL Tools предназначен для создания редакторов визуальных предметно-ориентированных языков, встроенных в среду Visual Studio. Процесс реализации нового визуального языка состоит в задании его метамодели на специальном визуальном языке, генерации кода редактора на C# и внесении в сгенерированный код необходимых изменений вручную. В целом, DSL Tools хорошо подходит для создания несложных визуальных языков, которые будут использованы внутри Visual Studio, но отдельный редактор с помощью DSL Tools не создать. Также достаточно сложные редакторы требуют больших объемов ручного кодирования на C#.

Технология Eclipse GMF (Graphical Modelling Framework) создается на базе среды разработки с открытым исходным кодом Eclipse. Технология основана на использовании двух библиотек: Eclipse Modeling Framework (EMF) и Graphical Editing Framework (GEF). Для того чтобы разработать новый редактор визуального языка в GMF, надо выполнить следующие шаги: разработать доменную модель (или абстрактный синтаксис разрабатываемого языка), графическую модель (конкретный синтаксис), модель инструментов (описание панели инструментов редактора), установить соответствие между этими тремя моделями, а затем сгенерировать целевой язык. Технология достаточно мощная, но сложная как в освоении, так и в использовании, поэтому мало подходит для небольших проектов.

Средство MetaEdit+ является активно используемым [1] в промышленных разработках средством предметно-ориентированного моделирования, разрабатываемым компанией MetaCASE уже на протяжении двадцати лет. Поддержка нового языка в этом инструменте тоже начинается с определения метамодели языка, после этого можно воспользоваться встроенным графическим редактором и определить внешний вид элементов. Имеется возможность задать ограничения на модели, создаваемые на новом языке, которые не выражаются синтаксисом, и определить правила генерации исходного кода по диаграмме на специальном текстовом языке. Средство закрытое и довольно дорогостоящее, что затрудняет его использование в небольших проектах.

Рассмотрение существующих решений показывает, что имеется потребность в открытых средствах метамоделирования, несложных в освоении и использовании, подходящих для небольших и средних компаний.

Инструментальные средства метамоделирования в QReal

Разработкой технологии QReal [3] занимается научно-исследовательская группа изучения технологий визуального моделирования кафедры системного программирования Санкт-Петербургского

государственного университета под руководством профессора А.Н. Терехова. QReal задумывалась как развитие технологии REAL [4], основывающаяся на использовании более современной версии языка UML – 2.0. При этом на разрабатываемые средства изначально накладывались требования многоплатформенности (возможность работы на операционных системах MS Windows и Linux), поддержки многопользовательской разработки, возможности удаленного доступа к репозиторию системы и наличие другой актуальной для современных сред визуальной разработки ПО функциональности.

Однако скоро стало очевидным, что создание вручную большого числа редакторов диаграмм – довольно утомительное занятие, к тому же получаемая система оказывается плохо масштабируемой. Для упрощения труда программистов была разработана следующая схема: каждая диаграмма языка описывается на специальном метаязыке в XML-файлах, по которым генерируется код на C++, компилирующийся в динамическую библиотеку и подключаемый к основной части системы как плагин. Инфраструктура QReal включает в себя абстрактное ядро, реализующее общую для всех редакторов и элементов диаграмм функциональность, а подключаемые модули при этом отвечают за специфику конкретных редакторов. Так, каждый такой модуль инкапсулирует в себе информацию о наборе объектов, допустимых на диаграммах данного типа, позволяет правильно интерпретировать хранящиеся в репозитории значения атрибутов элементов, предоставляет информацию о логических правилах размещения элементов на соответствующих типах диаграмм и т. д. Такая схема оказалась удобной и позволила не только задавать редакторы диаграмм UML, но и описывать другие существующие визуальные языки с графовой структурой, например, BPEL (Business Process Execution Language). Также появилась возможность генерировать инструментальную поддержку и для новых визуальных языков.

Такой способ создания новых редакторов показал себя удобным в работе и более эффективным по сравнению с ручным кодированием, но несмотря на это имел ряд принципиальных недостатков, связанных с необходимостью работы с большим объемом текстовых данных. Заметим, что XML-описания редакторов можно генерировать по визуальным моделям, тем самым применив технологию предметно-ориентированной разработки по отношению к себе. В связи с этим в QReal также добавлены и визуальные инструменты поддержки метамоделирования. Для текстового метаязыка создано графическое представление (визуальный метаязык) и реализующий его графический редактор (или метаредактор). Рассмотрим метаязык и метаредактор подробнее.

Подключаемый модуль может содержать несколько визуальных языков. Каждый язык определяется набором своих элементов и связей между ними. Основные абстракции делятся на графические и неграфические (соответственно, имеющие и не имеющие графическое представление в редакторе). В метаредакторе графическими являются такие сущности, как «Элемент» и «Связь», обозначающие, соответственно, элемент визуального языка и связь между элементами. Примером неграфической сущности является «Перечислимый тип данных» (enum), обозначающий перечень значений, которые могут использоваться для указания свойств элементов. Также с помощью метаредактора можно задавать отношения наследования между элементами на диаграмме и отношения допустимой вложенности одних элементов в другие. Эти отношения на диаграмме указываются направленными ассоциациями. Помимо этого имеется возможность задавать некоторые дополнительные свойства, поддержка которых осуществлена в QReal (способность «вытягивать» из элементов определенные связи, сортировать вложенные элементы и уметь их скрывать для элементов-контейнеров и другое).

В QReal для разработанного метаязыка была создана инструментальная поддержка и соответствующая инфраструктура, обеспечивающие сквозной процесс создания графических редакторов: разработчик может спроектировать новый визуальный язык, скомпилировать подключаемый модуль соответствующего графического редактора и подключить его к QReal, не выходя из системы. Кроме этого реализован разбор существующих XML-файлов и их визуализация с помощью метаредактора, тем самым помимо создания новых визуальных языков пользователь может редактировать уже имеющиеся. Таким образом, парсер XML-файлов совместно с генератором в XML-формат обеспечивают совместимость двух используемых в QReal способов задания метамоделей – в текстовом и графическом виде.

Помимо абстрактного синтаксиса важно уметь задавать, как будут внешне выглядеть элементы

разрабатываемого языка. Для этого в QReal реализован редактор формы фигур, который представляет собой по сути векторный графический редактор, но обладает рядом особенностей, отражающих специфику его использования. Например, существует возможность связи текста, отображаемого на фигуре, со свойствами элемента в метамодели, что делает возможным отображение и редактирование логических свойств прямо на диаграмме. Важно иметь возможность импортирования готовых изображений, это увеличивает наглядность визуального языка.

Поддержка эволюции предметно-ориентированных языков

В течение жизненного цикла предметно-ориентированного решения используемые визуальные языки могут меняться. К примеру, это может произойти вследствие изменения самой предметной области или в связи с рефакторингом самого языка вследствие накопленной статистики его применения (например, удаление неиспользуемых элементов, добавление элементов для типичных шаблонов проектирования и т. д.). В итоге получается ситуация, когда уже созданные с помощью некоего языка модели оказываются несовместимыми с текущей метамоделью языка. Появляется задача адаптации созданных моделей под новые версии языка и поддержка эволюции языков в общем.

На данный момент в QReal эта проблема частично решена отслеживанием произошедших в метамодели изменений. В процессе редактирования метамодели какого-либо языка фиксируются все вносимые в него изменения. Когда происходит загрузка моделей, созданных с помощью этого языка, система проверяет, не изменился ли язык, и как только сталкивается с какой-либо ошибкой, связанной с загрузкой диаграммы (к примеру, в языке более не существует требуемого элемента), запускается механизм автоматического восстановления модели. Этот механизм воспроизводит в хронологическом порядке все запротоколированные изменения языка (например, если тип элемента A был переименован в B, то QReal находит в сохраненных моделях все существующие в модели элементы с типом A и заменяет их тип на B). Некоторые более сложные изменения, связанные с ассоциациями между элементами и ссылочными свойствами, требуют дополнительного обхода элементов.

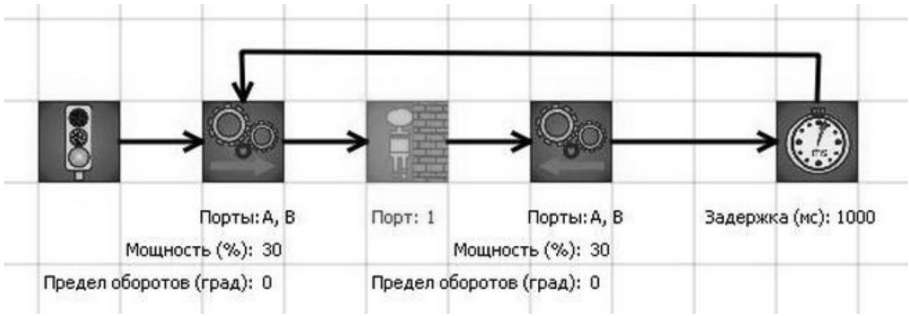
Этот способ покрывает большую часть возникающих конфликтов между существующей версией языка и версией, требуемой имеющимися моделями. Однако он не гарантирует полного решения задачи. В дополнение к нему существует возможность прямого указания системе, как обрабатывать коллизии с помощью специального вида патчей и/или загрузки нужной метамодели языка. В будущем планируется реализация механизмов разрешения конфликтов, не использующих протоколирование, а анализирующих свойства модели и языка.

Средства быстрого создания генераторов

Любое CASE-средство, используемое при разработке программного обеспечения, нацелено в первую очередь на генерацию некоторых артефактов – исходного кода, документации, конфигурационных файлов, скриптов сборки и установки ПО и т. д. В свою очередь metaCASE-средства, предоставляющие возможности для быстрого создания инструментальных средств поддержки визуальных языков, должны иметь и механизмы быстрой разработки подобных генераторов. В QReal данная задача решается путем создания предметно-ориентированного языка описания генераторов, позволяющего задавать правила обхода моделей и шаблоны кода, соответствующие тем или иным элементам.

Стоит заметить, что процесс написания генераторов при заданном API репозитория и прочих компонент CASE-системы содержит в себе большое число рутинных действий: получение свойств элементов, итерация по связям, ассоциированным с выбранным элементом, обход элементов в контейнере и т. п. Вполне логично, что выделение подобных действий в отдельные конструкции языка сокращает время разработки генератора, делает его код более читаемым. К тому же, уровень абстракции подобного кода повышается, т. к. разработчик начинает думать о том, что должен делать его генератор, а не как это выразить в терминах C++ и/или API QReal.

На данный момент в QReal создан текстовый язык, инкапсулирующий в себе большинство конструкций для удобной навигации по моделям и позволяющий задавать правила генерации кода при их обходе. В дальнейшем эти правила интерпретируются для конкретных пользовательских диаграмм, порождая соответствующий им код на выбранном целевом языке.



Пример модели на языке Lego Mindstorms NXT

Апробация

Представленный в статье метаредактор опробован на нескольких примерах. Один из них – язык для программирования роботов Lego Mindstorms NXT. Такие роботы и визуальные средства для их программирования сейчас активно внедряются в школы для обучения информатике с 5–6 классов, где робот используется как некая осязаемая замена исполнителю учебных языков типа «черепашки» LOGO. Язык программирования роботов – хороший пример визуального предметно-ориентированного языка. Программа на этом языке состоит из блоков, каждый из которых представляет элементарную команду роботу, блоки связаны потоком управления. Блоки исполняются последовательно, при получении управления блок посылает на робота команду по Bluetooth, либо выполняет какие-то вычисления. Описание самого синтаксиса языка в метаредакторе заняло порядка двух часов, язык состоит примерно из 20 различных блоков и одного вида связи. При ручном кодировании создание такого редактора могло бы занять порядка человеко-месяца. Пример модели на этом языке приведен на рисунке.

Дальнейшие исследования направлены на автоматизацию создания не только редакторов, но и всех прочих необходимых инструментов для работы с визуальными языками. Кроме того, необходимо сделать разработку визуальных языков полноценной деятельностью по разработке ПО, т. е. максимально упростить сопровождение метамоделей, поддержать переиспользование фрагментов метамоделей, создать удобные инструменты для просмотра и анализа метамоделей и т. д.

На основе полученного опыта полагаем, что при наличии мощной инструментальной поддержки использование предметно-ориентированных визуальных языков реализует принципиально новый подход к созданию сложных систем с довольно низким порогом вхождения для новичков и многократным увеличением производительности профессионалов. Цель проекта QReal – исследование, реализация и апробация таких инструментов и технологий, основанных на них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kelly, S.** Domain-Specific Modeling: Enabling Full Code Generation [Текст] / S. Kelly, J. Tolvanen. –Wiley-IEEE Computer Society Press, 2008. –448 с.

2. **Kieburtz, R.** A software engineering experiment in software component generation [Текст] / R. Kieburtz, [et al.] // Proc. of 18th International Conf. on Software Engineering. –Berlin: IEEE Computer Society Press, 1996.

3. **Терехов, А.Н.** Архитектура среды визуального моделирования QReal. [Текст] / А.Н. Терехов Т.А. Брыксин, Ю.В. Литвинов [и др.] // Системное программирование. –СПб.: Изд-во СПбГУ, 2009. –№ 4. –С. 171–196.

4. **Терехов, А.Н.** REAL: методология и CASE-средство для разработки систем реального времени и информационных систем [Текст] / А.Н. Терехов, К.Ю. Романовский, Д.В. Кознов [и др.] // Программирование. –1999. –Т. 5. –С. 44–52.

УДК 004.75

А.А. Лукашин, А.А. Лукашин, Б.В. Тютин, В.П. Котляров

АРХИТЕКТУРА СЕРВИСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕСУРСОЕМКИХ ЗАДАЧ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ

Информационно-телекоммуникационные технологии становятся важной составляющей инфраструктуры, используемой для инновационного развития научно-технической и социально-образовательной деятельности. Ключевая составляющая этой инфраструктуры – информационно-вычислительные системы, развитие которых требует решения как фундаментальных, так и технологических проблем. Для их решения особое значение имеют исследования, связанные с созданием систем высокопроизводительных вычислений, ориентированных на решение широкого класса научно-технических задач, требующих реализации функций гетерогенности, масштабируемости и реконфигурируемости. Результатом подобных исследований является возможность существенно расширить область эффективного применения высокопроизводительных систем. Что в свою очередь повышает интерес к информационным технологиям как услуге. Возможность решения прикладных задач, интересующих широкий круг пользователей, не только позволяет привлечь дополнительные инвестиции, но и способствует дальнейшему развитию технологий.

Предпосылки к созданию вычислительного сервиса

Политехнический университет как научная мультитехническая организация решает задачи из широкого круга проблемных областей, поэтому нуждается в обеспечении вычислительными ресурсами самых разных типов. Можно выделить различные требования к аппаратной конфигурации вычислительных ресурсов (количество вычислительных ядер, размер памяти и жесткого диска), к операционным системам (Windows, Linux, FreeBSD), к прикладному программному обеспечению (Ansys, Adams, ProEngineer, Matlab).

При реализации существующих подходов к использованию информационно-телекоммуникационных технологий для создания систем распределенных вычислений, пользователи сталкиваются с проблемой выбора методов конфигурации аппаратно-программных ресурсов для повышения эффективности решения выбранной прикладной задачи. Сложность создания вычислительных систем с требуемыми характеристиками операционной системы, аппаратных компонент и топологии сетевых каналов для организации локального и информационного обмена существенно зависит от особенностей решаемых прикладных задач, что делает актуальной разработку технологий автоматической реконфигурации используемых вычислительных ресурсов.

В этих условиях использование методов виртуализации и решений на основе технологии «облачных вычислений» (Cloud Computing) позволяет существенно расширить возможности управления ресурсами информационно-телекоммуникационной среды и гетерогенными компьютерными компонентами, что особенно важно при организации высокопроизводительных многопоточных вычислений, требующих дорогостоящего оборудования и сложного программного обеспечения, использование которых должно отвечать требованиям политики информационной безопасности.

В статье рассматривается создание сервиса, предоставляющего возможность решения ресурсоемких вычислительных задач, среди которых можно выделить обработку результатов экспериментов физики (ядерная, молекулярная, газовая динамика, астрофизика), расчеты электронной структуры для создания новых материалов и лекарств, долгосрочный прогноз погоды в метеорологии, расчетные задачи промышленности и задачи, требующие нерегулярного обращения к памяти (расчеты на нерегулярных динамически изменяемых сетках, микроэлектронное проектирование СБИС и др.).

Использование сервис-ориентированной архитектуры позволяет создать универсальную систему с точки зрения рассматриваемых задач и коммуникационных возможностей. Со стороны

конечного пользователя единообразие поддерживается за счет использования веб-технологий, в частности, веб-сервисов, позволяющих создать единый интерфейс взаимодействия с пользователем, доступный в качестве ресурса с унифицированным интерфейсом доступа.

Объединение традиционного и сервис-ориентированного подходов позволяет расширить область применения высокопроизводительных вычислительных систем. За счет возможности параллельного выполнения, задачи, традиционно решаемые на обычном программном обеспечении, такие, как тестирование или генерация кода, могут быть решены за существенно меньшее время.

Архитектура защищенной вычислительной платформы

Базовая платформа для разрабатываемого сервиса – технологии виртуализации и средства управления виртуализированными вычислительными ресурсами, реализующие вычислительную облачную среду «Инфраструктура как сервис» (IaaS). На базе вычислительных ресурсов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета создан стенд вычислительной среды уровня IaaS, построенный на основе системы Eucalyptus и гипервизора Xen [1]. Важная особенность разработанной вычислительной среды – возможность запуска гетерогенных систем, в т. ч. под управлением ОС Linux, Windows и FreeBSD. На базе этих операционных систем разработаны образы виртуальных машин с различными наборами программного обеспечения, включающими в себя инженерные вычислительные пакеты компьютерного инжиниринга Ansys, Adams, ProEngineer.

На рис. 1. представлена обобщенная архитектура распределенной вычислительной среды с внедренными средствами разграничения доступа. Используются следующие сокращения: ПА МЭ – программно-аппаратный межсетевой экран; ВМЭ – виртуальный межсетевой экран; СУ МЭ – система управления межсетевыми экранами; ВМ – виртуальная машина; КО – контроллер облака; КК – контроллер кластера; КХ – контроллер хранилища.

Контроллер узла вычислительной среды – мощный многоядерный узел с установленным гипервизором. Задача разграничения доступа решена путем интеграции в гипервизор виртуального межсетевого экрана.

Сервисный подход к управлению вычислительными ресурсами

На базе представленной вычислительной среды в рамках научно-исследовательской работы разрабатывается проект, реализующий модель предоставления вычислительных ресурсов «Программное обеспечение как сервис» (SaaS). На данной платформе развертывается программный комплекс по тестированию многокомпонентных систем с целью разработки методики решения данного класса задач тестирования с использованием облачной инфраструктуры.

Выбор сервис-ориентированной архитекту-

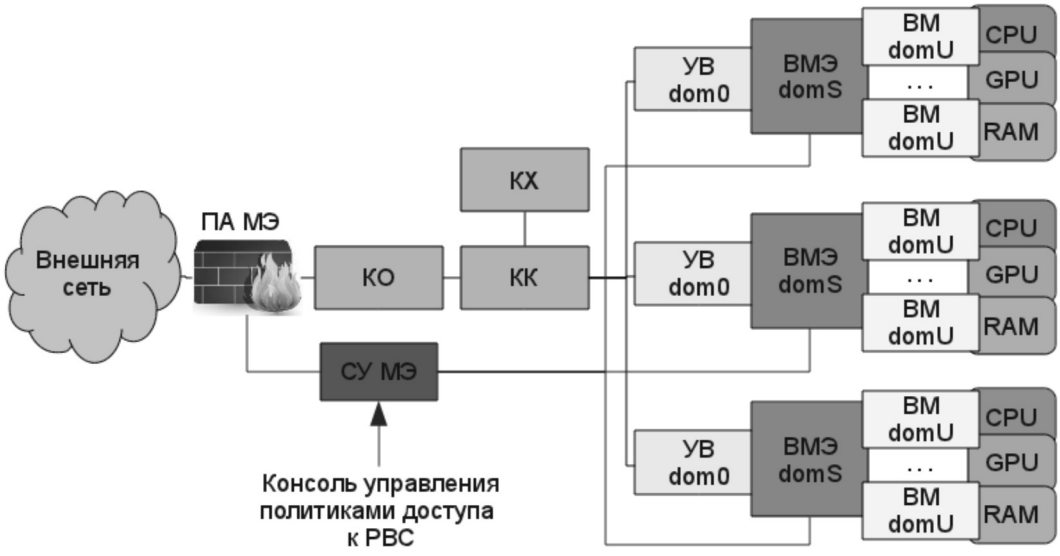


Рис. 1. Архитектура защищенной вычислительной платформы

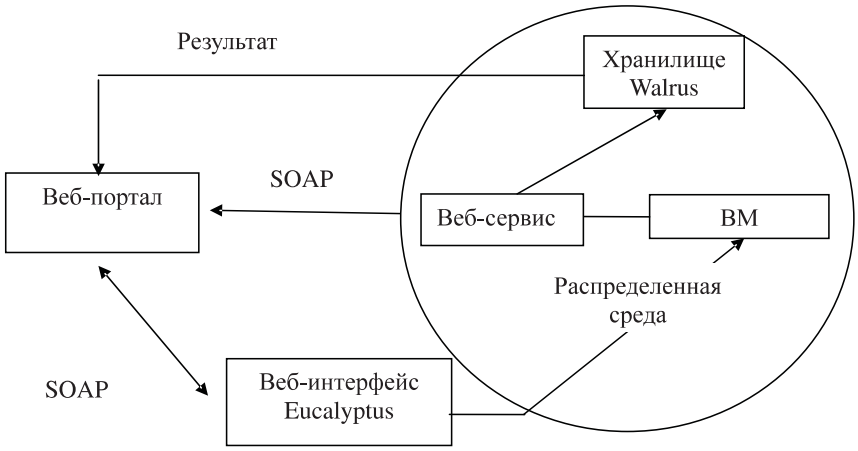


Рис. 2. Архитектура реализации модели SaaS

ры обосновывается универсальностью системы и унифицированным интерфейсом для различных типов решаемых задач. В качестве технологической платформы для программной реализации используется язык программирования высокого уровня Java 6. В рамках данного проекта используется стек технологий Spring Framework, представляющий собой монолитный набор решений для создания программных компонент разрабатываемого сервиса [2–4].

В структурный состав системы (рис. 2) входят:

1) универсальный интерфейс (Solver), осуществляющий взаимодействие с инженерными пакетами (Ansys, Adams, ProEngineer);

2) веб-сервис, обеспечивающий взаимодействие между интерфейсом Solver и клиентским приложением посредством протокола SOAP;

3) веб-приложение по управлению вычислительными ресурсами и запуском задач в виртуальной машине, являющееся порталом доступа к вычислительной среде.

Система предоставляет простой и универсальный пользовательский интерфейс для конфигурирования и управления выделенными вычислительными ресурсами. Реализация асинхронного протокола взаимодействия между серверной и клиентской частью системы позволяет уменьшить нагрузку на каналы связи. Для повышения эффективности работы комплекса в целом процессы запуска и останова виртуальных машин автоматизированы.

Указанные особенности реализации системы – серьезные преимущества, позволяющие использовать облачную среду для решения задач тестирования. В общем виде схема применения технологии TAT представлена на рис. 3.

Изначально формируемый пользователем набор тестовых процедур, а также тестируемая си-

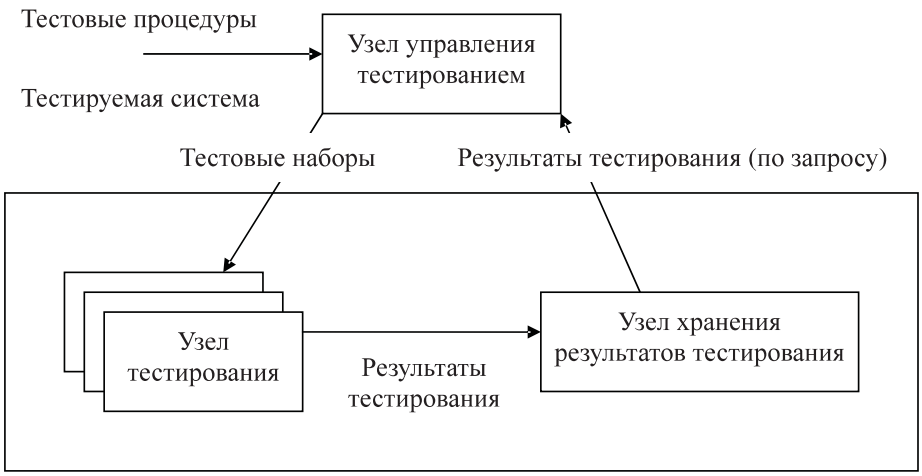


Рис. 3. Архитектура реализации модели SaaS

стема с помощью инструментов генерации кода, входящих в систему ТАТ, собираются в исполняемые модули. На этом этапе также осуществляется конфигурирование создаваемых тестовых наборов и их распределение в рамках предоставляемой облачной инфраструктуры. Далее запускается процесс тестирования, в рамках которого тестовый набор взаимодействует с системой, и полученные результаты отправляются в узел хранения данных. Из него они могут быть извлечены пользователем или системой при необходимости дальнейшей обработки и анализа.

В рамках совместной научно-исследовательской работы студентов и научных коллективов кафедры телематики и кафедры ИУС Политехнического университета создается инфраструктура для управления вычислительными ресурсами ИТК СПБГПУ и развертывание на ней программных комплексов, связанных с верификацией и тестированием многокомпонентных систем. Предложенная реализация модели SaaS по организации сервиса наукоемких вычислений позволяет обеспечить потребности научных коллективов Политехнического университета в вычислительных ресурсах без дополнительных затрат на программное обеспечение и аппаратные средства. Система полностью удовлетворяет требованиям информационной безопасности и обеспечивает разграничение доступа, являясь при этом универсальным и масштабируемым вычислительным средством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лукашин, А.А.** Методы и средства построения распределенной вычислительной среды для решения наукоемких задач [Текст] / А.А. Лукашин, И.А. Рощупкин // XXXIX неделя науки СПбГПУ; Матер. Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 6–11.12.2010. –Ч. XV, ф-т при ЦНИИ робототехники и технической кибернетики. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –С. 13–15.

2. **Заборовский, В.С.** Архитектура системы разграничения доступа к ресурсам гетерогенной вычислительной среды на основе контроля виртуальных соединений [Текст] / В.С. Заборовский, А.А. Лукашин, С.В. Купреенко, В.А. Мулюха // Междунар. науч. конф. Параллельные вычислительные технологии. –Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2011. –730 с.; [Электронный ресурс]/ Режим доступа: http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011

3. **Заборовский, В.С.** Многоядерная вычислительная платформа для высокопроизводительных межсетевых экранов. Высокопроизводительные вычислительные системы [Текст] / В.С. Заборовский, А.А. Лукашин, С.В. Купреенко // Матер. VII Междунар. науч. молодежной школы. –Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. –336 с.

4. **Лукашин, А.А.** Система для реализации распределенных вычислений на основе облачной архитектуры [Текст] / А.А. Лукашин, Б.В. Тютин // Технологии Microsoft в теории и практике программирования. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. –С. 101–102.

УДК 004.415

А.О. Веселов, А.С. Иванов, Б.В. Тютин, В.П.Котляров

АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ТЕСТОВОГО ОКРУЖЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

Тестирование, являющееся на сегодняшний день неотъемлемой частью любого современного процесса промышленной разработки программного обеспечения, обычно состоит из целого набора активностей, одна из которых – настройка тестового окружения на взаимодействие с тестируемой системой и ее компонентами.

Процесс настройки окружения в телекоммуникационных системах зачастую бывает достаточно сложен, занимает значительную часть времени и, в случае ручной настройки, может служить дополнительным источником ошибок тестирования. Изменения в интерфейсах тестируемой системы влекут за собой необходимость

переконфигурирования тестового окружения.

В статье предложен подход, позволяющий автоматизировать данный процесс, решив тем самым указанные проблемы и сократив материальные и временные затраты на тестирование.

Требования к проектированию тестируемой системы

Рассматриваемый подход к автоматизации предполагает наличие определенного процесса и правил создания тестируемой телекоммуникационной системы:

система создается в виде конечно-автоматных моделей на языке SDL [1], либо UML [2];

внешние интерфейсы системы описываются при помощи специального Языка описания интерфейсов, позволяющего определить структуру входящих и исходящих сообщений.

Наличие специализированного Языка описания интерфейсов позволяет не только в удобной и понятной форме описывать структуру сообщений, которые использует тестируемая система для взаимодействия с внешним миром, но и генерировать их описания в формате SDL/UML сигналов и их C++ аналогов.

На начальном этапе реализации системы на Языке описания интерфейсов задаются элементарные составляющие параметров сигналов (data units). Затем, на основе data units составляются описания сигналов. Из наборов сигналов формируются интерфейсы. На их основе при помощи специальных скриптов генерируются SDL/UML сигналы и типы данных их параметров, а также их C++ аналоги. Кроме этого, возможна генерация C++ кода, отвечающего за сериализацию полученных структур данных из объектного представления в строку и десериализацию из строкового представления в объектное. Последнее является особенно важным, т. к. позволяет автоматически формировать сигналы, непосредственно отправляемые по сокетам, в требуемой нотации, а также распознавать входящие сигналы и автоматически получать их объектное представление.

Сгенерированные SDL/UML описания используются при дальнейшем проектировании логики работы самой системы. При этом допускается использование также и других типов данных и сигналов внутри системы, но все взаимодействия с внешним окружением должны обязательно описываться в терминах сигналов, полученных на этапе генерации из описания на Языке описания интерфейсов.

На основе SDL/UML модели, построенной с учетом указанных правил, возможна автоматическая генерация целевого кода системы. На практике таким языком является C++ [3–5].

Система, сгенерированная таким образом, будет состоять из двух основных частей:

ядра́ системы – ее логики в конечно-автоматном представлении на целевом языке, сгенерированной на основе SDL/UML модели;

внешних интерфейсов системы, а также методов сериализации и десериализации сообщений, сгенерированных на основе описаний на Языке описания интерфейсов.

Система тестирования

Система тестирования представляет собой генератор кода тестового окружения на основе тестовых сценариев, конфигурационного XML файла и целевого кода, отвечающего за сериализацию/десериализацию сообщений, отправляемых/получаемых через внешние интерфейсы окружения.

Тестовые сценарии представляются в формате диаграмм MSC (Message Sequence Charts) [6]. Пример MSC диаграммы представлен на рис. 1.

Конфигурационный файл предоставляется в формате XML, в нем задается следующая информация о тестовом окружении:

тип используемых сокетов (IP (TCP/UDP) / IPC (STREAM/DATAGRAM));

описание сигналов и их параметров;

код инициализации тестового окружения, исполняемый при запуске всего тестового набора;

код, исполняемый при завершении тестового набора;

код, исполняемый в начале каждого теста;

код, выполняемый в конце каждого теста;

время ожидания входящих сообщений;

код, отвечающий за распознавание сигналов;

описание инстанций MSC диаграмм и их интерфейсов;

формат лог файлов;

разделитель входящих сообщений.

Код, отвечающий за сериализацию/десериализацию, реализует функционал преобразования объектного представления сигналов в строковое и обратно.

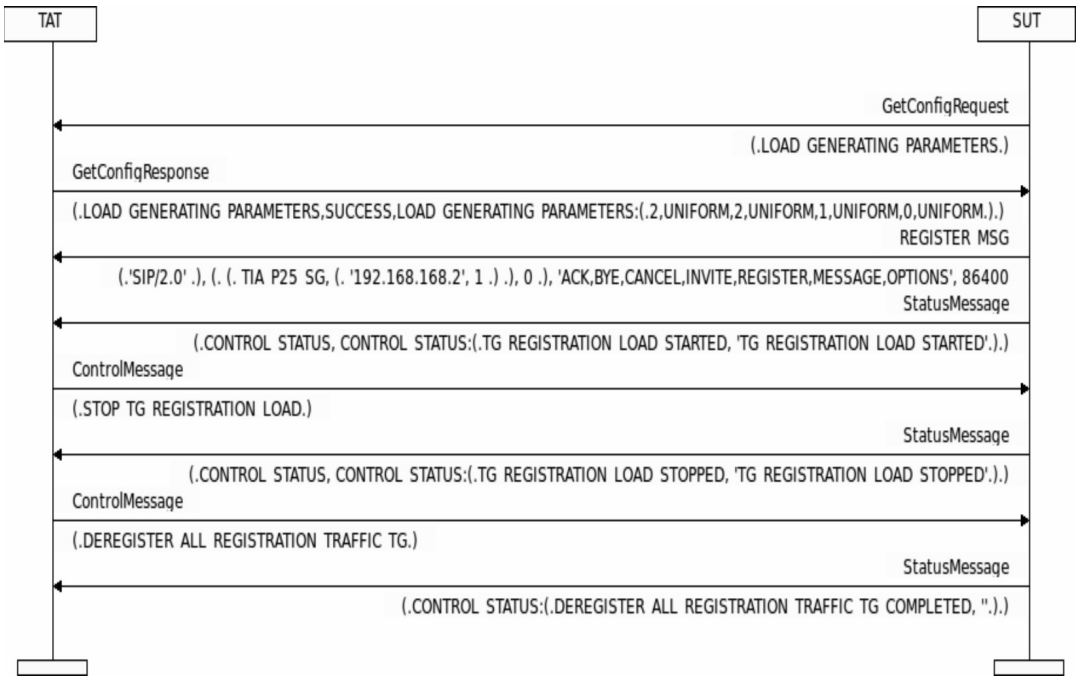


Рис. 1. Пример MSC диаграммы

Подход к автоматизации настройки окружения

Подход к автоматизации настройки тестового окружения проиллюстрирован на рис. 2.

Сама тестируемая система требует наличия описания интерфейсов взаимодействия с внешним миром, в этих описаниях нуждается также и тестовое окружение. Рассматриваемый подход предполагает, что это описание создается единожды и затем используется как для системы, так и для окружения.

Основная идея подхода заключается в следующем:

1) переиспользование структур данных, являющихся C++ аналогами сигналов, и методов их сериализации/десериализации, полученных на этапе генерации самой системы, при создании тестового окружения;

2) генерация конфигурационного файла тестового окружения на основе описания интерфейсов и SDL/UML модели тестируемой системы.

Наиболее значимые достижения первого

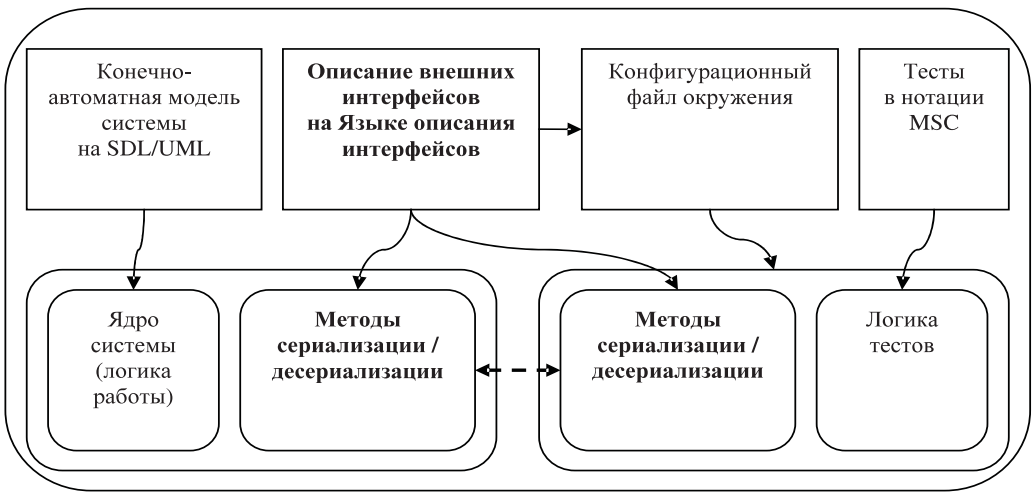


Рис. 2. Автоматизация конфигурирования окружения

пункта – возможность манипулировать одними и теми же структурами данных как на стороне самой системы, так и на стороне тестового окружения, а также обеспечение прозрачности механизма обмена данными между ними без необходимости дважды описывать внешние интерфейсы.

Автоматическая генерация конфигурационного файла позволяет избежать ручной работы, а также связанных с этим ошибок при его создании и изменении. Для тех разделов конфигурационного файла, которые не являются проектнозависимыми (например, формат лог файлов), берутся значения по умолчанию. При необходимости изменить какие-либо из автоматически заданных настроек создается дополнительный файл, в котором эти настройки переопределяются вручную, и далее, при генерации кода тестового окружения используются оба файла с указанием приоритета.

Результат применения описанных идей – автоматическое получение конфигурации окружения на основе данных, имеющихся в самой тестируемой системе.

Практика повторного создания внешних интерфейсов для системы тестирования, имеющая место при традиционном подходе, является в действительности избыточной и не приводит к повышению качества как целевого программного продукта, так и самого процесса тестирования. Поэтому видится перспективным подход, основанный на описании внешних интерфейсов на специальном проблемно-ориентированном языке с последующей генерацией целевого кода, который в дальнейшем используется как в тестируемой системе, так и в тестовом окружении.

Рассмотренный подход позволяет не только сократить трудоемкость и временные затраты на процесс настройки тестового окружения телекоммуникационных систем, но и снизить количество ошибок тестирования за счет исключения ручного труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITU-T Recommendation Z.100, CCITT Specification and Description Language (SDL), 03/93. [Электронный ресурс].

2. OMG Unified Modeling Language [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.omg.org/spec/UML/2.2

3. **Веселов, А.О.** Автоматизация тестирования телекоммуникационных приложений [Текст] / А.О. Веселов, А.С. Иванов, Б.В. Тютин, В.П. Котляров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2009. –№ 3.

4. **Baranov, S.** Leveraging UML to deliver correct telecom applications in UML for Real: Design of Embedded Real-Time Systems [Текст] / S. Baranov, C. Jervis, V. Kotlyarov [et al.]; by ed. L. Lavagno, G. Martin, B. Selic. –Kluwer Academic Publishers, 2003. –P. 323–342

5. **Воинов, Н.В.** Верификация и автоматизация тестирования UML проектов [Текст] / Н.В. Воинов, В.П. Котляров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2009. –№ 3.

6. ITU Recommendation Z.120. Message Sequence Charts (MSC), 11/99. [Электронный ресурс].

УДК 377.121.427

Д.Н. Королев

ИНТЕГРАЦИЯ РАСПИСАНИЯ УЧЕБНЫХ КУРСОВ ФАКУЛЬТЕТА С ПОРТАЛОМ SHAREPOINT

Задача любой организации – предоставить единый структурированный доступ ко всей информации для сотрудников [1]. Математико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного университета для этих целей разворачивает портал SharePoint 2010. Структура и содержание портала в первую очередь ориентированы на студентов и преподавателей. В связи с

чем возникает желание видеть расписание учебных курсов на портале.

Существующие программы, помогающие в составлении расписания, можно найти лишь в коммерческом секторе [2]. Безусловными достоинствами подобных реализаций являются:

вывод на печать (Word/Excel/HTML);

широкий функционал, апробированный в нескольких вузах;

возможность некоторых редакторов генерировать расписания по заданным условиям.

К сожалению, у всех этих программ есть ряд недостатков.

Во-первых, серьезным упущением является ориентированность исключительно на человека, составляющего расписание, забывая при этом про конечного пользователя – преподавателей и студентов, которым не предоставляется никакого удобного механизма для просмотра и поиска.

Во-вторых, эти инструменты сложно интегрируемы с текущей организацией процесса составления расписания из-за специфики сбора информации в каждой отдельной организации [3].

В статье рассматривается решение данных проблем с целью предоставления факультету функционала для работы с расписанием.

Постановка задачи. Задача составления расписания далеко не нова, но получить решение, полностью удовлетворяющее всем требованием, до сих пор не удалось [4]. Вся задача условно разбивается на следующие подзадачи:

1) оптимизация процесса составления расписания;

2) возможность доступа к расписанию в Интернете.

Описание задачи составления расписания. Методика работы над расписанием в целом подразумевает под собой анализ представленных ниже пунктов.

1. Перечень исходных данных для формирования расписания.

2. Общие требования ко всему расписанию в целом.

3. Необходимые условия потенциальной возможности построения расписания.

4. Стратегия (общие принципы, политика, общие правила) составления расписания.

5. Общие требования к алгоритму составления расписания и последовательность работы над ним.

6. Дополнительные задачи, решаемые параллельно с составлением расписания занятий.

7. Перечень результатов формирования расписания.

8. Требования к коррекции расписания во время использования его в учебном процессе.

Необходимые условия существования расписания. Для потенциальной возможности построения расписания необходимо выполнение (как минимум) следующих пунктов:

количество классов должно соответствовать количеству имеющихся, надлежащим образом оборудованных, аудиторий;

количество преподавателей должно соответствовать количеству аудиторий.

Базовое требование относится ко всему расписанию в целом и формулируется следующим образом: каждый преподаватель, группа и аудитория не могут быть задействованы дважды в один и тот же момент времени (за исключением случаев объединения/разделения групп).

Базовое требование является единовременным выполнением трех условий:

1) ни одна группа в одно и то же время не может находиться более чем на одной паре, с одним преподавателем, в одной аудитории;

2) ни один преподаватель в одно и то же время не может проводить пару более чем у одной группы, в одной аудитории;

3) ни в одной аудитории в одно и то же время не может проводиться более чем одна пара для одной группы и с одним преподавателем.

Жесткие требования к расписанию:

• занятия должны проходить в специально оборудованных для проведения этого предмета учебных помещениях;

• у каждого преподавателя, являющегося штатным работником, для которого создается расписание, в неделю должен быть хотя бы один выходной день; в течение рабочего дня у преподавателя должен быть перерыв; преподаватель при проведении занятия в закрепленной за ним аудитории, имеет приоритет перед другими преподавателями.

Мягкие требования к расписанию:

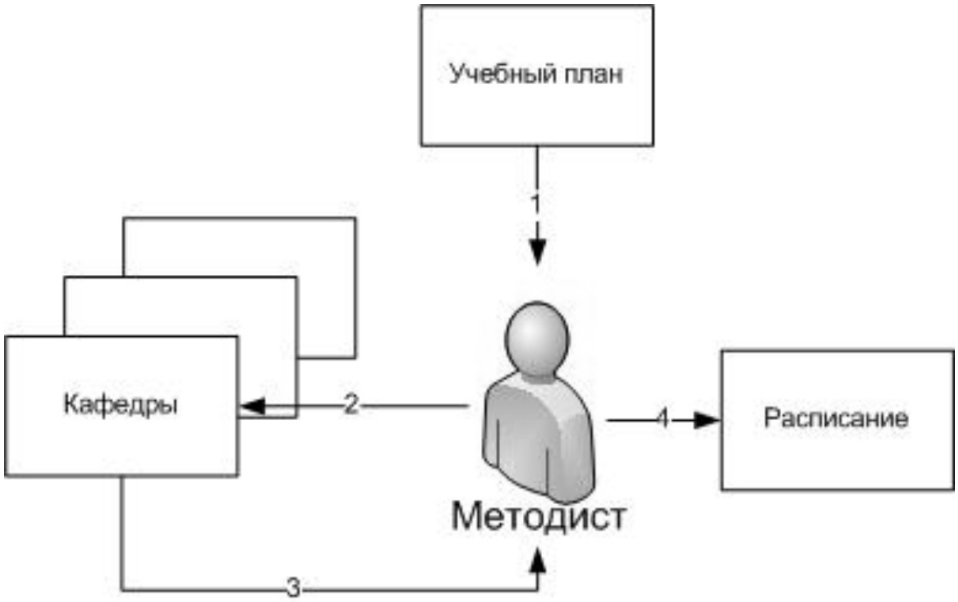


Рис. 1. Схема сбора информации о расписании

• предметы естественно-математического и гуманитарного циклов должны чередоваться, проведение каждого предмета должно быть равномерно распределено в течение недели, расписание пар строится с учетом работоспособности обучающихся;

• в расписании количество «окон» должно быть минимальным, рабочая неделя преподавателя должна быть равномерно загружена, нежелательно расписание, где преподаватель должен провести только одну пару в день.

Процесс составления расписания на математико-механическом факультете. На начальном этапе рассматриваются учебные планы для каждой специальности. Затем планы разделяются по предметам и рассылаются на кафедры для определения списка задействованных преподавателей. После этого кафедра сопоставляет предметы, группы и преподавателей, а также пожелания о времени проведения занятий по дисциплинам. Методист объединяет информацию для составления расписания

Описание реализации проекта

Сбор информации (рис. 1). На портале создается список, содержащий следующие столбцы: «Название предмета», «Кафедра», «Группы», «Преподаватель», «Замечания преподавателя», «Замечания по аудитории», «Замечания по группам».

Методист заполняет три поля: «Название предмета», «Кафедра», «Замечания по группам». После этого каждая кафедра распределяет предметы по преподавателям, учитывая их пожелания.

В результате получена следующая информация:

для каждого преподавателя сформулирован список пожеланий;

для каждого предмета – пожелания об аудиториях, в которых они должны проводиться;

для каждой группы – предметы, которые им должны быть проведены.

Функциональности настольного приложения для методиста. Традиционный функционал визуального редактора. Импорт данных осуществляется главным образом из списка SharePoint. Экспорт производится в отдельную базу данных. Экспорт для печати в Excel.

Проверка корректности. При составлении расписания необходимо учитывать множество факторов: дневную нагрузку студентов и преподавателей, размеры и комплектацию аудиторий, расположение этих аудиторий, желания и возможности преподавателей и еще множество различных факторов.

К сожалению, проверить все подобные тре-

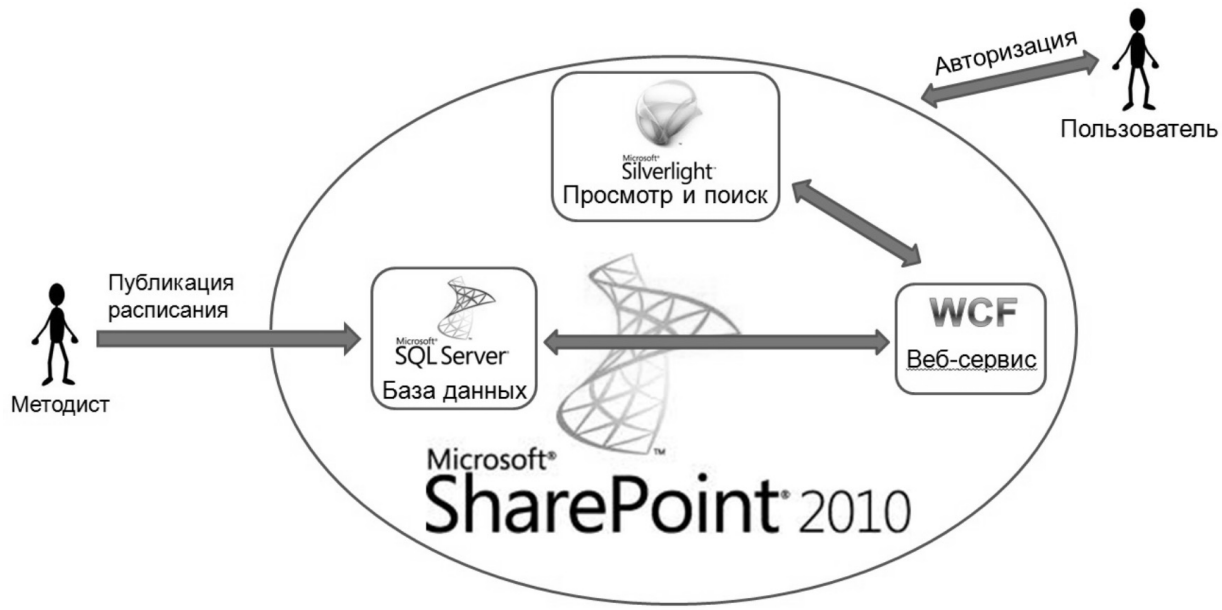


Рис. 2. Модель проекта

бования не представляется возможным. Но есть среди них те, которые можно учесть на объектной модели. Так, например, несложно проверить наличие у преподавателя в определенное время единственной пары или проведение единственной пары в один момент времени в аудитории. Другими словами, имеется возможность проверить корректность и выполнимость базовых требований.

Программа в процессе составления расписания проводит проверку и в случае несоответствия выдает пользователю предупреждение о нарушении правил.

Функциональности браузерного приложения для студентов. Студент, авторизованный на портале SharePoint, в профиле пользователя имеет следующие данные: «Номер группы», «E-mail», «Телефон».

Таким образом, студент, зашедший на страницу с расписанием, видит пары своей группы на текущий день (либо на следующий, если сегодня – воскресенье или в данный момент уже завершились занятия).

Студент может просмотреть расписание на всю неделю, а также узнать о занятости преподавателей. Кроме того, ему доступна навигация по остальным группам.

Производится рассылка информации об изменениях в расписании на указанный e-mail.

Функциональности браузерного приложения для преподавателей. Преподаватель, авторизованный на портале SharePoint, в профиле пользователя имеет следующие данные: «Кафедра», «E-mail», «Телефон».

Преподаватель видит информацию о своем расписании, ему доступна навигация по другим преподавателям и группам.

Производится рассылка информации об изменениях в расписании на указанный e-mail.

Модель проекта представлена на рис. 2.

Проект находится в стадии реализации, ведется активное взаимодействие с методистами факультета.

Планируются следующие дополнительные возможности:

автоматизация получения списка предметов на портале из учебного плана;

редактирование преподавателями расписания своих пар;

система уведомления об изменениях в расписании;

создание специальных узлов на портале SharePoint для общения студентов и преподавателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Романовский, И.В.** Дискретный анализ: Учеб. пособие для студентов, специализирующихся по прикладной математике и информатике [Текст] / И.В. Романовский. –Невский Диалект, БХВ-Петербург, 2004. –320 с.

2. Материалы и архивы разных лет конференций ИТО (Информационные технологии в образовании) [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.ito.su

3. Европейская рабочая группа по Автоматизированному составлению расписаний [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.asap.cs.nott.ac.uk/watt/index.html

4. **Пиликов, Н.П.** Задача составления школьного расписания: Статья [Электронный ресурс] / Н.П. Пиликов. –Режим доступа: http://www.mnogosmenka.ru/pilikov/school.htm

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АГИЕВИЧ Сергей Николаевич – *ведущий специалист ООО «Специальный технологический центр», кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заслуженный изобретатель Российской Федерации.*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3. Военная академия связи. E-mail: komissare@yandex.ru

АКСЁНОВ Константин Александрович – *докторант кафедры автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кандидат технических наук.*

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45, e-mail: Wiper99@mail.ru

АКСЁНОВА Ольга Петровна – *научный сотрудник кафедры автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».*

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45, e-mail: solnceva_op@mail.ru

АНКУДИНОВ Георгий Иванович – *профессор кафедры вычислительных машин, комплексов, систем и сетей Северо-Западного государственного заочного технического университета, доктор технических наук.*

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5. Тел. (812) 647-74-00 (доб. 6235), e-mail: gankoudi@nwpi.ru

АНКУДИНОВ Иван Георгиевич – *доцент кафедры вычислительных машин, комплексов, систем и сетей Северо-Западного государственного заочного технического университета, кандидат технических наук.*

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д. 5. Тел. (812) 647-74-00 (доб. 6235), e-mail: ivgank@rambler.ru

АНТОНОВА Анна Сергеевна – *соискатель кафедры автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».*

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45, e-mail: antonovaannas@gmail.com

БАБКОВ Валерий Юрьевич – *профессор кафедры радиотехники и телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

БЕЛЯВСКИЙ Григорий Исаакович – *заведующий кафедрой высшей математики и исследования операций факультета математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета, доктор технических наук, профессор.*

344007, г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, д. 70. E-mail: beliavsky@hotmail.com

БРЫКСИН Тимофей Александрович – *старший преподаватель кафедры системного программирования Санкт-Петербургского государственного университета.*

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

ВАГАПОВА Наталья Васильевна – *соискатель ГОУ ВПО «Оренбургский государственный университет».*

460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13. E-mail: vagapova_n@mail.ru

ВАН КАЙ – *аспирант кафедры автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».*

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45, e-mail: kylebjcn@gmail.com

ВЕСЕЛОВ Алексей Олегович – *аспирант кафедры информационных и управляющих систем факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

ГРЕБЕНКИН Михаил Константинович – *аспирант кафедры автоматики и информационных технологий Уральского федерального университета.*

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. E-mail: m_grebenkin@bk.ru

ДЕРИПАСКА Анна Олеговна – *студентка математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.*

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

ДИБИХИН Константин Юрьевич – *докторант ГОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», кандидат технических наук.*

460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13.

ЕПИФАНЦЕВ Александр Александрович – *инженер ОАО «Концерн «Созвездие», аспирант.*

394018, г. Воронеж, ул. Плехановская, д.14. E-mail: cxp87@mail.ru

ЗОЗУЛЯ Алексей Викторович – *ассистент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-22-23, e-mail: lexer@ftk.spbstu.ru

ЗУБКОВ Александр Фёдорович – *декан факультета Института промышленной экономики, информатики и сервиса Пензенской государственной технологической академии, кандидат технических наук, профессор.*

440605, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11. E-mail: zubkov@pgta.ru

ИВАНОВ Александр Сергеевич – *аспирант кафедры информационных и управляющих систем факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 21.

ИЦЫКСОН Владимир Михайлович – *кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, директор телекоммуникационного центра факультета технической кибернетики.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-22-38, e-mail: vlad@ftk.spbstu.ru

КЕДРИН Виктор Сергеевич – *доцент кафедры психологии и менеджмента Иркутского государственного университета (филиала в г. Братске), кандидат технических наук.*

665709, г. Братск, а/я 2121. E-mail: kedrinvs@mail.ru

КОЗЛОВ Владимир Николаевич – *заведующий кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: umo@citadel.stu.neva.ru

КОМАРОВ Михаил Петрович – *профессор кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор военных наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: komarovkmp@mail.ru

КОНЫГИН Сергей Борисович – *заведующий кафедрой машин и аппаратов химических производств Самарского государственного технического университета, кандидат технических наук.*

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244. Тел. (846) 242-07-84, e-mail: steevis@inbox.ru

КОРОЛЕВ Дмитрий Николаевич – *студент математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.*

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

КОТЛЯРОВ Всеволод Павлович – *профессор кафедры информационных и управляющих систем факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

КУЗЕНКОВА Анастасия Сергеевна – *студентка математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.*

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

КУЗЬМИН Олег Викторович – *заведующий кафедрой теории вероятностей и дискретной математики Института математики, экономики и информатики Иркутского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор.*

664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 1. E-mail: quzminov@mail.ru

ЛАЗАРЕВ Евгений Михайлович – *аспирант кафедры АСОИиУ Уральского федерального университета.*

620000, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. E-mail: lazareveugene@gmail.com

ЛИПОДАЕВА Анна Александровна – *студентка кафедры автоматизированных систем управления ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».*

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. (343) 375-41-45, e-mail: annli89@mail.ru

ЛИТВИНОВ Юрий Викторович – *старший преподаватель кафедры системного программирования, Санкт-Петербургского государственного университета.*

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д.7-9.

ЛУКАШИН Алексей Андреевич – *аспирант кафедры телематики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: lukash@neva.ru

ЛУКАШИН Антон Андреевич – *студент кафедры информационных и управляющих систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: lukan@itcwin.com

МАМУТОВА Ольга Вячеславовна – *аспирант кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: olga.mamoutova@gmail.com

НГУЕН Данх Хоа – *аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: ndkhoa82@gmail.com

НЕЧАЕВ Юрий Борисович – *главный научный сотрудник ОАО «Концерн «Созвездие», доктор физико-математических наук, профессор.*

394018, г. Воронеж, ул. Плехановская, д.14. E-mail: cxp87@mail.ru

НИКОНЕНКО Наталья Дмитриевна – *преподаватель кафедры информационных технологий Северо-Кавказской академии государственной службы.*

344007, г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, д. 70. E-mail: nnatd@rambler.ru

ПОДКОПАЕВ Антон Викторович – *студент математико-механического факультета, Санкт-Петербургского государственного университета.*

199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

ПОНОМАРЕВ Александр Анатольевич – *адъюнкт Военной академии связи.*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3. E-mail: s_pon@mail.ru

ПОРШНЕВ Сергей Владимирович – *заведующий кафедрой автоматики и информационных технологий Уральского федерального университета, доктор технических наук, профессор.*

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 32. E-mail: sergey_porshnev@mail.ru

ПРОТАЛИНСКИЙ Олег Мирославович – *проректор по информатизации Астраханского государственного технического университета, заведующий кафедрой прикладной информатики в экономике, доктор технических наук, профессор.*

414000, г. Астрахань, ул. 2-я Адмиралтейская, д. 1. Тел. (8512) 61-44-49, e-mail: prot@astu.org

РОСТОВ Николай Васильевич – *доцент кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: rostovnv@mail.ru

РУДЕНКО Наталья Александровна – *аспирант кафедры национальной безопасности Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: natalia_rudenko@list.ru

СЕМЕНОВ Константин Константинович – *ассистент кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, аспирант.*

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: semenov.k.k@gmail.com

СЕМЕНОВ Иван Александрович – *студент Пензенской государственной технологической академии.*

440605, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

СМИРНОВ Андрей Александрович – *преподаватель кафедры Военной академии связи, кандидат технических наук.*

194064, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3. E-mail: komissare@yandex.ru

СИДОРОВ Максим Юрьевич – *инженер ОАО «Концерн «Созвездие», аспирант.*

394018, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14. E-mail: cxp87@mail.ru

СТЕПАНОВ Евгений Андреевич – *ассистент кафедры прикладной физики и оптики твердого тела радиофизического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 552-76-21, e-mail: sea@rphf.spbstu.ru

СТЕПУТИН Антон Николаевич – *аспирант кафедры радиопередающих устройств и средств подвижной связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени проф. М.А. Бонч-Бруевича.*

191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 61. E-mail: put_in@list.ru

ТАРАН Кирилл Сергеевич – *студент математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ТЮТИН Борис Викторович – *аспирант кафедры информационных и управляющих систем факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ФИЛИППОВ Алексей Семенович – *доцент кафедры компьютерных систем и программных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812) 297-16-19, e-mail: filippov@eda-server.ftk.spbstu.ru

ФИРСОВ Андрей Николаевич – *кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: anfirs@yandex.ru

ХВОРОВА Любовь Анатольевна – *доцент кафедры теоретической кибернетики и прикладной математики Алтайского государственного университета, кандидат технических наук.*

656049, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 61. Тел. (3852) 36-70-18, e-mail: nadia@math.asu.ru

ХОМЕНКО Татьяна Владимировна – *заведующий кафедрой информатики Астраханского государственного технического университета, кандидат технических наук, доцент.*

414025, г. Астрахань, ул. Татищева д. 16. E-mail: t_v_khomenko@mail.ru

ЧЕХ Кирилл Юрьевич – *главный специалист-эксперт отдела экономического и финансового планирования в АПК Министерства сельского хозяйства Пензенской области.*

440605, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

ЮХНЕВ Андрей Данилович – *научный сотрудник кафедры гидроаэродинамики физико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. (812)552-66-21, e-mail: a.yukhnev@mail.ru

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Агиевич С.Н., Пономарев А.А., Смирнов А.А. МОДЕЛЬ РАДИОСИГНАЛА OFDM НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ СПЛАЙН-ПОНТРЯГИНА–ВИЛЕНКИНА–КРЕСТЕНСОНА ДЛЯ СКРЫТНОГО КОММУНИКАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ.

Предложены алгоритмы обработки сигналов OFDM, сформированных в базисах функций сплайн-Понтрягина–Виленкина–Крестенсона. Обосновано их практическое применение в системах инфокоммуникационного взаимодействия. Проведен анализ результатов компьютерного моделирования и оценки эффективности разработанных алгоритмов.

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ. ФУНКЦИИ СПЛАЙН-ПОНТРЯГИНА–ВИЛЕНКИНА–КРЕСТЕНСОНА. OFDM.

Нечаев Ю.Б., Епифанцев А.А., Сидоров М.Ю. СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТОВ В УЗКОПОЛОСНОЙ РАДИОСЕТИ.

Определены требования к разрабатываемому протоколу маршрутизации для перспективной пакетной радиосети. Предложены форматы пакетов служебной информации протокола маршрутизации, формат таблицы маршрутизации, хранящейся в каждом из узлов, алгоритм работы протокола.

МАРШРУТИЗАЦИЯ. ЯЧЕИСТЫЕ СЕТИ. САМООРГАНИЗАЦИЯ.

Бабков В.Ю., Степутин А.Н. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СЕТЯХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ.

Рассмотрены методики построения пеленгационной сети, наложенной на действующую сеть мобильной связи. Произведена оценка точности и вероятности позиционирования абонентских станций сети мобильной связи и их электромагнитной доступности средствами пеленгационной сети. Изучены методы повышения точности и вероятности позиционирования абонентских станций средствами пеленгационной сети.

ПЕЛЕНГАЦИОННАЯ СЕТЬ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПУНКТ. АБОНЕНТСКАЯ СТАНЦИЯ. ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ. ПЕЛЕНГАЦИОННЫЙ КЛАСТЕР.

Ростов Н.В. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ВЫСОКОГО ПОРЯДКА МЕТОДАМИ ПРЯМОГО И КОСВЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.

Сформулирована задача многокритериальной параметрической оптимизации цифровых последовательных регуляторов высокого порядка. Изложена методика оптимизации таких регуляторов по векторным критериям методами прямого и косвенного зондирования, совмещенного с алгебраическим синтезом и анализом устойчивости цифровой САУ в узлах. Приведены примеры поиска Парето-оптимальных настроек параметров регуляции по предложенной методике с применением генетического алгоритма.

ЦИФРОВЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ. АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ. ПРЯМОЕ И КОСВЕННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ.

Аксёнов К.А., Антонова А.С. ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ.

Рассмотрена автоматизация процесса управления проектами на основе имитационного моделирования и информационной технологии интеллектуальных агентов.

ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ. МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АГЕНТЫ.

Кедрин В.С., Кузьмин О.В. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОЙ АРХИТЕКТУРЫ MODEL-VIEW-CONTROLLER ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ.

Рассмотрены особенности применения программной архитектуры MVC для создания информационной системы визуального проектирования и моделирования алгоритмов цифровой обработки сигналов. Предложена модель организации данных и представления визуальной вариативной схемы алгоритма на базе модифицированного ориентированного графа.

ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА. СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ. MVC. ФОРМА ОРГАНИЗАЦИИ ДАННЫХ. РАЗРАБОТКА ПО.

Козлов В.Н., Нгуен Д.Х., Фирсов А.Н. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ ТРАНСПОРТИРОВКИ СЛАБОСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ.

Построена математическая модель гидравлической сети в установившемся режиме на основе системы уравнений одномерного течения слабосжимаемой жидкости в линейных трубопроводах, позволяющая адекватно сформулировать ряд задач оптимизации управления гидравлическими сетями.

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СЕТЬ. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ. СЛАБОСЖИМАЕМАЯ ЖИДКОСТЬ. ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ.

Анкудинов Г.И., Анкудинов И.Г. ЛОГИКО-КОМБИНАТОРНЫЙ ПОДХОД К МОРФОЛОГИЧЕСКОМУ СИНТЕЗУ В УПРАВЛЕНИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ.

Рассмотрено приложение логико-комбинаторного подхода к морфологическому синтезу в управлении и проектировании. Предложены символьные алгоритмы построения иерархического пространства поиска в виде так называемых *особенных скобочных форм* логики высказываний, позволяющих реализовать численные методы решения линейных и нелинейных оптимизационных задач морфологического синтеза как с минимизируемыми, так и с максимизируемыми аддитивными показателями.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ. ЛОГИКО-КОМБИНАТОРНЫЙ ПОДХОД. СИМВОЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ. ИЕРАРХИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО ПОИСКА. СКОБОЧНЫЕ ФОРМЫ. ОПТИМИЗАЦИЯ.

Аксёнов К.А., Ван Кай, Антонова А.С., Аксёнова О.П., Липодаева А.А. РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ СТРОИТЕЛЬНЫМ ХОЛДИНГОМ.

Изучена автоматизация процесса управления строительным холдингом на основе имитационного моделирования и информационной технологии интеллектуальных агентов.

СТРОИТЕЛЬНЫЙ ХОЛДИНГ. ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ. МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АГЕНТЫ.

Дибихин К.Ю., Вагапова Н.В. СИСТЕМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ (НА ПРИМЕРЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА).

Представлены системные аспекты разрешения проблемы управления формированием организационных и технологических структур, интегрированных в агропромышленном комплексе.

СИСТЕМА. УПРАВЛЕНИЕ. СТРУКТУРА. НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС. АВИАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС. АГРОПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО.

Проталинский О.М., Хоменко Т.В. КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРЕДМЕТНЫХ ЗАДАЧ ПОИСКОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Предложено теоретико-множественное представление, обобщающее различные формально-языковые представления систем знаний в автоматизированных системах поискового конструирования. Изложены выявленные закономерности, лежащие в основе начального этапа проектирования и сформированные сценарии выбора технических решений в зависимости от типа входных данных.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ. УРОВНИ АБСТРАГИРОВАНИЯ. КАТЕГОРИИ. МОРФИЗМЫ. ВЫБОР РЕШЕНИЙ.

Мамутова О.В., Филиппов А.С. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ОПЕРАТИВНОЙ ПАМЯТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ.

Рассмотрен вопрос оценки влияния организации и параметров иерархической оперативной памяти на надежность и производительность вычислительной системы. Представлена разработанная имитационная модель вычислительной системы, позволяющая осуществить оценку. Приведены примеры результатов моделирования.

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ОПЕРАТИВНАЯ ПАМЯТЬ. КЭШ-ПАМЯТЬ. НАДЕЖНОСТЬ. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Ицыксон В.М., Зозуля А.В. ФОРМАЛИЗМ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЧАСТИЧНЫХ СПЕЦИФИКАЦИЙ КОМПОНЕНТОВ ПРОГРАММНОГО ОКРУЖЕНИЯ.

Рассмотрены вопросы формализации задания частичных спецификаций программных библиотек для портирования программ в новое окружение. Описан разработанный формализм и его представление на аннотирующем языке PanLang.

ЧАСТИЧНЫЕ СПЕЦИФИКАЦИИ. ПРОГРАММНОЕ ОКРУЖЕНИЕ. СЕМАНТИКА. БИБЛИОТЕЧНЫЕ ФУНКЦИИ. ЯЗЫК PANLANG.

Белявский Г.И., Никоненко Н.Д. ЗАДАЧА О РАНДОМИЗИРОВАННОЙ ОСТАНОВКЕ ПРИ СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОМ ХЕДЖИРОВАНИИ.

Решена задача об оптимальной рандомизированной остановке при аппроксимации конечной последовательности случайных величин последовательностью стохастических интегралов.

ОПТИМАЛЬНАЯ РАНДОМИЗИРОВАННАЯ ОСТАНОВКА. АППРОКСИМАЦИЯ. ТЕОРЕМА О МИНИМАКСЕ. МЕТОД ПРОЕКЦИИ ОБОБЩЕННОГО ГРАДИЕНТА. СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫЙ КРИТЕРИЙ.

Зубков А.Ф., Чех К.Ю., Семенов И.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РЫНОЧНЫХ ЦЕН.

Предложена методика моделирования волн Эллиотта с использованием суммы синусоидальных сигналов. Определены начальные параметры волн Эллиотта для моделирования изменения рыночных цен.

ВОЛНЫ ЭЛЛИОТТА. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛА. СУММА СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ.

Хворова Л.А. МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПОЧВЫ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ.

Изучена проблема построения многомерной модели теплового режима почвы. Рассмотрены алгоритм и численный метод решения двумерной задачи.

ТОЧНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОЧВЫ. МНОГОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ. ПОЧВЕННЫЙ КОМПАРТМЕНТ. РАЗНОСТНАЯ СХЕМА.

Поршнев С.В., Гребенкин М.К. ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТЕВОГО ТРАФИКА МАГИСТРАЛЬНОГО ИНТЕРНЕТ-КАНАЛА.

Выполнен анализ образцов сетевого трафика высокоскоростного Интернет-канала. Рассмотрены статистические свойства сетевого трафика и их зависимость от величины окна агрегации по времени.

МАГИСТРАЛЬНЫЙ КАНАЛ. СЕТЕВОЙ ТРАФИК. САМОПОДОБИЕ. АНАЛИЗ СЕТЕВЫХ ПАКЕТОВ.

Коныгин С.Б. ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ВЕРОЯТНОСТНОГО КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ.

Рассмотрены основные возможности и ограничения метода вероятностного клеточного автомата. Приведены результаты тестирования метода для некоторых физико-химических систем.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ КЛЕТОЧНЫЙ АВТОМАТ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.

Лазарев Е.М., Аксёнов К.А. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЕЙ.

Рассмотрены методы и принципы пространственной аналитики с использованием данных учета объектов управления территорией.

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. OPENSTREETMAP. GEOSERVER. QGIS. FTOOLS. MANAGERR.

Степанов Е.А., Юхнев А.Д. ПРИЕМНИК ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ УЛЬТРАЗВУКОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ СИСТЕМЫ С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ РЕГИСТРИРУЕМЫХ СКОРОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦЕРЕБРАЛЬНОГО КРОВОТОКА.

Рассмотрены принципы построения транскраниальной ультразвуковой доплеровской аппаратуры, учитывающие анатомическое расположение артериальных образований. Предложен принцип поканальной фильтрации сигналов, позволяющий повысить диапазон измеряемых максимальных скоростей кровотока.

ТРАНСКРАНИАЛЬНАЯ ДОПЛЕРОГРАФИЯ. КРОВОСНАБЖЕНИЕ МОЗГА. ПРЕДЕЛ НАЙКВИСТА. СИСТОЛИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ. АЛИАСИНГ. ГЕМОДИНАМИКА. ФАНТОМ КРОВОТОКА. ДОПЛЕРОГРАММА.

Семенов К.К. ОБЪЕДИНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА НЕЧЕТКИХ ПЕРЕМЕННЫХ И АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАСЛЕДСТВЕННОЙ ПОГРЕШНОСТИ.

Рассмотрена задача сопровождения каждого результата вычислений оценкой его наследственной погрешности. Представлено описание метода решения.

НАСЛЕДСТВЕННАЯ ПОГРЕШНОСТЬ. НЕЧЕТКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ. МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ.

Руденко Н.А., Комаров М.П. ОПТИМИЗАЦИЯ НАЛОГОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОЦЕССНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ.

Рассмотрено применение процессного подхода для оптимизации процессов государственного управления. Предложена классификация методов оптимизации налогового администрирования.

ОПТИМИЗАЦИЯ. ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД. ПРОЦЕССЫ ОРГАНИЗАЦИИ. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ. НАЛОГОВОЕ АДМИНИСТРИРОВАНИЕ.

Кузенкова А.С., Дерипаска А.О., Таран К.С., Подкопаев А.В., Литвинов Ю.В., Брыксин Т.А. СРЕДСТВА БЫСТРОЙ РАЗРАБОТКИ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ РЕШЕНИЙ В METACASE-СРЕДСТВЕ QREAL.

Изучено средство разработки визуальных предметно-ориентированных языков и инструментария поддержки для них. Приведено описание использования данного подхода на примере редактора программ для роботов Lego.

ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ РАЗРАБОТКА. МЕТАМОДЕЛИРОВАНИЕ. CASE-СИСТЕМЫ.

Лукашин А.А., Лукашин А.А. , Тютин Б.В., Котляров В.П. АРХИТЕКТУРА СЕРВИСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕСУРСОЕМКИХ ЗАДАЧ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ.

Предложен подход по организации вычислительных ресурсов в единую распределенную среду с сервис-ориентированным интерфейсом доступа, с использованием технологий виртуализации и средств управления на основе веб-сервисов.

ОБЛАЧНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРА. РАЗГРАНИЧЕНИЕ ДОСТУПА.

Веселов А.О., Иванов А.С., Тютин Б.В., Котляров В.П. АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА ТЕСТОВОГО ОКРУЖЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ.

Представлен подход к автоматизации конфигурирования тестового окружения для тестирования телекоммуникационных проектов, позволяющий не только сократить трудоемкость и временные затраты на процесс настройки тестового окружения телекоммуникационных систем, но и снизить количество ошибок тестирования за счет исключения ручного труда.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ГЕНЕРАЦИЯ КОДА. MSC. UML. SDL.

Королев Д.Н. ИНТЕГРАЦИЯ РАСПИСАНИЯ УЧЕБНЫХ КУРСОВ ФАКУЛЬТЕТА С ПОРТАЛОМ SHAREPOINT.

Представлен подход к автоматизации составления расписания на факультете, основанный на интеграции визуального редактора расписания с порталом SharePoint.

SAHREPOINT. РАСПИСАНИЕ. ВИЗУАЛЬНЫЙ РЕДАКТОР.

ANNOTATION

KEYWORDS

Agievich S.N., Ponomarev A.A., Smirnov A.A. RADIO SIGNAL MODEL OFDM GENERATED IN SPLINE-PONTRYAGIN–VILENKIN–CHRISTENSON FUNCTIONS BASES FOR RESERVED INFOCOMMUNICATION INTERACTION PROVIDING.

Advanced algorithms of processing of signals, generated in spline-Pontryagin–Vilenkin–Christenson functions bases are offered. Application of that algorithms in infocommunication interaction systems is justified. Results of computer simulation and effectiveness assessment are analyzed.

SIGNAL PROCESSING. SPLINE-PONTRYAGIN–VILENKIN–CHRISTENSON FUNCTIONS. OFDM.

Nechaev Yu.B., Epifancev A.A., Sidorov M.Yu. THE WAY OF ROUTING IN A NARROW-BAND RADIO NETWORK.

Requirements to the developed protocol of routing for perspective package narrow-band radio network are defined. Formats of packages of the service information of the report of routing, a format of the table of the routing stored in each of nodes, algorithm of work of the protocol are introduced.

ROUTING. MESH NETWORKS. SELF-ORGANIZATION.

Babkov V.Yu., Steputin A.N. INCREASING THE POSITIONING ACCURACY IN MOBILE NETWORKS.

The article describes methods for building of the direction-finding network superimposed on the mobile network. The accuracy, probability position of mobile stations of the mobile network and their electromagnetic availability are estimated by means of the direction-finding network. Methods of increasing accuracy and probability of the position are considered.

DIRECTION-FINDING NETWORK. MEASURING STATION. MOBILE STATION. POSITION. DIRECTION-FINDING CLUSTER.

Rostov N.V. MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF HIGH ORDER DIGITAL CASCADE CONTROLLERS USING DIRECT AND INDIRECT SOUNDING.

The problem of multiobjective parametrical optimization of high order digital cascade controllers are considered. The technique for computer-aided optimization of such controllers by means of direct and indirect sounding are presented. Two examples are given to search Pareto-optimal tuning of parameters, using genetic algorithm for sounding combined with algebraic synthesis and stability analysis in nodes.

DIGITAL CASCADE CONTROLLERS. ALGEBRAIC SYNTHESIS. MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION. DIRECT AND INDIRECT SOUNDING. GENETIC ALGORITHM. STABILITY ANALYSIS.

Aksyonov K.A., Antonova A.S. THE APPLICATION OF SIMULATION AND INTELLEGENT AGENTS TECHNOLOGY TO DECISION THE TASK OF SCHEDULING PROJECTS.

In this work the automation of scheduling the projects on the basis of simulation and intelligent agents' information technology is considered.

SCHEDULING PROJECTS. MULTI-AGENT SIMULATION. INTELLEGENT AGENTS.

Kedrin V.S., Kuzmin O.V. THE EMPLOYMENT OF A SOFTWARE ARCHITECTURE MODEL-VIEW-CONTROLLER FOR ESTABLISHMENT VISUAL DESIGNING AND MODELLING OF ALGORITHMS.

In clause considered the features of application software architecture MVC for the establishment of an information system for visual designing and modelling algorithms for digital signal processing. Proposed model of data organization and presentation of visual variative algorithms scheme based on a modified directed graph.

SOFTWARE ARCHITECTURE. SYSTEM OF VISUAL DESIGNING. MVC. DATA STRUCTURING FORM. SOFTWARE DEVELOPMENT.

Kozlov V.N., Nguyen D.Kh., Firsov A.N. MATHEMATICAL MODELLING AND OPTIMIZATION OF HYDRAULIC NETWORK IN STEADY-STATE CONDITIONS OF WEAKLY COMPRESSIBLE FLUID.

We construct a mathematical model of hydraulic networks in steady-state conditions on basis of system of equations of one dimensional flow of weakly compressible fluid in linear pipelines. This model allows to adequately formulate various optimization control problems of hydraulic networks.

HYDRAULIC NETWORK. STEADY-STATE CONDITION. WEAKLY COMPRESSIBLE FLUID. OPTIMIZATION CONTROL OF HYDRAULIC NETWORK.

Ankudinov G.I., Ankudinov I.G. LOGICAL-COMBINATORIAL APPROACH TO MORPHOLOGICAL SYNTHESIS IN MANAGEMENT AND DESIGN IS CONSIDERED.

Application of the logical-combinatorial approach to morphological synthesis in management and design is considered. Symbolic algorithms for constructing a hierarchical search space by way of the so-called singular parenthesized forms of propositional logic, permitting to realize numeric methods for solving linear and nonlinear morphological synthesis problems with both minimized and maximized additive indicators, are proposed.

MORPHOLOGICAL SYNTHESIS. LOGICAL-COMBINATORIAL APPROACH. SYMBOLIC ALGORITHMS. HIERARCHICAL SEARCH SPACE. SINGULAR PARENTHESIZED FORMS.

Aksyonov K.A., Wang Kai, Antonova A.S., Aksyonova O.P., Lipodaeva A.A. THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CONTROL OF THE BUILDING SHELL COMPANY.

In this work is considered the automation of the control process the building shell company on the basis of simulation and intelligent agents' information technology.

BUILDING SHELL COMPANY. SCHEDULING PROJECTS. MULTI-AGENT SIMULATION. INTELLEGENT AGENTS.

Dibikhin K.Yu., Vagapova N.V. SYSTEM MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL STRUCTURES OF AGRICULTURE.

System aspects of the permission of a problem of management are presented by formation of the organizational and technological structures integrated in agriculture.

SYSTEM. MANAGEMENT. STRUCTURE. THE LAND COMPLEX. THE AVIATION COMPLEX. AGROINDUSTRIAL MANUFACTURE.

Protalinsky O.M., Khomenko T.V. CONCEPTUAL REPRESENTATION OF SUBJECT PROBLEMS OF SEARCH DESIGNING OF THE PHYSICAL PRINCIPLE OF ACTION OF SENSITIVE ELEMENTS.

In this paper we propose a set-theoretic representation, which is a general variety of formal and linguistic representation of knowledge systems in automated systems for exploratory design. Set out the identified patterns that underlie the initial design phase and generated scripts choice of technical solutions, depending on the type of input data.

DESIGN. LEVEL OF ABSTRACTION. CATEGORIES. MORPHISMS. CHOICE OF DECISIONS.

Mamoutova O.V., Filippov A.S. MODEL DEVELOPMENT OF HIERARCHICAL MEMORY IN COMPUTER SYSTEM.

This paper examines how parameters and organization of memory hierarchy impact on reliability and performance of computer system. We present the simulation model of computer system developed for evaluation of this impact. Examples of simulation results are presented.

MEMORY HIERARCHY. CACHE MEMORY. RELIABILITY. PERFORMANCE. SIMULATION MODELING.

Itsykson V.M., Zozulya A.V. THE FORMALISM FOR DESCRIPTION OF PARTIAL SPECIFICATIONS OF PROGRAM ENVINROMENT COMPONENTS.

A formalization of partial specifications of program environments components is considered. These partial specifications are used for porting programs from one environment to another. The developed formalism and its representation by PanLang annotation language are described.

PARTIAL SPECIFICATIONS. PROGRAM ENVINROMENT. SEMANTIC. LIBRARY`S FUNCTIONS. PANLANG LANGUAGE.

Belyavsky G.I., Niconenko N.D. THE PROBLEM OF RANDOMIZED STOP OF VARIANCE-OPTIMAL HEDGING.

The problem of randomized stop of approximating finite sequence of random variables by a sequence of stochastic integrals.

OPTIMAL RANDOMIZED STOP. APPROXIMATION. MINIMAX THEOREM. METHOD OF PROJECTION GENERALIZED GRADIENT. VARIANCE-OPTIMAL CRITERION.

Zubkov A.F., Chekh K.Yu., Semenov I.A. MODELLING OF DYNAMICS OF MARKET PRICES.

The technique of simulation Elliott wave the sum of sinusoidal signals is suggested. Defined the initial parameters of Elliott wave for modelling the changes of market prices.

ELLIOTT WAVE. MODELLING THE SIGNAL. SUM OF SINUSOIDAL SIGNALS.

Khvorova L.A. MODEL OF THE THERMAL REGIME OF SOILS IN THE SPACE-DIFFERENTIATION TECHNOLOGY OF PRECISION AGRICULTURE.

The article is devoted to the problem of constructing a multidimensional model of the thermal regime of soil. We consider an algorithm and a numerical method for solving two-dimensional problem.

PRECISION AGRICULTURE. THERMAL REGIME OF SOIL. MULTIDIMENSIONAL MODEL. SOIL COMPARTMENT. DIFFERENCE SCHEMES.

Porshnev S.V., Grebenkin M.K. STATISTIC PROPERTIES OF THE TRAFFIC SAMPLES FROM BACKBONE LINKS AS WELL AS THEIR DEPENDENCE ON THE AGGREGATION ON TIME.

Some samples of network traffic of high-speed Internet link have been analyzed. Statistic properties of the traffic samples as well as their dependence on the aggregation on time are considered.

BACKBONE. TRAFFIC. SELF-SIMILARITY. PACKET ANALYZER.

Konygin S.B. LIMITS OF APPLICABILITY OF A PROBABILITY CELLULAR AUTOMATON METHOD IN PHYSICOCHEMICAL SYSTEMS MODELLING AT THE ATOMIC LEVEL.

The basic possibilities and limits of a probability cellular automaton method are considered. The testing results for few physicochemical systems are described.

PROBABILITY CELLULAR AUTOMATON. MODELLING. PHYSICOCHEMICAL SYSTEMS.

Lazarev E.M., Aksyonov K.A. THE SPATIAL ANALYSIS OF FACILITIES MANAGEMENT AREA.

This article discusses the methods and principles of spatial intelligence by using data of area management objects.

GEOINFORMATION SYSTEMS. OPENSTREETMAP. GEOSERVER. QGIS. FTOOLS. MANAGERR.

Stepanov E.A., Ukhnev A.D. TRANSKRANE ULTRASONIC DOPLER SYSTEM RECEIVER WITH THE EXPANDED RANGE OF REGISTERED CEREBRAL BLOOD-GROOVE SPEED INDICATORS.

Principles of transecrane ultrasonic dopler constraction are considered including an anatomic disposal of arterial formations. Channel signal filtration principle is introduced. This allows extending range of measured maximum blood-groove speed .

TRANSKRANE. BRAIN BLOOD SUPPLY. LIMIT NYQUIST. SYSTOLIC SPEED. HAEMODYNAMICS. THE BLOOD-GROOVE PHANTOM.

Semenov K.K. COMBINATION OF MATHEMATICAL FRAMEWORK FOR FUZZY VAIABLES AND AUTOMATIC DIFFERNTIATION FOR NESTED ERROR ESTIMATION.

In this paper, it considers the problem of nested error estimation for calculation results. It is proposed the method that represents calculation errors as fuzzy variables and uses automatic differentiation of functions determined by program source code.

NESTED ERROR. FUZZY VARIABLES. AUTOMATIC DIFFERENTIATION.

Rudenko N.A., Komarov M.P. OPTIMIZATION OF TAX ADMINISTRATION USING THE PROCESS APPROACH TO MANAGEMENT.

In the clause considered the application a process approach to optimize the processes of government. We proposed a classification of the optimization methods of tax administration.

OPTIMIZATION. PROCESS APPROACH. PROCESSES OF THE ORGANIZATION. METHOD OF OPTIMIZATION OF PROCESSES. GOVERNMENTS. TAX AUTHORITIES. TAX ADMINISTRATION.

Kuzenkova A.S., Deripaska A.O., Taran K.S., Podkopaev A.V., Litvinov Yu.V., Bryksin T.A. TOOLS FOR RAPID DEVELOPMENT OF DOMAIN-SPECIFIC SOLUTIONS IN QREAL METACASE SYSTEM.

An environment for development of visual domain-specific languages and supporting tools for them is described. New approach to rapid development of visual languages is proposed, tools for language evolution support and rapid source code generators development are described. An example of applying this approach for creation of tools for Lego robots programming is given.

DOMAIN-SPECIFIC MODELLING. MODEL-DRIVEN DEVELOPMENT. METAMODELLING. CASE TOOLS.

Lukashin A.A., Lukashin A.A., Tyutin B.V., Kotlyarov V.P. CLOUD SERVICE ARCHITECTURE FOR SCIENTIFIC AND ENGINEERING COMPUTING IN DISTRIBUTED ENVIRONMENT.

The paper describes approaches for organizing computation resources in entire distributed environment with service oriented architecture (SOA) using virtualization and web services technologies.

CLOUD COMPUTING. TELECOMMUNICATIONAL SYSTEMS. SERVICE ORIENTED ARCHITECTURE. ACESS ISOLATION.

Veselov A.O., Ivanov A.S., Tyutin B.V., Kotlyarov V.P. AUTOMATION OF TEST ENVIRONMENT CONFIGURING FOR TELECOM PROJECTS.

The paper presents an approach to automation of test environment configuring for testing projects in telecommunication domain. The considered approach allows us not only to reduce the complexity and time spent on the rather laborious process of setting up a test environment of telecommunication systems, but also reduce errors of testing by eliminating the manual efforts.

TESTING AUTOMATION. TELECOMMUNICATION SYSTEMS. CODE GENERATION. MSC. UML. SDL.

Korolev D.N. INTEGRATION OF FACULTY'S SCHEDULE WITH SHAREPOINT PORTAL.

In article the approach to automated timetabling at faculty is presented. The approach is based on integration of the schedule's visual editor with SharePoint portal.

SAHREPOINT. TIMETABLE. VISUAL EDITOR.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

№ 4 (128) 2011

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция журнала

канд. техн. наук, д-р экон. наук, профессор *А.В. Бабкин* – научный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции 552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 29.08.2011. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,99. Уч.-изд. л. 19,99. 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.